

## Efecto del estrés hídrico en la fisiología, producción y calidad de los aceites esenciales en *Salvia officinalis* y *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea*



Departamento de Ciencias Agroforestales  
E.U.I.T.A. UNIVERSIDAD DE SEVILLA



Mireia Corell González

### DIRECTORES:

Dr. Pedro Cermeño Sacristán  
Depto. Ciencias Agroforestales  
E.U.I.T.A., Universidad de Sevilla

Dr. Eduardo O. Leidi  
Depto. Biotecnología Vegetal  
IRNAS-CSIC



Departamento de Ciencias Agroforestales  
E.U.I.T.A. UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Tesis doctoral

**Efecto del estrés hídrico en la fisiología, producción y  
calidad de los aceites esenciales en *Salvia officinalis* y  
*S. lavandulifolia* subsp. *vellerea***

MIREIA CORELL GONZÁLEZ

Directores:  
Dr. Pedro Cermeño Sacristán  
Depto. Ciencias Agroforestales  
E.U.I.T.A., Universidad de Sevilla

Dr. Eduardo O. Leidi  
Depto. Biotecnología Vegetal  
IRNAS-CSIC



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a Pedro Cermeño Sacristán y a Eduardo O. Leidi directores de este trabajo su orientación y apoyo. Ellos me han abierto la puerta de la investigación, y han estado siempre dispuestos a compartir conmigo su experiencia.

Al igual que todos los profesionales que me han permitido aprender de su trabajo durante estos años. A Alfonso de Cires Segura y a Juan Francisco Herencia por su inestimable colaboración y prestancia desde que inicié esta andadura. A Joaquín Altarejos y Sofía Salido, ambos de la Universidad de Jaén, por su ayuda con el análisis químico de los aceites esenciales. A Damian Ravetta, Alejandra Vilela y a todas sus chicas Luciana, Wanda y Beti su conocimientos y su acogimiento en el área de cultivos en zonas áridas en el Museo Paleontológico Egidio Feruglio en Patagonia, Argentina.

A mis compañeros Castillo, Juan Pedro y Rosario que me han acompañado día a día en este trabajo, de principio a fin, codo a codo.

A Sara, Francisco, Vanesa, Antonia, Ani, Vero, Elisa, Ana, y al resto de los compañeros que han trabajado en el Departamento de Horticultura del Centro “Las Torres y Tomejil” que de una u otra manera también forman parte de este trabajo.

A Mary Velasco, Tony, Aguasanta, José Antonio siempre prestos a mis peticiones bibliográficas, en ocasiones tediosas, incluso imposibles. Su paciencia ha sido encomiable y su ayuda impagable.

A Pepe Romero y a las personas que han trabajado en los campos de ensayo, especialmente a los Franciscos y a Maxi, agradecerles a todos ellos su interés y sus cuidados.

Al equipo de mantenimiento y de administración de Las Torres, Paco, Juan, Joaquín, Mari Ángeles, Marta, José Luís, Jesús, Pablo, Jorge, Manoli,... siempre prestos a resolver cualquier problema. ¡Hacen que a veces parezca fácil!

A todo el personal del Centro de “Las Torres y Tomejil” por su disposición y ayuda.

A la dirección del Centro “Las Torres y Tomejil”, y al IFAPA de la Junta de Andalucía por haberme permitido utilizar las instalaciones y los recursos necesarios para realizar el presente trabajo de investigación.

A Loris, a mis padres, a mi hermana, a toda la familia y a todas mis amistades por su apoyo incondicional con estas cosas del estrés, con su paciencia, aliento y complicidad han colaborado inestimablemente en esta tarea.

Mireia Corell González.  
Sevilla, Mayo de 2009.



# ÍNDICE

<b>1.- Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1.- Plantas aromáticas	3
1.2.- Salvias	7
1.2.1.- Botánica, distribución y ecología	8
1.2.2.- Técnicas de cultivo	9
1.2.3.- Usos	12
1.2.4.- Propiedades medicinales	12
1.2.5.- Calidad del producto	13
1.2.6.- Composición química de los aceites de <i>S. officinalis</i> y <i>S. lavandulifolia</i>	14
1.3.- Concepto de estrés hídrico	23
1.3.1.- Efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento y desarrollo	25
1.3.2.- Efectos del estrés hídrico sobre el estado hídrico planta	26
1.3.3.- Efectos del estrés hídrico sobre la fotosíntesis	27
1.3.4.- Efecto del estrés hídrico en la eficiencia del uso del agua	28
1.3.5.- Efectos del estrés hídrico sobre la producción de aceites esenciales	29
1.4.- Objetivos del estudio	31
<b>2.- Material y métodos</b>	<b>33</b>
2.1.- Obtención de planta	35
2.2.- Cultivo	36
2.2.1.- Características de las parcelas de cultivo	36
2.2.2.- Plantación	36
2.2.3.- Plantas adventicias en el cultivo	38
2.2.4.- Tratamientos fitosanitarios durante el cultivo	38
2.3.- Tratamientos de riego	39
2.4.- Parámetros determinados	43
2.4.1.- Medidas relativas al agua en plantas	45
2.4.2.- Fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática	45
2.4.3.- Producción	46
2.4.4.- Composición química y calidad del aceite esencial	47
2.5.- Análisis de los datos	52

<b>3.- Resultados</b>	<b>53</b>
<b>3.1.- Efecto del déficit hídrico en el intercambio gaseoso y las relaciones hídricas</b>	<b>55</b>
3.1.1.- <i>Salvia officinalis</i>	55
3.1.2.- <i>Salvia lavandulifolia</i>	71
<b>3.2.- Análisis de regresión entre los parámetros de intercambio gaseoso</b>	<b>79</b>
3.2.1.- <i>Salvia officinalis</i>	79
3.2.2.- <i>Salvia lavandulifolia</i>	82
<b>3.3.- Efecto del déficit hídrico en el rendimiento productivo del cultivo</b>	<b>85</b>
3.3.1.- <i>Salvia officinalis</i>	85
3.3.2.- <i>Salvia lavandulifolia</i>	94
<b>3.4.- Asociación entre parámetros fisiológicos y productivos</b>	<b>103</b>
3.4.1.- <i>Salvia officinalis</i>	103
3.4.2.- <i>Salvia lavandulifolia</i>	107
<b>3.5.- Calidad y Composición química de los aceites esenciales bajo déficit hídrico</b>	<b>109</b>
3.5.1.- <i>Salvia officinalis</i>	109
3.5.2.- <i>Salvia lavandulifolia</i>	127
<b>4.- Discusión</b>	<b>139</b>
<b>5.- Conclusiones</b>	<b>165</b>
<b>6.- Bibliografía</b>	<b>169</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>181</b>
I.- Contenido en humedad del suelo	183
II.- Condiciones climáticas durante el periodo de estudio	189
III.- Asociaciones entre parámetros fisiológicos en máximo déficit y la producción del cultivo	205
IV.- Efecto del déficit hídrico en el crecimiento por planta	211
V.- Asociación entre parámetros fisiológicos y de crecimiento en <i>S. lavandulifolia</i>	215

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sensibilidad de diversos procesos fisiológicos de las plantas al estrés hídrico	25
Figura 2.1.- Croquis de cada parcela de cultivo	36
Figura 2.2.- Mortalidad al inicio de la plantación (implantación) y al final del estudio (fin de cultivo)	37
Figura 2.3.- Condiciones climáticas ocurridas durante los ensayos	40
Figura 2.4.- Aportación de agua anual recibida por los cultivos	41
Figura 2.5.- Contenido en humedad medio del suelo a profundidad de 0-20 cm en cada uno de los tratamientos de riego aplicados, durante el verano.	42
Figura 2.6.- Contenido en humedad medio del suelo a profundidad de 20-40 cm en cada uno de los tratamientos de riego aplicados, durante el verano	42
Figura 2.7.- Calendario de medidas anual	43
Figura 2.8.- Perfil típico del aceite esencial de <i>Salvia officinalis</i> L.	48
Figura 2.9.- Perfil típico del aceite esencial de <i>Salvia lavandulifolia</i> subsp. <i>vellerea</i>	49
Figura 3.1.1. - Medidas de intercambio gaseoso en <i>Salvia officinalis</i> a lo largo del verano de 2003	59
Figura 3.1.2.- Contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de <i>Salvia officinalis</i> a lo largo del verano de 2003	61
Figura 3.1.3.- Medidas de intercambio gaseoso en <i>Salvia officinalis</i> a lo largo del verano de 2004	62
Figura 3.1.4.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de <i>Salvia officinalis</i> a lo largo del verano de 2004	64
Figura 3.1.5.- Medidas de intercambio gaseoso en plantas de <i>S. officinalis</i> a lo largo del verano de 2005	65
Figura 3.1.6.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar de plantas de <i>S. officinalis</i> a lo largo del verano de 2005	66
Figura 3.1.7.- Medidas de intercambio gaseoso en <i>S. officinalis</i> con distintos tratamientos de riego a lo largo del verano de 2006	67
Figura 3.1.8.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de <i>S. officinalis</i> a lo largo del verano de 2006	68
Figura 3.1.9.- Medidas de intercambio gaseoso en plantas de <i>S. officinalis</i> a lo largo del verano de 2007	69
Figura 3.1.10.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de <i>S. officinalis</i> a lo largo del verano de 2007	70
Figura 3.1.11. - Medidas de intercambio gaseoso en <i>Salvia lavandulifolia</i> a lo largo del verano de 2005	73
Figura 3.1.12.- Medidas del contenido de agua y potencial hídrico foliar en <i>Salvia lavandulifolia</i> a lo largo del verano de 2005	74

Figura 3.1.13.- Medidas de intercambio gaseoso en <i>Salvia lavandulifolia</i> a lo largo del verano de 2006	75
Figura 3.1.14.- Medidas del contenido de agua y potencial hídrico foliar en <i>Salvia lavandulifolia</i> a lo largo del verano de 2006	76
Figura 3.1.15.- Medidas de intercambio gaseoso en <i>Salvia lavandulifolia</i> a lo largo del verano de 2007	77
Figura 3.1.16.- Medidas del contenido de agua y potencial hídrico foliar en <i>Salvia lavandulifolia</i> a lo largo del verano de 2007	78
Figura 3.2.1.- Relación entre $A$ y $g_s$ en <i>S. officinalis</i>	79
Figura 3.2.2.- Relación entre $E$ y $g_s$ en <i>S. officinalis</i>	80
Figura 3.2.3.- Relación entre $A$ y $E$ en <i>S. officinalis</i>	81
Figura 3.2.4.- Relación entre $A$ y $g_s$ en <i>S. lavandulifolia</i>	82
Figura 3.2.5.- Relación entre $E$ y $g_s$ en <i>S. lavandulifolia</i>	83
Figura 3.2.6.- Relación entre $A$ y $E$ en <i>S. lavandulifolia</i>	83
Figura 3.3.1.- Producción total del cultivo durante el período 2003-2007 en <i>S. officinalis</i>	92
Figura 3.3.2.- Eficiencia en el uso del agua del cultivo durante el período 2003-2007 en <i>S. officinalis</i>	93
Figura 3.3.3.- Producción total del cultivo durante el período 2006-2007 en <i>S. lavandulifolia</i>	101
Figura 3.3.4.- Eficiencia en el uso del agua del cultivo durante el período 2006-2007 en <i>S. lavandulifolia</i>	102
Figura 3.5.1.- Contenido en $\alpha$ -pineno del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	111
Figura 3.5.2.- Contenido en canfeno del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	112
Figura 3.5.3.- Contenido en limoneno del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	113
Figura 3.5.4.- Contenido en 1,8-cineol del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	114
Figura 3.5.5.- Contenido en $\alpha$ -tuyona del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	115
Figura 3.5.6.- Contenido en $\beta$ -tuyona del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	116
Figura 3.5.7.- Contenido en alcanfor del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas de 2004 a 2007	117

Figura 3.5.8.- Contenido en linalol del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	<b>118</b>
Figura 3.5.9.- Contenido en acetato de bornilo del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	<b>119</b>
Figura 3.5.10.- Contenido en $\alpha$ -humuleno del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007	<b>120</b>
Figura 3.5.11.- Contenido en $\alpha$ -pineno del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2006 a 2007	<b>129</b>
Figura 3.5.12.- Contenido en canfeno del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007.	<b>130</b>
Figura 3.5.13- Contenido en sabineno del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>130</b>
Figura 3.5.14.- Contenido en limoneno del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>131</b>
Figura 3.5.15.- Contenido en 1,8-cineol del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>132</b>
Figura 3.5.16.- Contenido en terpinoleno del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>132</b>
Figura 3.5.17.- Contenido en alcanfor del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>133</b>
Figura 3.5.18.- Contenido en acetato de linalilo del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>134</b>
Figura 3.5.19.- Contenido en linalol del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>134</b>
Figura 3.5.20.- Contenido en terpineno-4-ol del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>135</b>
Figura 3.5.21.- Contenido en borneol del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> , en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007	<b>135</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Caracterización de los componentes más importantes del aceite esencial de <i>S. officinalis</i>	15
Tabla 1.2.- Caracterización de los componentes más importantes del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i>	16
Tabla 1.3.- Usos en la industria de algunos de los componentes de <i>S. officinalis</i> y <i>S. lavandulifolia</i>	17
Tabla 1.4.- Normas ISO para los aceites esenciales de <i>S. officinalis</i> y los perfiles cromatográficos de distintas variedades con los países de procedencia y los principales países de cultivo	18
Tabla 1.5.- Perfil cromatográfico del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en distintos estadios fenológicos	19
Tabla 1.6.- Perfil cromatográfico de los aceites de <i>S. officinalis</i> a distintas altitudes y épocas del año	20
Tabla 1.7.- Perfil cromatográfico de distintas partes de la planta de <i>S. officinalis</i>	20
Tabla 1.8.- Perfiles cromatográfico de varias subespecies de <i>Salvia lavandulifolia</i>	21
Tabla 1.9.- Perfil cromatográfico de <i>Salvia lavandulifolia</i> subs. <i>vellerea</i> recolectada en diferentes poblaciones	22
Tabla 2.1. Germinación	35
Tabla 2.2.- Aportes hídricos de cada uno de los tratamientos	39
Tabla 2.3.- Aportes hídricos producidos por la lluvia durante otoño-invierno y primavera	41
Tabla 2.4.- Fechas de medidas de contenido hídrico del suelo	43
Tabla 2.5.- Fechas de medida de relaciones hídricas e intercambio gaseoso en hoja	44
Tabla 2.6.- Fechas de recolección de cosecha	44
Tabla 2.7.- Programa de temperaturas de columna para el análisis del aceite esencial de cada una de las especies	48
Tabla 2.8.- Tiempos de retención de cada uno de los componentes más importantes presentes en el aceite esencial de <i>Salvia officinalis</i>	49
Tabla 2.9.- Tiempos de retención de cada uno de los componentes presentes en el aceite esencial de <i>Salvia lavandulifolia</i> subsp. <i>vellerea</i>	50
Tabla 2.10.- Contenido relativo de cada uno de los componentes que dictan la calidad del aceite esencial de <i>Salvia officinalis</i> (ISO 9909:1997)	50
Tabla 2.11.- Contenido relativo de cada uno de los componentes que dictan la calidad del aceite esencial de <i>Salvia lavandulifolia</i> (ISO 3526 :1991)	51

Tabla 3.1. - Intercambio gaseoso y relaciones hídricas en <i>Salvia officinalis</i> durante el verano con distintos tratamientos de riego en los cinco años estudiados (2003-07)	<b>55</b>
Tabla 3.1.2.- Medidas de intercambio gaseoso, contenido hídrico y potencial hídrico foliar en <i>Salvia lavandulifolia</i> durante el verano con distintos tratamientos de riego en los tres años estudiados (2005-07)	<b>71</b>
Tabla 3.3.1.- Efecto de los tratamientos de riego, años de cultivo y estaciones de recolección sobre la producción de biomasa y aceite esencial en <i>S. officinalis</i>	<b>85</b>
Tabla 3.3.2.- Efecto de los tratamientos de riego, años de cultivo y estación de recolección sobre la eficiencia en el uso del agua del cultivo de <i>S. officinalis</i>	<b>87</b>
Tabla 3.3.3.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo durante las recolecciones de otoño sobre la producción de <i>S. officinalis</i>	<b>88</b>
Tabla 3.3.4.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la eficiencia en el uso del agua en la producción de biomasa y aceite esencial del cultivo de <i>S. officinalis</i> para las recolecciones de otoño	<b>89</b>
Tabla 3.3.5.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la producción de biomasa y aceite esencial de <i>S. officinalis</i> para las recolecciones de primavera	<b>90</b>
Tabla 3.3.6.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la eficiencia en el uso del agua para la producción de biomasa y aceite esencial del cultivo de <i>S. officinalis</i> en las recolecciones de primavera	<b>91</b>
Tabla 3.3.7.- Efecto de los tratamientos de riego, los años de cultivo y las estaciones de recolección sobre la producción de <i>S. lavandulifolia</i>	<b>94</b>
Tabla 3.3.8.- Efecto de los tratamientos de riego, años de cultivo y estación de recolección sobre la eficiencia en el uso del agua para producción de biomasa y aceite esencial en el cultivo de <i>S. lavandulifolia</i>	<b>95</b>
Tabla 3.3.9.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo en la producción de biomasa y aceites esenciales en las recolecciones de otoño de <i>S. lavandulifolia</i>	<b>97</b>
Tabla 3.3.10.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la eficiencia en el uso del agua del cultivo de <i>S. lavandulifolia</i> en las recolecciones de otoño	<b>98</b>
Tabla 3.3.11.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la producción de <i>S. lavandulifolia</i> en las recolecciones de primavera	<b>99</b>
Tabla 3.3.12.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo en la eficiencia en el uso del agua del cultivo para la producción de biomasa y aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> para las recolecciones de primavera	<b>100</b>
Tabla 3.4.1.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de <i>S. officinalis</i> . Media de tres medidas durante el verano de 2003 y 2004.	<b>104</b>
Tabla 3.4.2.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de <i>S. officinalis</i> . Media de tres medidas durante el verano de 2005 y 2006.	<b>105</b>

Tabla 3.4.3.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de <i>S. officinalis</i> . Media de tres medidas durante el verano de 2007	<b>106</b>
Tabla 3.4.4.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de <i>S. lavandulifolia</i> . Media de tres medidas durante el verano de 2006	<b>107</b>
Tabla 3.4.5.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de <i>S. lavandulifolia</i> . Media de tres medidas durante el verano de 2007	<b>108</b>
Tabla 3.5.1.-Composición química del aceite esencial de <i>Salvia officinalis</i> en cada uno de los tratamientos de riego, en las recolecciones de primavera y otoño de 2005 a 2007	<b>110</b>
Tabla 3.5.2.- Calidad química del aceite esencial de <i>S. officinalis</i> en las recolecciones de otoño y primavera desde 2004 a 2007, (%)	<b>122</b>
Tabla 3.5.3.-Composición química de <i>S. lavandulifolia</i> en cada uno de los tratamientos, en las recolecciones de primavera y otoño de 2006 y 2007	<b>128</b>
Tabla 3.5.4.- Calidad química del aceite esencial de <i>S. lavandulifolia</i> en las recolecciones de otoño y primavera en 2006 y 2007, (%)	<b>137</b>

## ABREVIATURAS EMPLEADAS

<b>PAM</b>	Plantas aromáticas y medicinales
<b>ET<sub>o</sub></b>	Evapotranspiración de referencia
<b>DPV</b>	Déficit de presión de vapor
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	Potencial hídrico
<b>A</b>	Tasa de fotosíntesis neta
<b>g<sub>s</sub></b>	Conductancia estomática
<b>E</b>	Tasa de transpiración
<b>EUAI</b>	Eficiencia en el uso del agua instantánea
<b>dda</b>	Día del año
<b>CHF</b>	Contenido hídrico foliar , %
<b>PF</b>	Peso fresco
<b>PS</b>	Peso seco
<b>RAEp</b>	Rendimiento de aceite esencial por unidad de peso seco
<b>RAEs</b>	Rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie
<b>EUA pf</b>	Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca
<b>EUA ps</b>	Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa seca
<b>EUA AE<sub>p</sub></b>	Eficiencia en el uso de agua en el rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa
<b>EUA AE<sub>s</sub></b>	Eficiencia en el uso de agua en la producción de aceite esencial por hectárea
<b>r</b>	Coefficiente de Pearson
<b>Sig</b>	Significancia
<b>N</b>	Numero de datos de la muestra
<b>ES</b>	Error Standard
<b>Hd</b>	Contenido en humedad



# INTRODUCCIÓN





### **1.1. Plantas aromáticas y medicinales.**

Las plantas que denominamos aromáticas y medicinales constituyen un grupo de especies botánicas muy heterogéneas, que comparten todas ellas un alto contenido en principios activos. Las propiedades químicas y/o organolépticas de estos compuestos convierten estas especies en adecuadas para finalidades terapéuticas, aromáticas o gastronómicas (Cristóbal *et al.*, 2004).

La península Ibérica posee una abundante y variada flora autóctona con estas características, gran parte de la cual se ha venido aprovechando como plantas aromáticas y medicinales (PAM) a lo largo de la historia. La explotación de este recurso, especialmente en los ámbitos rurales, se ha realizado mediante la recolección de poblaciones silvestres de forma manual o muy poco mecanizada. Esta explotación ha disminuido en las últimas décadas por factores socio-económicos, especialmente la escasez de mano de obra en el medio rural de manera que su aprovechamiento ha disminuido paulatinamente (Muñoz, 1989).

El cultivo de PAM en España ha sido muy variable en las últimas cuatro décadas, y en los últimos años ha aumentado considerablemente su demanda así como de los productos derivados de las mismas, por lo que ha aumentado sustancialmente la superficie dedicada al cultivo. Paralelamente han crecido las solicitudes de información sobre las técnicas a utilizar en estos cultivos, por parte de agricultores interesados en comenzar a cultivar estas especies.

El cultivo de plantas aromáticas y medicinales se contempla como una alternativa de futuro sobre todo en zonas de características especiales (montañas, monte bajo, zonas áridas moderadas, etc.) en las que no son posibles o rentables los cultivos convencionales (Moré y Colom, 2002).

La potencialidad del éxito cultural de las PAM se ve avalada por diversos factores: la existencia de una numerosa flora autóctona silvestre útil, unas condiciones climáticas favorables y diversas en todo el territorio, un incremento del consumo de productos derivados de PAM, un mayor beneficio agrícola (comparado con otros productos agrarios) y un mayor beneficio medioambiental (Moré y Colom, 2002).

Ya en 1987 Palevitch llamó la atención sobre la importancia del estudio de las técnicas de cultivo más adecuadas para plantas medicinales, entre ellas el manejo de sus necesidades hídricas. Esta necesidad aún continúa en la actualidad debido a la escasa existencia de conocimientos técnicos específicos de PAM.

Los problemas más destacados que tiene el sector de producción de PAM a nivel técnico en la actualidad que se pueden resaltar son tres:

- Dificultad de multiplicación de algunas especies. La obtención de material vegetal homogéneo requiere el estudio de técnicas específicas para las especies de PAM de mayor demanda e interés.
- Alta heterogeneidad del material vegetal. Es necesario seleccionar quimiotipos, variedades, etc. aclimatados a las diversas condiciones de cultivo existentes en España. Atendiendo a su valor productivo y eficiencia en el uso del agua.
- Desconocimiento del manejo agronómico de estas especies.

Son varios los grupos de investigación y experimentación que en las últimas décadas han desarrollado trabajos en nuestro país intentando despejar algunos de los interrogantes señalados anteriormente. Una larga lista de autores han iniciado interesantes trabajos desde distintos ángulos (Muñoz, 1987; Marcos Sanz y García Vallejo, 1986, 1988; Burillo, 1990, 2003; Fernandez Pola, 2001; Cabot, 2002, 2003; Moré y Colom, 2002; Sotomayor, 2004; Jordán, 2003, 2007). Gracias a ellos y a la iniciativa del sector productor e industrial se ha ido estableciendo el cultivo de PAM en nuestro país.

España es un país exportador de PAM, con prestigio dentro del sector, por la calidad de los productos que se han comercializado a lo largo de la historia. Han sido los recolectores locales, concedores por tradición de las poblaciones de PAM de mayor calidad, los que han mantenido la imagen de la producción española de plantas aromáticas y medicinales. Esta producción se ha caracterizado por una alta calidad en cuanto al contenido en principios activos, pero una escasa presentación y manipulación, determinando que el aprovechamiento de nuestra flora haya proporcionado productos en bruto, con muy poca elaboración y escaso valor añadido. El cultivo de estas especies tiene entre otros el deber de mantener la calidad de los productos obtenidos de las poblaciones naturales explotadas históricamente.

La demanda en el mercado está creciendo en los últimos años a nivel mundial. España exporta el 5% del volumen mundial de PAM, siendo el primer país a nivel europeo, seguido de Alemania. En importaciones nuestro país se sitúa en décimo lugar con un 3% del total (Consejo Federal de Inversiones Argentino, 2003). La superficie dedicada a su cultivo comienza a ser considerable, principalmente en producción ecológica.

Los datos estadísticos disponibles ofrecen visiones parciales de las realidades productivas de PAM y variables dependiendo de la fuente consultada. La consideración de PAM que realiza cada entidad o administración es diferente: una misma especie puede ser catalogada como cultivo industrial, aromático y medicinal o como condimento.

A pesar de la escasa información acerca del cultivo y la recolección de estas plantas, los datos disponibles sitúan a España entre los principales países productores en Europa, como tercer productor europeo (en la Europa de los 27) de plantas medicinales, aromáticas y condimentarias con 13.650 t, por detrás de Bulgaria (53.350 t) y Polonia (15.310 t). Además habría que tener en cuenta una parte de PAM incluidas en otros cultivos industriales, como los de lavanda y lavandín (junto a cultivos energéticos como los cardos, o el mimbre para cestería entre otros) que en total alcanzan 70.880 t.

En superficie dedicada a estos cultivos, España ocupa el primer lugar en cultivo ecológico con 12.910 ha en 2007, seguida de Italia (3.450 ha), Francia (3.131 ha) y Austria (1.412 ha) y la sexta posición en cultivo convencional, con una media en los últimos seis años de 5.900 ha o de 7.530 ha dedicadas a los cultivos industriales señalados anteriormente entre los que están lavandas y lavandines. Así, en cultivo convencional, España está por detrás de Bulgaria (52.000 ha), Francia (35.0000 ha), Rumania (11.0000 ha), Finlandia (11.000 ha) y Alemania (6.100 ha) (Eurostat, 2009).

En el comercio internacional, la Unión Europea se presenta como la principal salida de las PAM, con una producción diversa, competitiva y con circuitos de comercialización cortos. En el cultivo de *Salvia officinalis*, Turquía y Albania han sido los principales países competidores (ONIPPAM, 2006).

La producción española, desgraciadamente, está muy atomizada y poco organizada, con muy poca colaboración institucional y con escasos contactos con el sector industrial. Además, el balance del comercio exterior de las PAM y de sus transformados en España siempre ha sido negativo, excepto en el caso del pimiento rojo (*Capsicum* sp.), azafrán (*Crocus sativus*), tomillo (*Thymus vulgaris*), anís (*Pimpinella anisum*) y regaliz (*Glycyrrhiza glabra*).

Por otro lado, en nuestro país hay autoabastecimiento de aceites esenciales, como romero (*Rosmarinus officinalis*), espliego (*Lavandula latifolia*) o tomillo silvestre (*Thymus mastichina*), pero es deficitario en el conjunto de esencias. Se producen volúmenes considerables de lavanda (*Lavandula angustifolia*), lavandín (*Lavandula hybrida*), menta (*Mentha* sp.), salvia (*Salvia officinalis*), anís (*Pimpinella anisum*), azafrán (*Crocus sativus*) y tomillo (*Thymus* sp.). Esta última proviene mayoritariamente de la recolección de plantas silvestres, mientras que las otras se cultivan (Moré y Colom, 2002).

Según el Ministerio de Agricultura la superficie dedicada al cultivo en agricultura ecológica alcanzó en 2007 un 3% de la superficie total (13.018 hectáreas), de las cuales 10.946 ha estaban en Andalucía (MAPA, 2008). Habría que tener en cuenta también en las estadísticas la recolección de plantas silvestres que suele suponer una parte importante. De hecho la

principal fuente de tomillo es la explotación de las poblaciones naturales, que se contabiliza en las estadísticas dentro del aprovechamiento del bosque.

En Andalucía el cultivo de especies de PAM en producción ecológica ha crecido de manera exponencial en los últimos años, pero no existen datos de cultivos convencionales. Los registros de la producción ecológica existen, entre otros motivos, por el respaldo de ayudas económicas al sector. De modo que el cultivo convencional tan sólo existe en las estadísticas andaluzas de manera marginal.

El cultivo de lavanda y lavandín ha disminuido en los últimos 10 años hasta casi desaparecer: en 2004, en la provincia de Granada sólo existían registradas 17 ha de las 250 ha que aparecían en 1999. Si constan de manera más estable otros cultivos, como la adormidera con 3.283 ha, para fines farmacéuticos en las provincias de Sevilla, Córdoba y Málaga, y como condimentos el anís, con 220 ha principalmente en Málaga, y el pimiento para pimentón, con 107 ha en Granada (Consejería de Agricultura y Pesca de Andalucía 1999, 2004, 2005).

En cuanto a la importancia económica y social, podemos decir que el mercado actual de las plantas aromáticas, medicinales y condimentarias abarca un abanico muy amplio de sectores. Moré y Colom (2002) plantean, en su estudio sobre la distribución comercial de PAM, la siguiente clasificación del sector industrial:

1. Industria de primera transformación, emplea como materia prima: planta fresca y planta seca.
  - Mayoristas de planta (planta seca transformada)
  - Industrias extractoras (extractos medicinales/alimentarios)
  - Fabricantes de aceites esenciales
2. Industria de segunda transformación, emplea como materia prima planta seca transformada y aceites esenciales.
  - Acondicionadores (planta seca envasada)
  - Fabricantes de aromas (esencias)
3. Industria utilizadora. Emplea como materias primas extractos, esencias, aceites esenciales y planta seca transformada.
  - Laboratorios farmacéuticos, dietéticos, parafarmacéuticos
  - Industria cosmética y perfumista (cosméticos, perfumes)
  - Industria agroalimentaria (condimentos, alimentos, bebidas, dulces)

Es necesario tener en cuenta que en el sector alimentario hay una producción de PAM que directamente entra en la cadena alimentaria como cualquier hortaliza. Las especies

empleadas como condimentos frescos son productos destinados al consumidor final o a intermediarios como minoristas de la alimentación, restauración y grandes superficies, cada vez más abundantes en los canales comerciales.

Otra parte de la producción de PAM está encuadrada en sectores minoritarios, como la jardinería y el paisajismo, o la protección de cultivos, etc.

Según un estudio realizado por Peroy (2003) en los próximos años la demanda comercial de PAM se incrementará especialmente en tres grupos de especies. Aquellas demandadas por su contenido en antioxidantes: romero (*Rosmarinus officinalis*), salvia (*Salvia officinalis* y *Salvia lavandulifolia*), ajedrea (*Satureja montana*) y orégano (*Origanum vulgare*). Un segundo grupo valoradas para su uso como fitomedicamentos: valeriana (*Valeriana officinalis*) y equinácea (*Echinacea angustifolia*). Y por último los tomillos (*Thymus* spp.) y las lavandas (*Lavandula* spp.) podrían tener también buena salida comercial, aunque la evolución de la demanda depende de muchos factores, entre ellos vale la pena destacar las modas de consumo, las nuevas aplicaciones (uso de antioxidantes naturales), el futuro de la legislación y los costes de la mano de obra entre otros.

## **1.2. Salvias.**

El genero *Salvia*, pertenece a la familia de las labiadas y está formado por unas 900 especies repartidas por todo el globo (Rosua y Blanca, 1986). En Andalucía se han descrito más de 10 especies (Valdes *et al.*, 1987) de las cuales, las más empleadas por sus cualidades aromáticas y medicinales, son *Salvia sclarea*, *S. verbenaca*, *S. officinalis* y *S. lavandulifolia*. Esta última, conocida como salvia española, es muy apreciada por su bajo contenido en tuyona (Bruneton, 2001). La especie *Salvia sclarea* tiene una buena adaptación a condiciones semiáridas (Carruba *et al.*, 2002), aunque su aceite esencial es escaso, por la pérdidas que se producen en su extracción, pero es muy valorado en el mercado (Burillo y Prado, 1990; Burillo y García Vallejo, 2003). Las más utilizadas son *S. officinalis* y *S. lavandulifolia* en el sector de PAM y ambas son muy valoradas en los mercados extranjeros.

Los estudios realizados en los últimos 12 años sobre el género *Salvia*, se han centrado principalmente en la composición de su aceite esencial y en el metabolismo de los monoterpenos y diterpenos que lo forman. En el último período, los estudios se han enfocado en su actividad antioxidante, por la repercusión que tiene en la industria alimentaria, farmacéutica, así como su actividad fitoterapéutica, especialmente en la prevención y tratamiento de enfermedades neurológicas como el Alzheimer.

### 1.2.1. Botánica, distribución y ecología.

Las especies del género *Salvia* se caracterizan por ser perennes, con raíz lignificada que da lugar a numerosos tallos aéreos en la fase vegetativa. La época de floración varía según la altitud y la latitud.

La variabilidad de hojas, inflorescencia e indumento es muy alta dentro del género. La morfología foliar, el grado de contracción de verticilastros e inflorescencias, la longitud del pedúnculo floral y el indumento de hojas, eje floral y cáliz resultan útiles para la diferenciación específica, incluso interespecífica en el caso de las inflorescencias y el indumento (Rosua y Blanca, 1986).

*Salvia officinalis* L. se encuentra distribuida por el SE de Europa (Yugoslavia, Albania y N de Grecia), y actualmente está naturalizada en el centro y el sur de Europa, por haber sido cultivada ampliamente. La presencia de salvia en la Península Ibérica podría atribuirse al paso de las civilizaciones que llegaron a la península (fenicios, griegos y romanos) y ya entonces eran conocidas sus aplicaciones medicinales. Fue cultivada durante mucho tiempo, lo que dio lugar a que se asilvestrara en muchas áreas (Rosua y Blanca, 1986). En la Península Ibérica habita principalmente en el levante mediterráneo (Font Quer, 1990), aunque al tratarse de una especie naturalizada, aparece en ambientes muy diversos (Rosua y Blanca, 1986). En Andalucía occidental, la especie se encuentra en Aracena, posiblemente proveniente de antiguos cultivos (Valdés *et al.*, 1987).

La planta es un arbusto, glandular tomentoso, y forma tallos ramificados de hasta 50 cm de longitud, de sección cuadrangular. Tiene hojas pecioladas de color verde, amarillentas en el haz y blanquecinas en el envés. Forma inflorescencias simples con un par de ramas opuestas en la base. Las flores tienen corola azul-rosada, y cáliz de 9-12 mm, con el labio superior con 3 dientes bien marcados (Valdés *et al.*, 1987).

Habita en multitud de parajes de climas templados y templado-cálidos: pastos, céspedes, peñascos acantilados, llanuras áridas, laderas y collados, a pleno sol, semi-sombra o sombra, y en altitudes de 0 a 1.800 m (Fernández Pola, 2001). No tolera terrenos empapados ni el exceso de agua. Es relativamente resistente a las heladas (tolera hasta  $-5^{\circ}\text{C}$ ), siendo una planta termófila y xerófila (Muñoz, 1987; Fernández Pola, 2001). Por su rusticidad soporta suelos con alto contenido en calizas y pH entre 6 y 9, aunque prefiere suelos de consistencia media, algo ligeros y calcáreos (Burillo y García vallejo, 2003).

*Salvia lavandulifolia* es una especie distribuida por las montañas calizas de la cuenca mediterránea occidental (Francia, España, Marruecos y Argelia), desde la región mediterránea en Francia al sur del Atlas en Marruecos. Su amplia distribución geográfica, y la existencia de

diversas condiciones ecológicas, permiten utilizar el criterio geográfico-ecológico para diferenciar las subespecies (Rosua y Blanca, 1986).

La variabilidad que presenta *S. lavandulifolia* y la presencia de *S. officinalis* en la Península Ibérica ha llevado a distintos autores a establecer y describir un buen número de combinaciones y taxones nuevos a lo largo de la historia (Rosua y Blanca, 1986). Muchos de ellos la incluían como una subespecie de *S. officinalis*. Algunas de las referencias encontradas acerca de *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea* la denominan *S. lavandulifolia* ssp. *oxydon* siguiendo la clasificación de Rivas Godoy y Rivas Martínez (1967).

*Salvia lavandulifolia* subsp. *vellerea* es un arbusto, de hojas opuestas, pecioladas con limbo elíptico-lanceolado. Las flores dispuestas en verticilatos densos de 5-6 flores, en inflorescencias simples, glabra o pubescente. Cáliz campanulado regular, glabro-pubescente. Flores de 1,5-2,5 cm. Florece de junio a julio.

Esta subespecie tiene dos variedades: *vellerea* y *lagascana*. La primera de cáliz glandular-pubescente, habita mayoritariamente en la zona del Levante peninsular. La variedad *lagascana* con el cáliz glabro, únicamente con glándulas sentadas, dientes lanceolados, largamente acuminados habita en la Bética (Rosua y Blanca, 1986).

En Sierra Nevada conviven ambas variedades, que suelen presentarse entre los 1.800-2.000 m. En estas poblaciones se presentan individuos híbridos de características intermedias entre ambas variedades (Rosua y Blanca, 1986).

### **1.2.2. Técnicas de cultivo**

#### *Multiplicación:*

*S. officinalis* se reproduce bien por semillas y es el método de multiplicación más frecuente y económico; aunque también se puede propagar por estaquillas (Muñoz, 1986; Fernández Pola, 2001). La temperatura más adecuada para la germinación es de 20°C. Los porcentajes de germinación pueden llegar al 90% aproximadamente (Cabot y Busquets, 2002; Cabot *et al.*, 2003). Las semillas mantienen su poder germinativo durante 3-4 años (Hornok, 1992).

La siembra suele realizarse en semillero de cama caliente, y la época de hacerlo suele estar entre finales de febrero y primeros de marzo. En caso de la realización de estaquillado, se debe aprovechar la parada vegetativa, y para ello la mejor época es el mes de febrero (Burillo y García Vallejo, 2003).

*S. lavandulifolia* tiene mayores dificultades de propagación. Las semillas presentan una latencia que dificulta la germinación, y los porcentajes de germinación oscilan en valores bajos,

alrededor de 30%. Por tanto, es necesario el uso de tratamientos de previos, como el empleo de giberelinas ( $GA_3$ ), que mejoran sustancialmente la germinación, alcanzando un 75%. Los mejores resultados se obtienen en esta especie con ciclo de temperatura día/noche (25/10°C) y tratamiento de  $GA_3$  (500ppm) (Cermeño *et al.*, 2006).

El estaquillado es una técnica habitualmente empleada con la que se alcanzan niveles de éxito bajos y los tratamientos hormonales para mejorar el enraizamiento no son efectivos (Cabot *et al.*, 2003). La propagación por estaquilla puede tener un éxito de entre un 15 y un 40% de plantas. Esta técnica está especialmente indicada para la multiplicación de material seleccionado, procedente de plantas madres.

#### *Plantación:*

Las labores preparatorias del terreno, para la realización de la plantación definitiva del cultivo, son las mismas en ambas especies. Consisten en una labor previa de vertedera o subsolador y un retirado de piedras, y antes del trasplante se debe realizar una labor de grada o cultivador. Las plántulas para el trasplante deben tener entre 12 y 15 cm de altura (Burillo y García Vallejo, 2003).

La densidad de plantación dependerá del destino de la producción: en caso de producción de sumidades floridas para herboristería se emplearan marcos más estrechos, si es para aceite esencial marcos intermedios y los más amplios para la obtención de semillas. Los marcos de plantación pueden oscilar entre 50 y 100 cm de distancia entre líneas y entre 20 y 62,5 cm entre plantas. De modo que se suele trabajar con densidades que van desde 20.000 a 80.000 plantas. $ha^{-1}$  (Fernández Pola, 2001).

En los estudios existentes realizados con ambas especies aparecen distintas densidades de plantación, en algunos casos muy bajas y en otros mayores. En los trabajos experimentales llevados a cabo en Aragón por Burillo y García Vallejo (2003) las densidades utilizadas fueron de 9.600 plantas. $ha^{-1}$  en ambas especies.

Con *Salvia officinalis*, Perry *et al.* (1999) empleaban en Nueva Zelanda densidades de plantación algo superiores, de 33.000 plantas. $ha^{-1}$ . En trabajos realizados en los Alpes, con *S. officinalis*, se alcanzaron densidades de 48.000 plantas. $ha^{-1}$  (Carlen *et al.*, 2005 y Carrion *et al.*, 2003). En estudios realizados en Iran (Mirjalili *et al.*, 2006), se utilizaban densidades más altas, de 66.000 plantas. $ha^{-1}$ . Esta variación de las densidades no atendía, en la mayoría de los casos, al destino de la producción, sino a las condiciones edafoclimáticas de la zona geográfica del estudio y al material vegetal empleado.

### *Fertilización:*

La fertilización recomendada por los autores españoles que han trabajado en este cultivo (Muñoz, 1986; Fernández Pola, 2001) se basa en un aporte de estiércol de granja, en torno a 20 t.ha<sup>-1</sup>, añadido en otoño con las preparaciones iniciales del terreno, y en los sucesivos años de cultivo a finales de invierno. Se recomienda además una fertilización mineral de 40-50 u.f. de nitrógeno, 80-100 u.f. de fósforo y 80-100 u.f. de potasio. La fertilización nitrógenada se recomienda en cobertera y fraccionada en dos partes: al comenzar la brotación y después de la primera corta.

### *Labores culturales:*

Para el mantenimiento del suelo se recomiendan dos binas y dos escardas antes del primer corte y otra bina después de éste.

Uno de los mayores problemas del cultivo de salvia es el control de las plantas adventicias. Se recomiendan diferentes herbicidas, como linuron y lenacilo (Fernández Pola, 2001). Pero su uso está siendo limitado en los cultivos por la tendencia hacia la agricultura ecológica, por la demanda de productos naturales, ecológicos y saludables. De esta manera, la escarda mecanizada y el uso de “mulching” de diversos tipos (agrotexiles, materiales naturales como paja, corteza de pino, etc.) son las técnicas más adecuadas para poder controlar las plantas adventicias que compiten con el cultivo, especialmente durante la implantación, cuando las plantas todavía tienen un pequeño porte y crecimiento lento por lo que la competencia con las adventicias por luz y nutrientes es muy alta. En una segunda fase del cultivo, en la que las plantas han alcanzado un crecimiento mayor, y sombream con su porte una gran parte del terreno, la competencia de las espontáneas disminuye considerablemente.

### *Recolección:*

La recolección de ambas especies suele realizarse en dos o tres ocasiones al año, dependiendo del manejo del cultivo, el material vegetal empleado y la finalidad de la producción.

En nuestro país, con cultivos de material vegetal poco seleccionado cuyo destino es la obtención de aceites esenciales, se suelen realizar dos recolecciones, una en primavera coincidiendo con la floración, y otra en otoño, solamente de hoja. En cultivos cuyo destino es la producción de hoja se pueden realizar más de dos cortes anuales, normalmente tres. En este caso, es especialmente adecuado el uso de variedades de *S. officinalis* para hoja (en las que la floración es escasa) (Carlen *et al.*, 2005 y Carrion *et al.*, 2003). Este sistema de cultivo es más habitual en países de Centro Europa, donde condicionados por la climatología, la producción se

centra en la primavera y el verano. Si el objetivo es la obtención de semillas, éstas se recolectan en julio.

La recolección puede ser mecanizada, con maquinaria específica o especialmente adaptada. Es muy importante en estos cultivos de larga duración (5-7 años) que la recolección del primer año sea cuidadosa, para no dañar las plantas (Fernández Pola, 2001).

### **1.2.3. Usos.**

El empleo de *S. officinalis* L., hasta ahora, ha sido principalmente como cultivo aromático. Se comercializa la hoja y las sumidades floridas para uso en licorería, condimentaria (embutidos picantes, quesos cremosos, aromatizar sopas, caza y salsas) y fitoterapia. Su aceite esencial se emplea en la industria perfumista (principalmente por su actividad fijadora), en detergentes y en cosméticos (Fernández Pola, 2001; Muñoz, 1987; Tainter y Greinis, 1993). También se emplea para la industria de Fitoterapia, Homeopatía, Dietética y Farmacéutica (Burillo y Prado, 1990). Su uso en jardinería es modesto en la actualidad pero por sus bajos requerimientos hídricos es una especie recomendada para xerojardinería (Pagés, 2000).

En la industria alimentaría se ha aprovechado como conservante, principalmente en carnes, por sus propiedades antioxidantes. En los últimos años son diversos los estudios que se están realizando sobre la actividad antioxidante de esta especie, conferida por la presencia de ácido carnósico, rosmarínico, rosmanol, isorosmanol y carnosol. (Miura, 2002; Lu y Foo, 2001; Munné-Bosh *et al.*, 2001) Esta característica también ha sido descrita para especies como el tomillo, aunque ha sido estudiada principalmente en romero, del que se comercializan en la actualidad extractos desaromatizados como antioxidantes naturales para su uso en la industria alimentaría (Tainter y Greinis, 1993).

*S. lavandulifolia* se emplea en ocasiones para los mismos usos que *S. officinalis*, y en ocasiones incluso indistintamente.

### **1.2.4. Propiedades medicinales.**

A la salvia se le atribuyen tantas virtudes que, en el siglo XIII, una sentencia de la escuela de Salerno expresaba: *Cur moriatur homo cui salvia crescit in horto?* (¿De qué podrá morir el hombre que tiene salvia en el huerto?) (Font Quer, 1990).

El aceite esencial presenta una acción estrogénica, antiséptica, eupéptica y antisudoral; los flavonoides y ácidos fenólicos refuerzan la acción antiséptica, y le confieren una actividad colerética y espasmolítica, anticolinérgica. La picrosalvina, compuesto presente en el aceite, es estimulante del apetito, digestivo y antiséptico. Se la considera además tónico general e

hipoglucemiante. A nivel externo es astringente, debido a la presencia de taninos, cicatrizante, antiséptico y antiinflamatorio (Arteche, 1998).

Los usos tradicionales de *S. lavandulifolia* han estado relacionados con las acciones que se le han atribuido como anticatarral, antidepresiva, antiinflamatoria, antimicrobiana, antiespasmódica, astringente, analgésica, carminativa, desodorante, depurativa, digestiva, entre las más importantes (Sheppard-Hanger, 1994).

En fitoterapia ambas especies se emplean vía oral en el tratamiento de trastornos digestivos, y en uso tópico en enjuagues para higiene bucal (Bruneton, 2001). Más recientemente, los estudios de otras posibles acciones de los extractos de ambas especies, comienzan a dar interesantes frutos en el tratamiento de enfermedades neurológicas cada vez más importantes en nuestra sociedad.

Los resultados de estudios sobre el efecto del aceite esencial y diferentes extractos de *S. lavandulifolia* parecen indicar que pueden ser útiles para el tratamiento del Alzheimer, por su actividad inhibidora de la acetilcolinesterasa (Perry *et al.*, 2001, 2002) y la butirilcolinesterasa (Savelev *et al.*, 2004), consideradas ambas dianas farmacológicas en el tratamiento de esa enfermedad. En la actualidad se están llevando a cabo estudios clínicos en pacientes.

#### **1.2.4. Calidad del producto.**

En la actualidad no existe una norma unificada de las exigencias de calidad en los distintos productos o formas de comercialización de salvia. En las compras de aceites esenciales, el criterio más valorado es la calidad química (Moré y Colom, 2002). Aunque la calidad del producto viene determinada por características físicas y químicas.

Para su uso y comercialización se recomienda que la hoja y las sumidades floridas no contengan más de un 10% de humedad (ASTA, Asociación Americana del Comercio de Especies), y según la farmacopea europea, la droga seca debería contener al menos un 1,5% de aceite esencial, sobre peso seco (Arteche, 1998).

Para su uso en farmacopea los aceites esenciales deben cumplir las normas de calidad internacionales establecidas que determinan los contenidos máximos y mínimos de cada uno de los componentes más importantes en ambas especies, para *S. officinalis* la Norma ISO 9909:1997 y para *S. lavandulifolia* la Norma ISO 3526:1991. En el caso de *S. officinalis*, los mayores inconvenientes para cumplir la normativa, se encuentran en los niveles de tuyonas, compuestos tóxicos que deben oscilar entre 18-43%. Sin embargo, cada cliente, en función de la finalidad del uso de los aceites esenciales, establece sus propias exigencias de calidad. Así,

por ejemplo, la industria perfumista valora en *S. officinalis* perfiles con elevado contenido en tuyonas.

Ante las limitaciones impuestas por la normativa en cuanto al contenido en tuyonas, se han realizado diversos estudios para la obtención de cultivares con aceites esenciales con menores contenidos en estas sustancias. Estos estudios se han realizado en Nueva Zelanda sobre quimiotipos provenientes de la antigua Yugoslavia y Albania (Perry *et al.*, 1996). En Portugal se ha estudiado este aspecto en poblaciones silvestres (Santos-Gomes y Fernández-Ferreira, 2001), diferenciando entre órganos de la planta y se observó que la parte con menor porcentaje de tuyona eran las flores (18%), después las hojas (30%) y, por último, los tallos (50%).

En *Salvia lavandulifolia* el principal inconveniente es el contenido en alcanfor, que debe oscilar entre un 11 y un 25%. El alcanfor es un componente tóxico, por lo que es importante su control ya que es un neurotóxico medio, niveles por encima de los  $5\text{g.kg}^{-1}$  en hoja seca pueden ser peligrosos (Tisserand y Balacs, 1995). Los contenidos en alcanfor varían según el órgano de la planta, siendo menores en las flores y alcanzando mayores valores en hoja. No se han encontrado referencias de contenidos en alcanfor mayores al 25% en las referencias estudiadas (Marcos *et al.*, 1988; Perez Galindo, 2005; Burillo, 2003; Jordán *et al.*, 2007.)

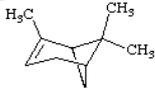
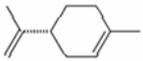
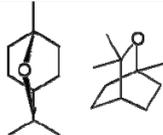
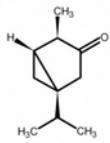
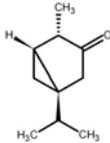
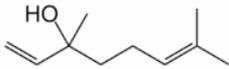
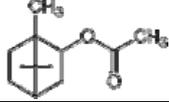
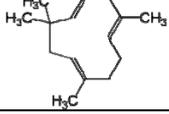
#### **1.2.6.- Composición química de los aceites de *Salvia officinalis* y *S. lavandulifolia*.**

El aceite esencial de *S. officinalis* está compuesto principalmente por monoterpenos: ( $\alpha$ - y  $\beta$ -tuyona, alcanfor, borneol), monoterpenoles, diterpenoides (ácido carnósico, carnosol), triterpenoides (ácido oleanólico), flavonoides (glucósidos de luteolol, apigenol) y ácidos fenólicos (caféico, clorogénico, rosmarínico). Contiene también principios amargos como la picrosalvina (Arteche, 1998). Los compuestos que dictan la calidad del aceite en la farmacopea son diez, cuya tipología, fórmula, peso molecular y estructura se muestran en la Tabla 1.1.

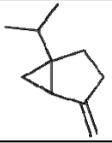
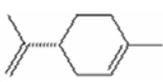
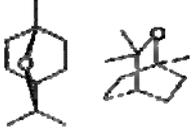
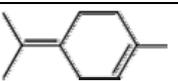
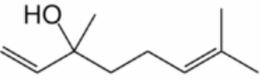
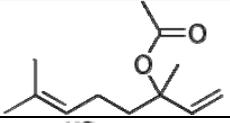
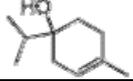
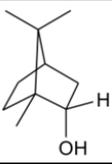
El aceite de *S. lavandulifolia* se compone principalmente por monoterpenos ( $\alpha$ -tuyona,  $\alpha$ - y  $\beta$ -pineno, canfeno, sabineno, mirceno, limoneno, *cis-trans* ocimeno,  $\alpha$ -ocimeno), sesquiterpenos ( $\alpha$ -cubebeno,  $\alpha$ -humuleno,  $\beta$ -cariofileno), hidrocarburos ( $\alpha$ -*p*-dimetilestireno), alcoholes (linalol, terpinen-4ol, sabinol, borneol, geraniol), ésteres (lilalil acetato y bornil acetato), éteres (1,8-cineol) y ketonas (camphor) (Bruneton, 2001). Entre todos ellos los más importantes por ser responsables de la calidad de los aceites se presentan en la Tabla 1.2.

Algunos de los componentes principales de *Salvia officinalis* y *S. lavandulifolia* tienen usos específicos en la industria, por sus cualidades químicas, aromatizantes, fijadoras, etc. (Tabla 1.3).

**Tabla 1.1.- Caracterización de los componentes más importantes del aceite esencial de *S. officinalis***

Componente	Tipología	Formula	Peso molecular g/mol	Molécula
<b><math>\alpha</math>-pineno</b>	hidrocarburo terpénico	$C_{10}H_{16}$	136,23	
<b>canfeno</b>	hidrocarburo terpénico: monoterpene	$C_{10}H_{16}$	136,23	
<b>limoneno</b>	hidrocarburo terpénico monoterpene	$C_{10}H_{16}$	136,23	
<b>1,8-cineol</b>	éter monoterpene	$C_{10}H_{18}O$	154,249	
<b><math>\alpha</math>-tuyona</b>	cetona monoterpene	$C_{10}H_{16}O$	153,23	
<b><math>\beta</math>-tuyona</b>	cetona monoterpene	$C_{10}H_{16}O$	153,23	
<b>alcanfor</b>	cetona	$C_{10}H_{16}O$	152,23	
<b>linalol</b>	alcohol terpénico	$C_{10}H_{18}O$	152,23	
<b>acetato de bornilo</b>	éster	$C_{12}H_{20}O_2$	196,29	
<b><math>\alpha</math>-humuleno</b>	sesquiterpene	$C_{15}H_{24}$	204,36	

**Tabla 1.2.- Caracterización de los componentes más importantes del aceite esencial de *S. lavandulifolia***

Componente	Familia y tipología	Fórmula	Peso molecular (g/mol)	Molécula
<b><math>\alpha</math>-pineno</b>	hidrocarburo terpénico	$C_{10}H_{16}$	136,23	 (+)- $\alpha$ -pinene (-)- $\alpha$ -pinene
<b>canfeno</b>	hidrocarburo terpénico mono terpeno	$C_{10}H_{16}$	136,23	
<b>sabineno</b>	hidrocarburo terpénico monoterpeno	$C_{10}H_{16}$	136,23	
<b>limoneno</b>	hidrocarburo terpénico monoterpeno	$C_{10}H_{16}$	136,23	
<b>1,8-cineol</b>	éter monoterpeno	$C_{10}H_{18}O$	154,249	
<b>terpinoleno</b>	alcohol	$C_{10}H_{16}$	136,23	
<b>alcanfor</b>	cetona	$C_{10}H_{16}O$	152,23	
<b>linalol</b>	alcohol terpénico	$C_{10}H_{18}O$	152,23	
<b>acetato de linalilo</b>	éster	$C_{12}H_{20}O_2$	196,29	
<b>terpinen-4-ol</b>	alcohol		154,25	
<b>borneol</b>	alcohol terpénico	$C_{10}H_{18}O$	154,25	

**Tabla 1.3.- Usos en la industria de algunos de los componentes de *S. officinalis* y *S. lavandulifolia*.**

<b>Componente</b>	<b>Usos industriales</b>
<b><math>\alpha</math>-pineno</b>	- industria farmacéutica - aromatizante artificial
<b>canfeno</b>	- perfumería - aditivo en la comida, aromatizante - combustible de lámparas en el siglo XIX
<b>sabineno</b>	aromatizante y saborizante en comidas y bebidas
<b>limoneno</b>	- cosmética - saborizante - insecticida - disolvente - biocombustible
<b>cineol</b>	- perfumería - aromatizante - cosmética
<b>alcanfor</b>	- plastificante para la nitrocelulosa - pirotecnia - repelente de insectos
<b>linalol</b>	- jabones, detergentes, champús y lociones - reactivo químico intermediario de vitamina E
<b>borneol</b>	- repelente de insectos - medicina china tradicional

La composición química del aceite esencial de ambas especies presenta una variabilidad muy amplia, influenciada por diversos factores como las condiciones de cultivo (altitud, radiación, temperatura,...), el material genético, el estadio fenológico de la planta al momento de cosecha, etc. Las investigaciones son más numerosas en *S. officinalis*, ya que es la especie más extendida en su cultivo. En *S. lavandulifolia* se están incrementando de manera paulatina los estudios sobre la composición química de su aceite especialmente por los recientes trabajos sobre sus utilidades farmacológicas.

Algunos de los factores que modifican la composición química del aceite son genéticos, de manera que aparecen diferencias en los perfiles cromatográficos según variedades, subespecies o poblaciones (Bruneton, 2001). En *S. officinalis*, las variedades más estudiadas son tres: var. *Bona*, variedad Polaca de porte medio (Zawislak y Dyduch, 2006); var. *Extrarka*,

principalmente cultivada en Europa Central (mejorada en Alemania) y la var. *Regula*: mejorada en Suiza, caracterizada por su rusticidad, homogeneidad y calidad, de porte grande (Carron *et al.*, 2005) (Tabla 1.4).

También se han observado modificaciones en la composición del aceite esencial debidas al estadio fenológico de la planta, especialmente el crecimiento vegetativo, la floración, la fructificación, etc. Desde el punto de vista de las recolecciones, las que más nos interesan son las modificaciones que se producen en primavera durante la floración. En este sentido son indicativos los estudios realizados en Polonia por Zawislak y Dyduch (2006) sobre la var. *Bona* y los realizados en Irán sobre variedades autóctonas por el equipo de Mirjalili (2006) (Tabla 1.5), coincidentes en el fuerte efecto de la floración sobre la composición del aceite esencial, especialmente en los componentes mayoritarios: tuyonas, cineol y alcanfor.

**Tabla 1.4.- Norma ISO para el aceite esencial de *S. officinalis* y los perfiles cromatográficos del aceite obtenido de distintas variedades en diferentes países de cultivo (Carron *et al.*, 2005; Zawislak y Dyduch, 2006; Burillo y García Vallejo, 2003).**

Variedad	NORMA ISO	Var. <i>regula</i>	Var. <i>Extrarkta</i>	Var. <i>Bona</i>	Posible var. <i>Extrarkta</i>
<b>Rendimiento ml.kg<sup>-1</sup></b>	1,5	1,75-2,03	1,65-1,72	1,6-1,8	0,31-0,35
<b>Componente</b>	<b>Concentración relativa, %</b>				
<b>α-pineno</b>	1-6,5	1,7-1,8	3,8-3,7	7,3-5,1	5,3-5,9
<b>canfeno</b>	1-5,7	1,8-2	3,4-3,7	1,8-5,9	3-4,3
<b>limoneno</b>	0,5-3	3,9-4,0	4,6-5,4	1,2-1,4	1,2-2,0
<b>cineol</b>	5,5-13	12,2-12,2	11,5-12,9	9,9-14,4	12,2-13,2
<b>α tuyona</b>	18-43	23,7-25,9	15,9-22,0	22,5-27,9	27,5-29,3
<b>β-tuyona</b>	3-8,5	5,3-5,8	3,4-5,3	8,0-15,0	5,6-6,4
<b>alcanfor</b>	4,5-24,5	12,5-12,7	15,4	11,7-24,0	7,7-10,8
<b>linalol</b>	-1	-	-	0,1-0,2	0,2-0,4
<b>acetato de bornilo</b>	-2,5	1,1-1,3	1,5-1,1	0,3-0,6	1,0-1,1
<b>α-humuleno</b>	-12	6,3-7	5,0-6,1	0,3-3,2	3,7-4,7
<b>Lugar de cultivo</b>		Suiza	Suiza	Polonia	Aragón
<b>Origen variedad</b>		Suiza	Alemania	Polonia	Alemania

**Tabla 1.5.- Perfil cromatográfico del aceite esencial de *S. officinalis* en distintos estadios fenológicos (Zawislak y Dyduch, 2006; Mirjalili *et al.*, 2006).**

Estadio fenológico	NORMA ISO	Floración	Vegetativo	Floración	Vegetativo
<b>Rendto ml.kg<sup>-1</sup></b>	1,5	0,9-1,4	1,6-1,8	0,5	0,7
Componente	Concentración relativa, %				
<b>α-pineno</b>	1-6,5	5,3-5,7	5,1-7,3	4,6	2,7
<b>canfeno</b>	1-5,7	0,8-4	1,8-5,9	4,7	3,4
<b>limoneno</b>	0,5-3	0,9-1,2	1,2-1,4	-	-
<b>cineol</b>	5,5-13	16,2-19,4	9,9-14,4	22,3	16,8
<b>α-tuyona</b>	18-43	8,2 - 17,5	22,5 -27,9	9,1	12,8
<b>β-tuyona</b>	3-8,5	3,3-12,0	8,0 -15,0	2,1	1,1
<b>alcanfor</b>	4,5-24,5	2,7-3,3	11,7-24,0	1,6	7,1
<b>linalol</b>	-1	-0,4	0,1-0,2	0,1	-
<b>acetato de bornilo</b>	-2,5	0,4-0,8	0,3-0,6	0,2	0,2
<b>α-humuleno</b>	-12	6,1-7,3	0,3-3,2	8,7	8,2
<b>Lugar de cultivo</b>		Polonia	Polonia	Iran	Iran
<b>Variedad</b>		var. <i>Bona</i>	var. <i>Bona</i>	<i>S.officinalis</i>	<i>S.officinalis</i>

Se han estudiado también las diferencias que se observan en la composición de los aceites con la altitud. En este sentido, Fernandez-Pola (2001) señala un efecto importante de la altitud sobre el rendimiento de *S. officinalis*. En un estudio más detallado, en el que además de la altitud se analizaba la composición química en diferentes momentos Maric *et al.* (2006), observaron las variaciones antes de la floración (enero), en plena floración (mayo) y después de la floración (agosto), en dos localidades a diferentes altitudes (Tabla 1.6).

Las diferencias de composición que se aprecian en los distintos estadios (Tabla 1.6), se deben principalmente a que en cada una de las partes de la planta se producen aceites esenciales con distinta composición química. El aceite de mayor calidad se produce en las flores, siguiendo en calidad el de las hojas y por último el de los tallos. En la Tabla 1.7 se muestran los perfiles que obtuvieron Santos-Gomes y Fernández-Ferreira (2001) para el aceite esencial procedente de distintas partes de un cultivo de *S.officinalis* en el noroeste de Portugal. Estos autores observaron diferencias de composición entre todas las partes estudiadas, y en todos los

componentes que dictan la calidad del aceite esencial, especialmente en los mayoritarios: tuyonas, cineol y alcanfor.

**Tabla 1.6.- Perfil cromatográfico del aceite esencial de *S. officinalis* a distintas altitudes y épocas del año (Maric *et al.*, 2006).**

Altitud		110m	400m
Fecha	NORMA ISO	Ene/May/Abr	Ene/May/Abr
Rendimiento ml.kg <sup>-1</sup>	1.5	0,54/0,29/0,64	0,84/0,45/1,07
Componente		Concentración relativa, %	
<b>α-pineno</b>	1-6,5	-/-/1,0	0,6/7,5/2,0
<b>canfeno</b>	1-5,7	3,3/1,2/0,0	4,3/2,5/0,0
<b>limoneno</b>	0,5-3	-	-
<b>cineol</b>	5,5-13	8,6/9,2/9,6	9,5/12,7/10,6
<b>α tuyona</b>	18-43	28,3/9,3/23,9	35,6/13,6/21,0
<b>β tuyona</b>	3-8,5	4,0/1,6/1,2	1,8/2,1/0,0
<b>alcanfor</b>	4,5-24,5	16,8/6,9/29,1	13,8/12,0/29,1
<b>linalol</b>	-1	-	-
<b>acetato de bornilo</b>	-2,5	0,2/1,2/1,7	0,4/1,7/3,1
<b>α humuleno</b>	-12	6,5/10,2/4,2	5,1/9,6/3,1

**Tabla 1.7.- Perfil cromatográfico de distintas partes de la planta de *S. officinalis* (Santos-Gomes y Fernández-Ferreira, 2001).**

Parte de la planta	NORMA ISO	Flores	Tallos	Hojas
Componente		Concentración relativa, %		
<b>α-pineno</b>	1-6,5	5,6	1,0	4,2
<b>canfeno</b>	1-5,7	4,9	1,0	2,6
<b>limoneno</b>	0,5-3	0,2	0,8	1,6
<b>cineol</b>	5,5-13	17,3	2,0	6,5
<b>α tuyona</b>	18-43	17,7	55,1	25,5
<b>β tuyona</b>	3-8,5	3,4	6,7	3,9
<b>alcanfor</b>	4,5-24,5	3,5	5,6	19,5
<b>acetato de bornilo</b>	-2,5	1,7	0,7	1,2
<b>α humuleno</b>	-12	4,3	5,2	7,5

En *Salvia lavandulifolia* la mayor parte de los estudios se centran en la composición química de diferentes poblaciones y subespecies. Cada una de las subespecies estudiadas mostraban diferencias en sus perfiles cromatográficos y dentro de las mismas subespecies existía también una gran variabilidad. Todos los estudios consultados coinciden en la elevada variabilidad intraespecífica en *S. lavandulifolia* (Marcos *et al.*, 1988; Perez Galindo, 2005; Burillo, 2003; Jordán *et al.*; 2007) (Tabla 1.8). En la Tabla 1.8 se comparan diferentes subespecies analizadas por distintos autores. Entre las distintas subespecies de *S. lavandulifolia* se hace referencia a las spp. *vellerea* y *blancoana* (Perez Galindo, 2005), spp. *oxydon* (Rivas Goday y Rivas Martínez, 2005) y varios ecotipos locales de la zona de Aragón, que podrían pertenecer a la spp. *lavandulifolia* (Burillo y García, 2003) (Tabla 1.8).

Esta variabilidad en la composición de los aceites esenciales también se pone de manifiesto en un interesante estudio presentado recientemente por Jordán (2007) y Sotomayor (2004) sobre diferentes poblaciones naturales del sudeste peninsular en las que se observaron variaciones importantes en rendimiento y en composición de los aceites en diferentes poblaciones pertenecientes a la subespecie *vellerea* situadas a distintas altitudes (entre 800 y 1.500 m) (Tabla 1.9).

**Tabla 1.8.- Perfiles cromatográfico de varias subespecies de *Salvia lavandulifolia***  
(Marcos *et al.*, 1988; Perez Galindo, 2005; Burillo, 2003).

subespecies	NORMA ISO	<i>vellerea</i> (Q-1)	<i>vellerea</i> (Q-2)	<i>blancoana</i>	<i>oxydon</i>	<i>lavandulifolia</i>
<b>Componente</b>	<b>Concentración relativa, %</b>					
<b><math>\alpha</math>-Pino</b>	4-11	4,0-16	2,4-10,1	5,0-6,3	15,6	4,7-17,4
<b>Canfeno</b>	-	5,3-17,2	2,4-9,8	0,6-48,4	10,1	4,1-7,8
<b>Sabineno</b>	0,1-3	0-1,2	0,6-5,8	-	0,77	0-0,3
<b>Limoneno</b>	2-5	1,8-4,0	1,6-3,8	2,8-5,0	4,44	4,0-7,7
<b>Cineol</b>	11-25	6,1-31,2	1,2-26,6	2,3-5,0	5,53	6,8-25,4
<b>Alcanfor</b>	11-36	21,0-37,5	6,3-30,1	0,3-9,2	23,67	16,6-34,2
<b>Linalol</b>	0,5-9	-	-	-	0,93	0,3-0,6
<b>Linalil acetato</b>	<5	-	-	-	-	0,1-0,6
<b>1 Terpinen 4 ol</b>	<2	0,2-2,5	0,2-1,1	0,3-0,9	0,97	0,4-3,3
<b>Borneol</b>	1-8	2,3-11	-	0,6-1,3	4,45	1,7-6,5

**Tabla 1.9.- Perfil cromatográfico de *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea* recolectada en diferentes poblaciones (Jordán *et al.* 2007).**

<b>Lugar de cultivo</b>	<b>NORMA ISO</b>	<b>Revolcadores</b>	<b>C. Barranco</b>	<b>La Rogativa</b>	<b>Reolid</b>	<b>Hellin</b>
<b>Rendto ml.kg-1</b>		1,7	3,2	2	4,7	5,8
<b>Componente</b>	<b>Concentración relativa, %</b>					
<b>α Pineno</b>	4-11	4,8	2,7	3,4	2,8	3,4
<b>Canfeno</b>	-	6,4	3,8	6,5	4,0	3,5
<b>Limoneno</b>	2-5	4,4	2,5	1,8	0,7	0,8
<b>Cineol</b>	11-25	16,8	17,1	18,7	36,9	40,7
<b>Alcanfor</b>	11-36	31,2	23,7	32,7	31,0	23,9
<b>Linalol</b>	0.5-9	0,4	7,5	0,2	0,1	0,3
<b>Linalil acetato</b>	<5	-	15,3	-	-	-
<b>1 Terpinen 4 ol</b>	<2	0,8	0,5	0,8	1,0	1,1
<b>Borneol</b>	1-8	2,9	2,8	3,4	3,6	2,3

### 1.3. Concepto de estrés hídrico.

El estrés hídrico se puede definir como el estado en el cual la demanda de agua por la planta supera a la capacidad de suministro por las raíces. La demanda de agua está determinada por la transpiración, fenómeno dependiente de variables físicas como radiación, temperatura y humedad relativa. Estas condiciones de estrés se dan, por tanto bajo condiciones de baja disponibilidad de agua en el suelo o bien de alta demanda evaporativa (altas temperaturas, muy baja humedad relativa del aire). En un estrés hídrico al que puede estar sometida la planta se produce una desestabilización inicial de las funciones, seguida de un proceso de adaptación y de normalización y una mejora de la resistencia a esas condiciones adversas. Sin embargo, si se exceden los límites de la tolerancia y se sobrepasa la capacidad de aclimatación, el resultado puede ser un daño permanente o incluso la muerte. A esta definición habría que añadirle el concepto de regeneración, esto es, la capacidad de la planta para volver al estado original cuando ha cesado el agente estresante (Lichtenthaler, 1996).

Los factores que pueden causar estrés sobre la vegetación terrestre se pueden clasificar como sigue (Lichtenthaler, 1996):

#### 1.- Factores naturales abióticos:

- Radiación (deficiencia o exceso).
- Temperatura (deficiencia o exceso).
- Agua (deficiencia o exceso).
- Naturaleza química: salinidad, deficiencias/excesos minerales, pH, ozono, etc.
- Otros: heridas, viento, presión, etc.

#### 2.- Factores naturales bióticos:

- Patógenos: virus, hongos y bacterias.
- Animales: pastoreo, pisoteo, insectos.
- Otras plantas: parasitismo, alelopatía, competencia.

#### 3.- Factores antropogénicos (inducidos por la actividad humana):

- Polución atmosférica.
- Contaminación de suelos y aguas.
- Compactación, salinización y desecación de suelos.

Desde un punto de vista ecofisiológico, se entiende por estrés hídrico cualquier limitación al funcionamiento óptimo de la planta impuesta por una insuficiente disponibilidad de agua. El estrés hídrico es el factor ambiental que más limita la producción agrícola a escala mundial. Existe una elevada correlación entre la productividad de los diferentes ecosistemas y su precipitación característica (Lambers *et al.*, 1987). A escala mundial, se estima que el rendimiento potencial de los cultivos se reduce en más del 70% debido a las limitaciones ambientales. De ese porcentaje, el estrés hídrico puede constituir hasta un 45% (Boyer, 1982). Este hecho resulta de especial relevancia en condiciones de climas árido y semiárido, los cuales abundan en España. Durante un período de 5 años se han estudiado los niveles de estrés hídrico de la vegetación del territorio andaluz mediante las imágenes del satélite NOAA14-AVHRR. Los datos demuestran que en Andalucía los mayores niveles de estrés hídrico en la vegetación natural y cultivada se observan durante los meses de julio, agosto y septiembre (Informe de Medio Ambiente en Andalucía, 1996).

Puesto que el agua tiene un papel esencial en la fisiología de las plantas, el estrés hídrico afecta a la mayor parte de sus funciones vitales. Así, por citar algunos ejemplos, en condiciones de sequía disminuye la capacidad de germinación de las semillas, se reduce la absorción de nutrientes minerales y la producción de grano y frutos, y en algunos casos aumenta la predisposición de las plantas a sufrir enfermedades.

La selección de especies y biotipos resistentes a la sequía, y una estimación exhaustiva de las necesidades hídricas de éstas, pueden suponer una importante disminución de las necesidades de riego de nuestros cultivos y jardines. El estudio del comportamiento agronómico de las especies de interés etnobotánico, pertenecientes a la flora autóctona de nuestra región, tiene un gran interés para el sector, ya que esto nos permite la adecuación de las técnicas de cultivo y sistemas de producción a emplear en su cultivo (Cermeño *et al.*, 2002). Varios trabajos enfocados en este sentido demuestran que la disminución en las dosis de riego sigue permitiendo la obtención de producciones aceptables económica y técnicamente en algunas especies. La aplicación del riego basado en la evapotranspiración potencial en *Rhododendron* cultivar Hoppy demuestra que se puede reducir hasta un 50% durante un período de 8 semanas sin que esto afecte de forma significativa al desarrollo de la planta. Estos resultados tienen importantes implicaciones de cara a un menor consumo de agua en los viveros comerciales, minimiza las necesidades de determinadas labores intensivas, como la poda para mantener las plantas con calidad y buen aspecto (Cameron *et al.*, 1999).

**Figura 1.1. Sensibilidad de diversos procesos fisiológicos de las plantas al estrés hídrico.**

Proceso o parámetro afectado	Sensibilidad al estrés		
	Muy sensible		Relativamente insensible
	$\Psi_h$ del tejido que afecta al proceso		
	0 MPa	-1.0 MPa	-2.0 MPa
Crecimiento celular (-)	Shaded	Shaded	White
Síntesis de pared (-)	White	Shaded	White
Síntesis de proteínas (-)	Shaded	Shaded	White
Formación de protoclorofila (-)	White	Shaded	White
Nivel de nitrato reductasa (-)	White	Shaded	White
Acumulación de ABA (+)	White	Shaded	White
Nivel de citoquininas	White	Shaded	White
Apertura estomática (-)	White	Shaded	White
Asimilación de CO <sub>2</sub> (-)	White	Shaded	White
Respiración (-)	White	Shaded	White
Acumulación de prolina (+)	White	Shaded	White
Acumulación de azúcares (+)	White	Shaded	White

Estudios realizados sobre algunas especies ornamentales de los géneros *Viburnum*, *Laurus* y *Berberis* muestran que una disminución del aporte hídrico de un 25%, sobre la evapotranspiración potencial estimada, no produce efectos significativos sobre su desarrollo (Mori *et al.*, 1995).

### 1.3.1. Efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento y desarrollo.

Como se ha indicado anteriormente (Fig. 1.1), el efecto más inmediato de un estrés hídrico suave es la reducción del crecimiento (Mohr y Schopfer, 1995). La expansión celular es muy sensible al estrés, un descenso externo del potencial hídrico de solo  $-0,1$  MPa (a veces menos) puede producir ya un descenso perceptible en el crecimiento (Salisbury y Ross, 1991). La base de esta disminución es, en primera instancia, puramente física, como consecuencia de la disminución de la presión de turgencia celular, fuerza necesaria para la expansión celular.

La suspensión del riego reduce la expansión foliar, el crecimiento del tallo y de las raíces, y cuando el déficit es severo se acelera la senescencia de hojas maduras (Parra *et al.*,

1999). El descenso en la tasa de crecimiento constituye una adaptación de las especies a la sequía, por medio de la cual reducen el área foliar y la superficie evaporativa mientras exista poca disponibilidad de agua en la rizosfera (Schulze, 1986). Los efectos más significativos de la menor disponibilidad hídrica a nivel morfológico son reducción de la altura de planta, diámetro del cuello, biomasa, etc., cambios que se observan tanto en especies herbáceas como leñosas (Mori *et al.*, 1995; Farooqi *et al.*, 1998). Esta disminución en parámetros de crecimiento también se ha observado en *Mentha piperita*, cultivo en el que por efecto del déficit hídrico se reduce la longitud de los entrenudos, la altura de la planta y la relación raíz/estolón (Alkire *et al.*, 1993).

En las plantas de interés aromático el estrés hídrico induce, además, alteraciones en la acumulación de aceites esenciales, principalmente como consecuencia de los efectos en el crecimiento y diferenciación de la planta. Algunos autores han sugerido que bajo estas condiciones aumenta la densidad de las glándulas, debido a una reducción del área foliar, produciendo un aumento de la acumulación de aceite esencial (Singh-Sanghman *et al.*, 1994).

En cuanto al desarrollo, el estrés hídrico produce en algunas especies retrasos en la diferenciación y en otras, principalmente en anuales, una aceleración de los procesos reproductivos (Fischer y Turner, 1978). Este efecto permite usar al riego deficitario como una técnica de cultivo con la que poder controlar la floración de algunas especies. Ensayos sobre rosas cultivar *Madelon*, para cultivo en maceta, muestran que el estrés hídrico aplicado en período vegetativo produce un retraso en el desarrollo, pero no tiene efectos negativos sobre los botones ni los vástagos florales, y aplicado después de la formación de los estambres o carpelos no tiene efecto negativo sobre la calidad de las flores producidas (Chimonidou-Pavlidou, 1996).

### **1.3.2. Efectos del estrés hídrico sobre el estado hídrico de la planta.**

El déficit hídrico altera los parámetros hídricos de la hoja y por ello, los métodos habituales para estudiar el estado hídrico de la planta consisten en determinar en las hojas el contenido hídrico relativo (RWC), el potencial hídrico ( $\Psi_h$ ) y sus componentes (potencial osmótico,  $\Psi_o$  y potencial de turgencia,  $\Psi_p$ ).

Es posible establecer una gradación en la sensibilidad de diferentes procesos fisiológicos al estrés hídrico, definido por el potencial hídrico del tejido (Hsiao, 1973).

La determinación del potencial hídrico mediante la medida de la presión xilemática es un buen indicador del estado hídrico de la planta (Ferreyra *et al.*, 2001). El potencial hídrico medido al mediodía solar está influenciado por las condiciones climáticas, y suele ser el más

bajo con la máxima iluminación diurna. Especies arbustivas mediterráneas como *Lavandula pedunculata*, *Thymus zygis*, *Genista hirsuta* y *Halimium viscosum* alcanzan valores de potencial hídrico del orden de  $-6$  MPa durante el verano (Lansac *et al.*, 1994). En salvia, Scholander *et al.* (1965), registraron datos de potencial al mediodía en torno a  $-2,5$  y  $-3$  MPa en medidas realizadas en zonas áridas.

La relación entre el contenido de agua de un tejido y su potencial hídrico depende del tipo de tejido y de su estado hídrico. Por ello, disponer de relaciones entre estas dos variables revela informaciones valiosas acerca de las características hídricas del tejido estudiado. El diagrama de Hoffer y la curva de Presión-Volumen (P-V) representan estas relaciones a escala celular y de tejido u órgano vegetal. En algunas especies como *Rosmarinus officinalis*, el contenido hídrico relativo foliar se relaciona con el potencial hídrico, aunque con una gran variabilidad (Ferrández *et al.*, 2003).

El ajuste osmótico es un mecanismo de adaptación que contribuye a la tolerancia al estrés hídrico y consiste en la habilidad de las plantas para sintetizar solutos compatibles de bajo peso molecular que se acumulan en grandes concentraciones sin afectar al metabolismo celular. Este mecanismo permite reducir el potencial osmótico para mantener la absorción de agua y el potencial de turgencia alto y, por tanto, la continuación del crecimiento. Además, facilita conductancias estomáticas más altas a potenciales hídricos más bajos (Turner y Jones, 1980; Parra, 1999; Morgan, 1984). En general el límite de ajuste osmótico varía con las especies, pero puede estar entorno a  $-2$  MPa (Hanson y Hitz, 1982).

### **1.3.3. Efectos del estrés hídrico sobre la fotosíntesis.**

En el modelo generalmente aceptado, la limitación inicial de la fotosíntesis foliar en situaciones de estrés hídrico, es esencialmente estomática y no afecta a la capacidad fotosintética de la hoja (Medrano *et al.*, 2002). La asimilación disminuye al descender la concentración intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) al reducirse la conductancia estomática. El cierre estomático es inicialmente hidropasivo cuando disminuye el contenido hídrico relativo de la hoja. Después es hidroactivo, al entrar en acción el control estomático mediado por el ácido abscísico si la situación de déficit continúa. Si la situación de estrés continúa, además de la limitación estomática, puede ponerse en evidencia una limitación metabólica que sí afecta a la capacidad fotosintética debido a alteraciones en el funcionamiento del cloroplasto. Estudios más recientes sugieren que este modelo no es general puesto que existen diferencias significativas en el comportamiento foliar en distintos tipos de mesofitas  $C_3$  (Lawlor y Cornic, 2002). Mientras que en unas especies se observa que la capacidad fotosintética (limitación

metabólica) no se afecta hasta que el contenido hídrico relativo se reduce en 25-30%, en otras, este tipo de limitación se pueden poner en evidencia ante descensos mínimos en el RWC. Esta discrepancia podría ser un reflejo de la diferente capacidad de tolerancia y adaptación a la sequía en distintas especies.

En *Nerium oleander* L., la resistencia estomática y la transpiración son los procesos más afectados por sucesos rápidos de estrés hídrico (Mugnai *et al.*, 1995). De igual modo sucede en otras especies ornamentales arbustivas, como es el caso de *Rudbeckia triloba* y *Eupatorium rugosum* (Prevete *et al.*, 2000). La sequía también puede reducir el número de estomas reduciendo el desarrollo de las plantas (Nowak, 2002). El estrés oxidativo sobre los cloroplastos por las condiciones de sequía es el responsable de la disminución en las tasas fotosintéticas de *Salvia officinalis* L., y da lugar posteriormente a una severa senescencia foliar que puede alcanzar hasta el 53% de la biomasa total de la planta (Munné-Bosh *et al.*, 2001).

En especies aromáticas como la menta japonesa (*Mentha arvensis* L.), la tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> disminuye significativamente bajo condiciones de estrés hídrico, de igual modo que el área de asimilación total, la materia fresca y seca foliar y el contenido en clorofila y carotenoides (Misra, 2000).

#### **1.3.4. Efecto del estrés hídrico en la eficiencia del uso del agua.**

Entre los mecanismos más sensibles al déficit hídrico se encuentra el de apertura y cierre de estomas en las hojas, que gobiernan en gran medida la economía de agua de la planta, y como se vio en el apartado anterior, afectan también la actividad fotosintética, al limitar el acceso del CO<sub>2</sub> a la cámara subestomática. El concepto de eficiencia en el uso (EUA) del agua puede aplicarse a nivel de hoja, determinándose como la relación entre el carbono asimilado fotosintéticamente y el agua transpirada por la hoja, o bien a nivel de cultivo, como relación la producción de biomasa seca o el rendimiento por unidad de agua empleada en su producción (Turner, 1986; Ludlow y Muchow, 1990). Las diferencias de EUA entre especies están relacionadas con el sistema de fijación de CO<sub>2</sub> (EUA plantas C4 >> EUA plantas C3) y también con el tipo de cultivo, según la cantidad de energía necesaria para producir reservas de proteína, grasas e hidratos de carbono (Turner, 2004).

El déficit hídrico puede incrementar la EUAi al producir cierre estomático pero sólo hasta el punto en que la reducción en la concentración de CO<sub>2</sub> subestomático u otros factores (aumento de temperatura por reducción de la transpiración) puedan limitar la actividad fotosintética. Condiciones de estrés más intensas producen una disminución en la EUAi por la inhibición de la fijación de CO<sub>2</sub> y el posterior daño sobre la maquinaria fotosintética. A nivel de

hoja, la humedad atmosférica es el principal factor que afecta la EUAi: un incremento del déficit de presión de vapor del aire (aumento de temperatura, disminución de la HR) alrededor de la hoja incrementa la transpiración sin un aumento paralelo de la fotosíntesis por lo que la EUAi disminuye (Turner, 2004).

Desde el punto de vista agronómico, en regiones áridas o semiáridas, es interesante considerar la medida de la EUA para optimizar el uso del agua disponible en la producción, ya empleando cultivos de mayor EUA o bien utilizando estrategias para optimizarla en el cultivo. La determinación de EUA en cultivos no considera ni el agua perdida por evaporación desde el suelo ni la biomasa acumulada en raíces. Para la EUA a nivel foliar se ha acuñado el término de eficiencia transpiratoria o EUA instantánea (EUAi), en el que conceptualmente, se mide la cantidad de carbono fijado por mol de agua perdida en transpiración en un momento determinado del ciclo del cultivo (Turner, 1986). A nivel de cultivo, la EUA depende no sólo de la EUAi sino de la evaporación de agua del suelo y factores que cambian la eficiencia con la que el agua se emplea para la producción, como la fecha de siembra, precocidad, fertilización, ataques de patógenos o insectos, adventicias, etc. (Taylor *et al.*, 1983; Turner, 1986). La mejora de la productividad de los cultivo en zonas en las que el agua es un factor limitante debería efectuarse intentando seleccionar genotipos con el objeto de incrementar la EUAi (Condon *et al.*, 2004).

### **1.3.5. Efectos del estrés hídrico sobre la producción de aceites esenciales.**

Es imprescindible, en el caso de cultivos aromáticos, estudiar las variaciones que sufre la producción de aceite esencial por efecto del déficit hídrico, así como las variaciones en su composición. El estrés induce alteraciones en la acumulación de los aceites esenciales debidos a los efectos sobre el crecimiento y la diferenciación de la planta (ver apartado 1.2.6, Fig. 1.5; Singh-Sanghwan, 1994). El aumento de la producción de aceites esenciales o resinas ante situaciones de restricciones ambientales moderadas se ha relacionado con el incremento de la reserva de carbohidratos provenientes de la fotosíntesis disponibles para la síntesis de metabolitos secundarios y de reserva, como ocurre en *Grandelia chilensis* bajo temperaturas elevadas (Wasner y Ravetta, 2005).

En algunas especies se produce un incremento en el rendimiento porcentual del aceite esencial por unidad de biomasa y en otras un descenso. En cualquier caso cuando el rendimiento se expresa por área, éste suele disminuir, por el descenso que ocasiona el estrés hídrico en la producción de biomasa. De manera que, a pesar de que se produzca un aumento

en el contenido en aceites esenciales por planta, la producción y composición de aceite esencial por unidad de superficie suele disminuir con la sequía.

En *Mentha arvensis* se ha observado una disminución significativa en el rendimiento de aceite esencial (Misra y Srivastaba, 2000), y del mismo modo en otras especies como *Cymbopogon winterianus* y *C. martinii*. En éstas, el estrés hídrico produce descensos en el rendimiento en aceite a nivel de hoja y planta completa (Fatima *et al.*, 1999, 2000). Sin embargo, algunos autores han sugerido que bajo condiciones de estrés aumenta la densidad de las glándulas debido a la reducción en el área foliar, produciendo un aumento de la acumulación de aceite esencial (Sing-Sanghwan, 1994). Este comportamiento se ha observado en *Thymus zygis* subsp. *gracilis*, en el que el riego al cultivo de esta especie produce una disminución del rendimiento de aceite esencial por unidad de biomasa, alcanzándose la máxima producción con un aporte hídrico del 30% de ETo y el mínimo con un aporte del 63% de la ETo. Considerando que el crecimiento de la planta disminuye significativamente con el déficit hídrico, cuando se analiza el rendimiento en aceite esencial por superficie de cultivo es necesario llegar a un compromiso entre la producción por superficie de cultivo y el rendimiento por unidad de biomasa, que en el caso de esta especie se alcanzaba con un 44% de ETo (Sotomayor *et al.*, 2004). Del mismo modo es necesario el estudio de la composición de aceite esencial. En el caso antes mencionado, los mayores niveles de timol, el componente más valorado del aceite de *T. zygis* subsp. *gracilis*, se alcanzan en los tratamientos de riego más deficitarios (Sotomayor *et al.*, 2004).

#### 1.4.- Objetivos del estudio

El agua es un bien escaso en muchas zonas de nuestra región, donde el régimen de precipitaciones es muy bajo, y el volumen de agua disponible para el aprovechamiento agrícola es muy limitado. Por ello el uso racional de los recursos hídricos debe ser un criterio fundamental en la implantación de nuevos cultivos. La selección de especies es necesario que se realice en función de criterios de alta eficiencia hídrica.

En los últimos años ha aumentado considerablemente la demanda de plantas aromáticas y medicinales (PAM) y los productos derivados de éstas. Cada día se valoran más los extractos naturales sobre los producidos de forma sintética. Las utilidades de estas plantas van en aumento: planta fresca para condimentaría, plantas autóctonas para la conservación del suelo, en jardinería, especialmente en xerojardinería, etc. Todo esto hace que la superficie dedicada al cultivo de PAM comience a ser considerable como se ha señalado con anterioridad.

*Salvia* es un género con potencial comercial en el sector, y los estudios realizados al respecto sitúan a *Salvia officinalis* y *S. lavandulifolia* entre las especies más solicitadas en el futuro más próximo dentro de las PAM. España es importador neto de esta especie, de manera que es interesante el estudio y puesta a punto de su cultivo en nuestra región por su posible repercusión en el sector.

Ambas especies, habitan en una parte importante del territorio peninsular, incluida Andalucía. Con este trabajo se estudiará el comportamiento de la especie en condiciones climáticas extremas, como lo son las del verano de la Vega del Guadalquivir.

Los objetivos que se pretenden son:

- Estudiar la respuesta fisiológica de *Salvia. officinalis* L y *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea* (Cuatrec.) Rivas Goday & Rivas Martínez ante diferentes niveles de déficit hídrico.
- Determinar el efecto del estrés hídrico en la producción de ambas especies.
- Analizar las variaciones en la composición y calidad de los aceites esenciales de las dos salvias bajo condiciones de estrés hídrico.
- Estudiar las relaciones existentes entre diferentes parámetros fisiológicos y productivos para sugerir posibles indicadores que permitan la optimización del uso del agua en el cultivo.



# MATERIAL Y MÉTODOS





El presente estudio se llevó a cabo en parcelas experimentales situadas en el Centro de Investigación y Formación Agraria de “Las Torres-Tomejil”, perteneciente al IFAPA, de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía (Alcalá del Río, Sevilla).

## 2.1. Obtención de planta

El material vegetal se obtuvo a partir de semillas de plantas silvestres de las dos especies objeto de estudio: *Salvia officinalis* L. y *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea* (Cuatrec.) Rivas Goday & Rivas Martínez, proporcionadas por una empresa comercial. Estas semillas fueron recolectadas en poblaciones naturales, *S. officinalis* en la provincia de Toledo, en el año 2002 y *S. lavandulifolia* en la provincia de Granada en el mismo año. En el caso de las semillas de *S. lavandulifolia*, éstas provendrían de una población en la que convivían dos variedades de *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea*, var. *lagascana* y var. *vellerea* ya que las plantas obtenidas presentaban caracteres morfológicos de ambas variedades.

La fase de vivero se realizó en un invernadero, con control de temperatura, (25/15°C, día/noche). Las siembras de *S. officinalis* y *S. lavandulifolia* se realizaron el 4 de febrero de 2003 y el 15 de enero de 2005 respectivamente, en bandejas de polietileno, tipo forestal, con alvéolos de 150 cm<sup>3</sup> de capacidad. El sustrato empleado para la obtención de planta fue una mezcla de turba rubia y negra (1:1).

En la fase de germinación para asegurar la nascencia se mantuvo la humedad del sustrato por capilaridad.

*Salvia lavandulifolia* recibió un tratamiento de pregerminación con GA<sub>3</sub> (500 ppm) (Cermeño *et al.* 2006). El porcentaje de germinación alcanzado fue muy alto considerando que se trataba de semillas silvestres (Tabla 2.1). Durante esta fase se realizaron tratamientos fitosanitarios preventivos y de control para evitar el deterioro de las últimas hojas desarrolladas. Preventivos: Tiram (500 cm<sup>3</sup> . hl<sup>-1</sup>) en la siembra y Benomilo (100 g .hl<sup>-1</sup>). Tratamiento para el control de *Bemisia tabaci* (Mosca Blanca), con Diazinon (75 cm<sup>3</sup> . hl<sup>-1</sup>).

Cuando el 60% de las plantas alcanzaron el quinto par de hojas completamente expandidas, se trasplantaron a la parcela de ensayo.

**Tabla 2.1. Germinación.**

	<i>S. officinalis</i>	<i>S. lavandulifolia</i>
Germinación a los 21 días, %	80	60
Duración fase de vivero, días	66	110

## 2.2.- Cultivo

### 2.2.1. Características de la parcela de cultivo

La parcela de cultivo en la que se realizaron los ensayos está situada en los campos de experimentación del Centro Las Torres-Tomejil, a orillas del Río Guadalquivir, a su paso por Alcalá del Río.

El clima se caracteriza por ser semiárido, con un moderado exceso de humedad en invierno y mesotérmico (según clasificación de Thornthwaite) o mesomediterráneo atenuado (clasificación bioclimática Unesco-Fao) (González, 2003).

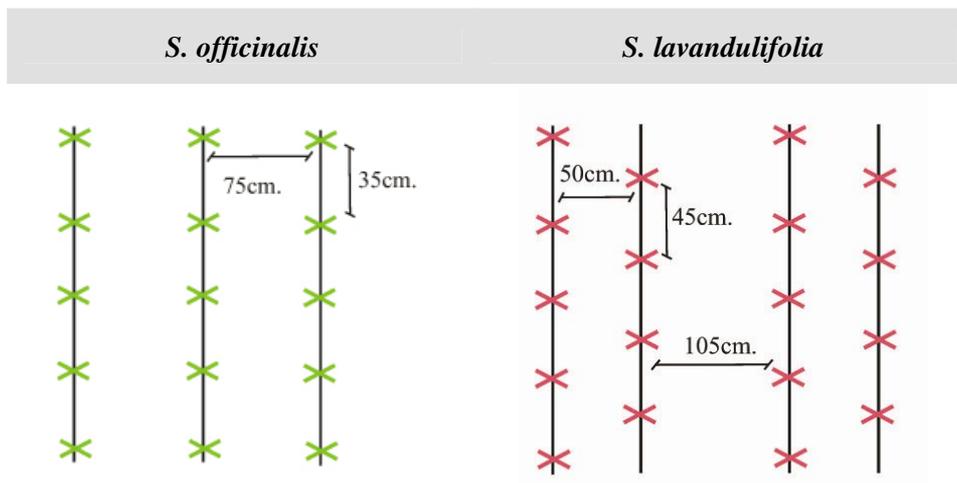
El suelo de la parcela tenía una textura franco limosa (clasificación USDA), con un contenido medio en arcillas de 25%, en limo de 45% y en arena de 28%. La conductividad eléctrica (CE) era de  $0,22 \text{ dS.m}^{-1}$  y el contenido en materia orgánica total de 2,26%, (0,96% de materia orgánica oxidable), capacidad de intercambio catiónico (CIC) de  $11,15 \text{ meq/100}$ , según datos suministrados por el Departamento de Suelos y Riegos (Centro Las Torres-Tomejil).

El agua de riego tuvo una CE media a lo largo de los meses de ensayo de  $1,9 \text{ dS.m}^{-1}$  y un pH de 7.

### 2.2.2. Plantación

La plantación de *Salvia officinalis* se realizó el día 11 de abril de 2004 con una densidad de plantación de  $4,4 \text{ plantas.m}^{-2}$  con una distancia entre plantas de 35 cm y de 75 cm entre líneas. La distancia entre las parcelas fue de 1,5 m. El experimento estuvo constituido por 20 parcelas, distribuidas en cuatro bloques (5 parcelas por bloque). Cada parcela elemental constó de 36 plantas.

Figura 2.1.- Croquis de cada parcela de cultivo.

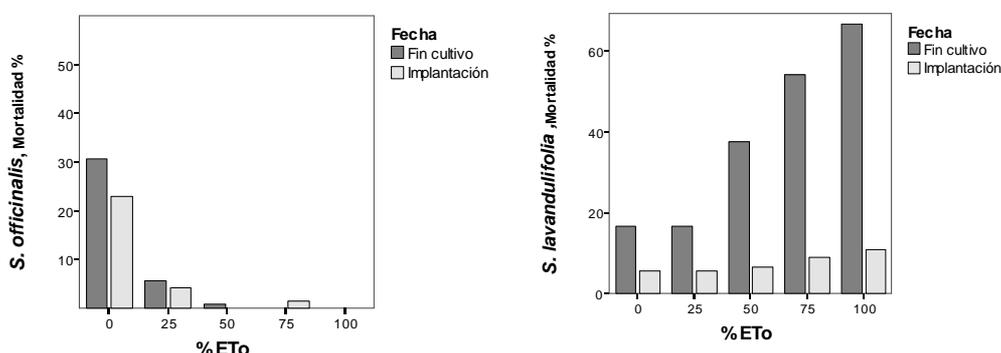


Durante la fase de adaptación del cultivo (50 días) el aporte hídrico fue del 100% de la evapotranspiración (ET<sub>o</sub>), desde el 11 de abril al 1 de junio de 2003, durante el que se aplicaron 200,2 mm.

La plantación de *Salvia lavandulifolia* subsp. *vellerea* se realizó el día 15 de mayo de 2005 con una densidad de plantación de 3 plantas.m<sup>-2</sup>, dispuestas en líneas pareadas, con una distancia entre plantas de 45-50 cm y de 105 cm entre líneas pareadas. La distancia entre las parcelas fue de 1,5 m como en el caso anterior el cultivo estaba distribuido en 20 parcelas, repartidas en cuatro bloques (5 parcelas por bloque). Cada parcela elemental constó de 46 plantas.

Se realizó un riego de implantación durante 20 días en el que se aplicó el 100% de la ET<sub>o</sub>, 106,1 mm, hasta el comienzo de los tratamientos de riego.

En la figura 2.2 se presenta la evolución de la mortalidad y supervivencia de las plantas de *S. officinalis* y *S. lavandulifolia* desde el inicio de la plantación hasta el final de los ensayos.



**Figura 2.2.- Mortalidad al inicio de la plantación (implantación) y al final del estudio (fin de cultivo).**

### Preparación del terreno

En ambos casos la preparación del terreno se llevó a cabo mediante laboreo con arado en los primeros 30 cm y posterior pase superficial de un grada de discos.

La fertilización se realizó en forma de abonado de fondo, mediante la aplicación de 80 unidades fertilizantes, con un compuesto NPK 15:15:15 (Muñoz, 1987; Fernández-Pola, 2001). Se realizó aportación en cobertera sólo después de las recolecciones de otoño, para evitar la interacción que ésta pudiera tener con los diferentes tratamientos de riego si se realizaba en

primavera o verano, época en que las precipitaciones en la zona son habitualmente muy escasas. Estas aportaciones adicionales fueron de 50 u.f. con el mismo complejo fertilizante.

### **2.2.3. Plantas adventicias en el cultivo**

Se controlaron las plantas adventicias en los cultivos, mediante escarda manual, para evitar la competencia que pudieran ocasionar éstas con los diferentes tratamientos de riego aplicados. Las especies adventicias que compitieron con los cultivos en primavera fueron: *Cyperus rotundus* L., *Cynodon dactylon* L., *Urtica dioica* L., *Anagallis arvensis* L., *Portulaca oleracea* L., *Lamium amplexicaule* L., *Convolvulus arvensis* L., *Fumaria officinalis* L.. En el verano, las adventicias habituales fueron: *Convolvulus arvensis* L., *Heliotropo spp.*, *Amaranthus spp.* y *Cyperus rotundus* L..

### **2.2.4. Tratamientos fitosanitarios durante el cultivo**

Fue necesario realizar tratamientos fitosanitarios sobre el cultivo para poder salvaguardar las hojas de la planta sobre las que se debían hacer las medidas de fotosíntesis, ya que para ello era necesario disponer de 3,3 cm<sup>2</sup> de hoja sana. Por ello nuestro umbral de daños para la aplicación de tratamientos fue muy bajo. En la bibliografía, consultada sobre este cultivo en nuestro país, no se mencionan plagas importantes, salvo el caso de roya (*Puccinia salvia*).

En ambas especies fue necesaria la aplicación de tratamientos para controlar *Theba* sp. (Metaldehído 5% GB, 1g.m<sup>-2</sup>), *Rumina* sp. (Metiocarb 50% WP, 1,5 g.l<sup>-1</sup>), *Puccinia* sp. (hexaconazol 5% P/V + cobre, 1 cm<sup>3</sup>.l<sup>-1</sup> + 5 cm<sup>3</sup>.l<sup>-1</sup>; difenoconazol 25% P/V, 1 cm<sup>3</sup>.l<sup>-1</sup>; hexaconazol 5%, 1 cm<sup>3</sup>.l<sup>-1</sup>).

A partir de 2006 empleamos solamente productos fitosanitarios recomendados en agricultura ecológica (Reglamento Europeo N° 2092/91), para reducir ataques de *Theba* sp y *Rumina* sp (trampas de metaldehído y concentrado de ajo como repelente para mamíferos) y tratamientos preventivos y curativos para oidio (*Erysiphe* sp) (Azufre 80%, 0,5%).

El oidio fue muy habitual en *S. lavandulifolia* durante las épocas de alta humedad matinal y elevada temperatura, habituales en la zona de los ensayos a finales del verano. El tratamiento de azufre resultó muy efectivo para su prevención y control.

### 2.3. Tratamientos de riego

El período de mayor déficit hídrico en la Vega del Guadalquivir se produce durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Durante los ensayos las precipitaciones veraniegas fueron escasas y el clima se caracterizó por las altas temperaturas, tanto diurnas como nocturnas. En la Figura 2.3 se muestran de manera resumida las condiciones climáticas ( $T^a$  máx. y mín., ETo y DPV) correspondientes al período de estudio. En el Anexo II se muestra información detallada de las variables meteorológicas obtenida de la estación meteorológica más cercana, situada en La Rinconada (municipio colindante a Alcalá del Río).

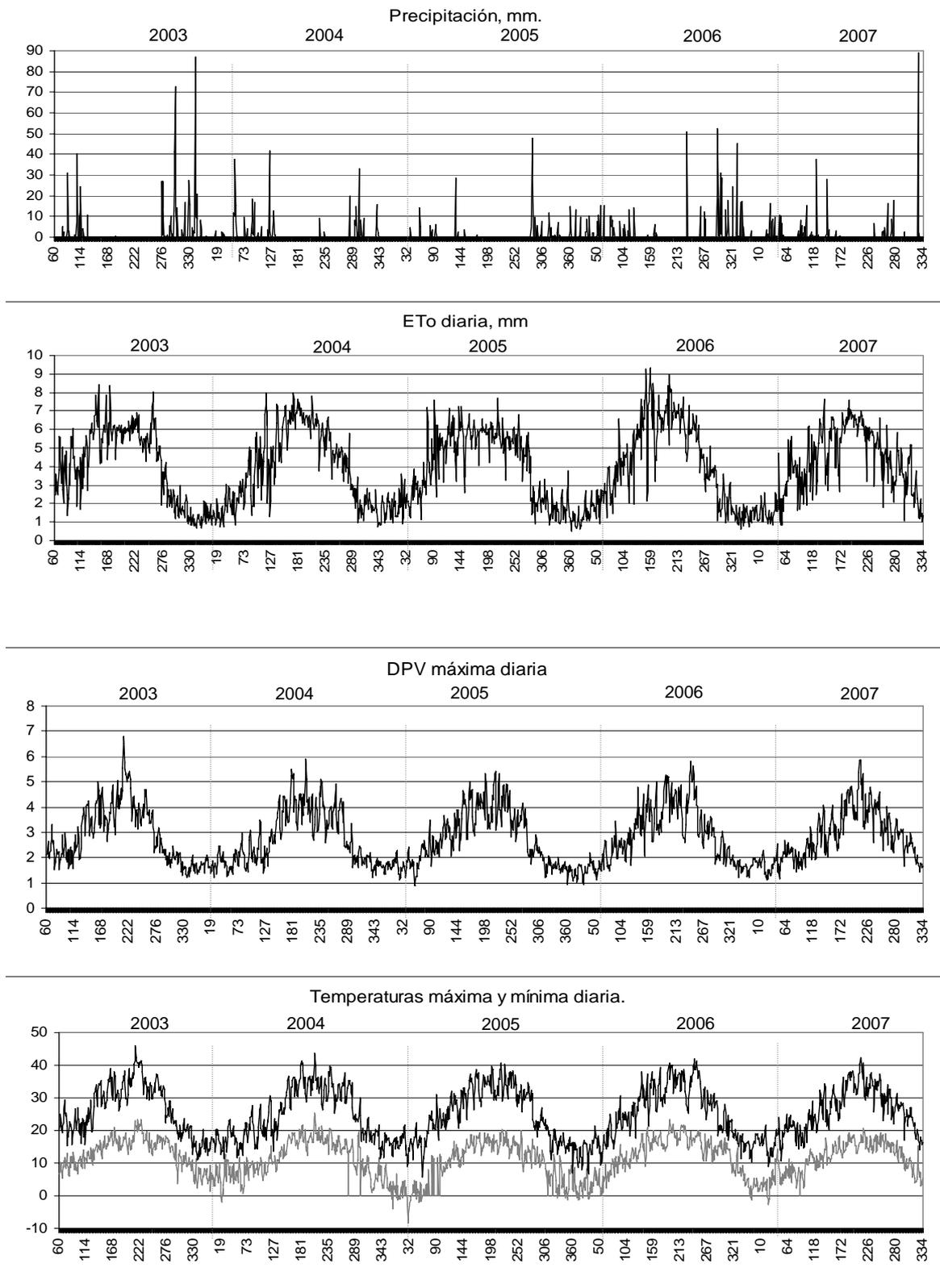
Para estudiar el efecto del estrés hídrico en la fisiología, producción y calidad del aceite esencial, en los cultivos de *Salvia officinalis* L. y *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea*, se aplicaron 5 tratamientos distintos consistentes en diferentes dosis de riego durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre de los años 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007 en el caso de *S. officinalis* y los años 2005, 2006 y 2007 en *S. lavandulifolia*. Los tratamientos aplicados fueron de 100%, 75%, 50%, 25% de Evapotranspiración de referencia (ETo) y 0 (secano) (Tabla 2.2). La ETo se calculó diariamente a partir de la medida en un tanque evaporimétrico de Clase A, situado en la estación meteorológica de La Rinconada (Sevilla). La distribución de los tratamientos dentro de cada uno de los cuatro bloques se realizó de forma aleatoria para evitar la interferencia de posibles diferencias de suelo.

**Tabla 2.2.- Aportes hídricos de cada uno de los tratamientos (de junio a septiembre).**

Tratamiento	Dosis aplicada (mm)				
	2003	2004	2005	2006	2007
100% ETo	629,9	657,4	610,2	691,3	614,5
75% ETo	472,4	493,0	457,7	518,5	460,9
50% ETo	315,0	328,7	305,1	345,6	307,3
25% ETo	157,5	164,3	152,6	172,8	153,6
Secano (0% ETo)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

La aplicación del riego se realizó con un sistema de goteros autocompensantes y antidrenantes, con el fin de controlar al máximo la cantidad de agua aportada con cada riego. Se comprobó que la uniformidad del riego fue mayor del 95%. Los riegos se realizaron con una frecuencia de dos días y se aplicaron al inicio de la mañana. En la Tabla 2.2 se muestran

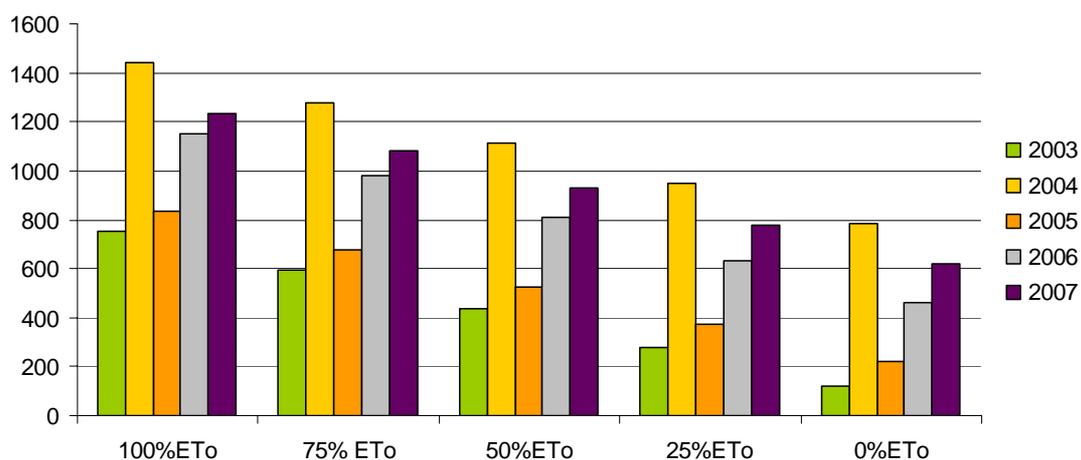
**Figura 2.3.- Condiciones climáticas ocurridas durante los ensayos.**



los datos de ETo acumulada empleados para la aplicación de cada uno de los tratamientos, durante el período en el que se aplicaron éstos, de junio a septiembre. En la Tabla 2.3 se presentan los datos pluviométricos de otoño-invierno y primavera y en la Figura 2.4 los aportes hídricos totales recibidos por cada tratamiento anualmente, incluidas las precipitaciones veraniegas.

**Tabla 2.3.- Aportes hídricos producidos por la lluvia durante otoño-invierno y primavera.**

	2004	2005	2006	2007
<b>Pluviométrica</b>	699,4	185,6	346,6	518,4



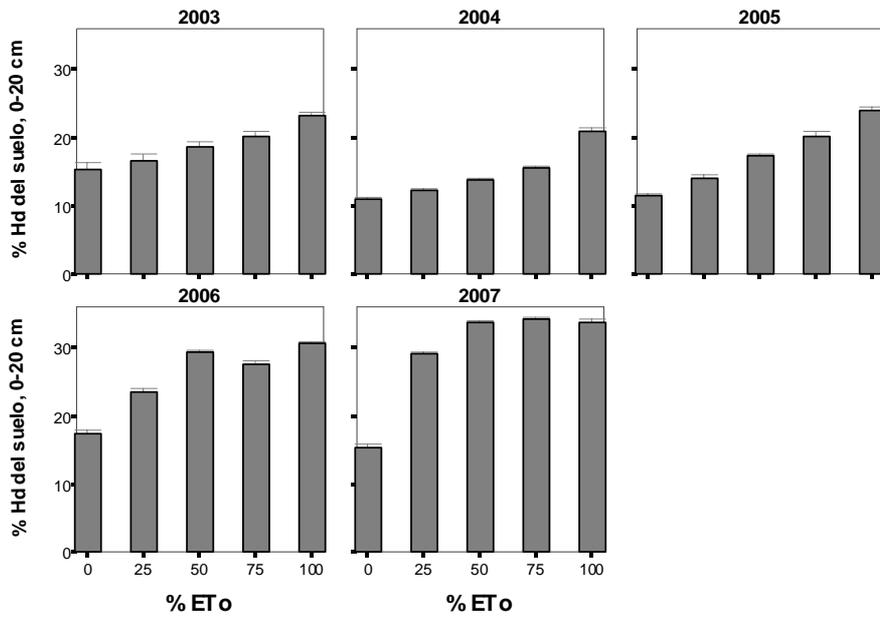
**Figura 2.4.- Aportación de agua anual recibida por los cultivos**

El contenido en humedad del suelo se midió durante la aplicación de los tratamientos. En las Figuras 2.5 y 2.6 se muestran las medias de contenido en humedad del suelo de cada tratamiento hídrico, durante los diferentes años del estudio. Y en el Anexo I se ofrece una visión más detallada del contenido hídrico a lo largo de todos los veranos de estudio.

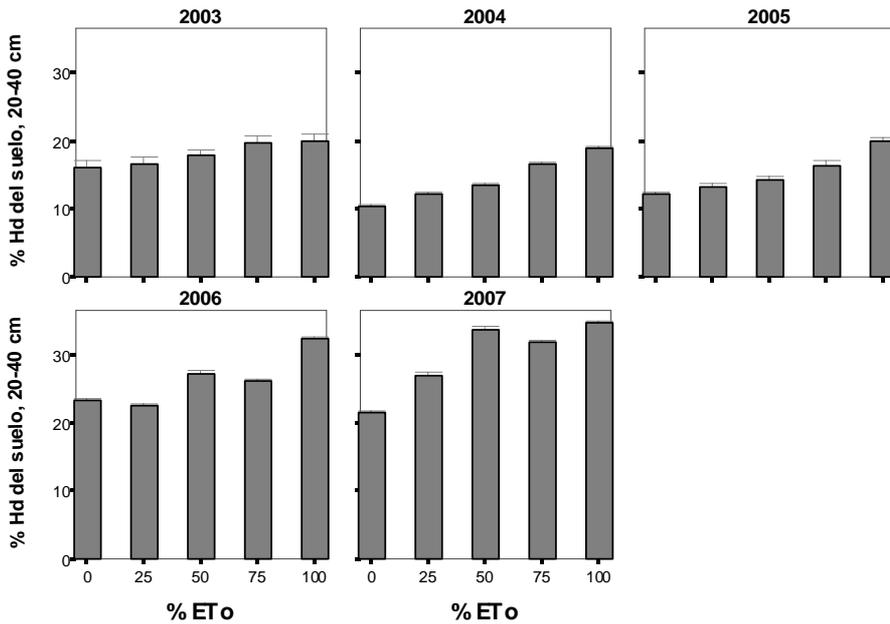
Durante los dos primeros años se calculó la cantidad de agua del suelo mediante el secado de muestras de suelo a 105°C, durante 24 horas, en estufa con circulación de aire forzado. Se tomó una muestra de suelo por parcela en cuatro ocasiones a lo largo del cultivo. Las muestras se extrajeron con una barrena de muestreo, tomándose dos tipos de muestras: de los primeros 20 cm de suelo y de la zona comprendida entre 20 y 40 cm de profundidad.

A partir del verano de 2005, la medida de humedad del perfil del suelo se realizó con una sonda de tecnología FDR (Frequency Domain Reflectometry), que determina el contenido del agua en suelo mediante la medida de la capacitancia (y a su vez de la constante dieléctrica)

(Diviner 2000, Sentek Australia). Se realizaron las medidas en un metro de profundidad del perfil.



**Figura 2.5.- Contenido en humedad medio del suelo a profundidad de 0-20 cm en cada uno de los tratamientos de riego aplicados, durante el verano.**



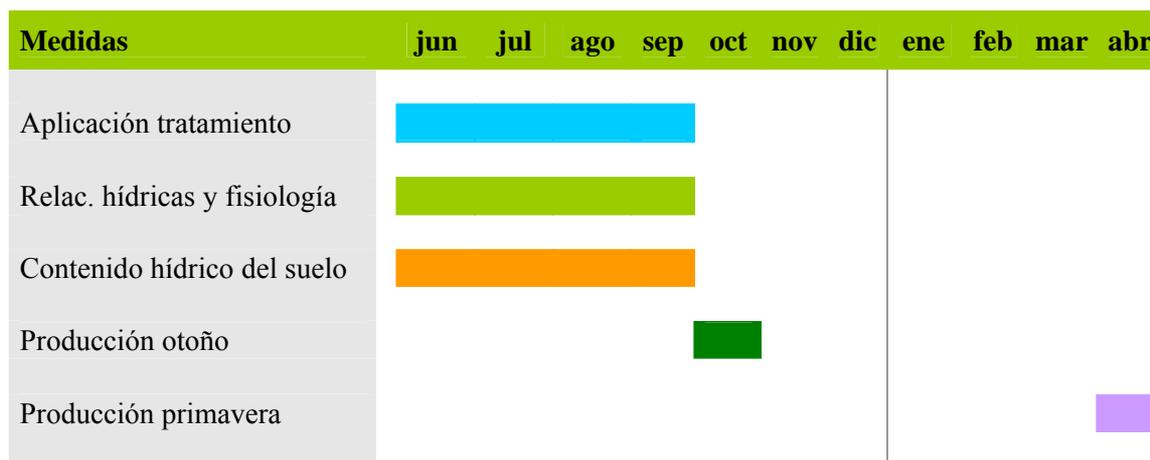
**Figura 2.6.- Contenido en humedad medio del suelo a profundidad de 20-40 cm en cada uno de los tratamientos de riego aplicados, durante el verano.**

## 2.4. Parámetros determinados.

De acuerdo con los objetivos marcados en este estudio, los parámetros que se tuvieron en cuenta fueron principalmente fisiológicos y de producción. En este apartado se detallan las medidas y las metodologías empleadas.

Las medidas de relaciones hídricas, fisiología en la hoja y humedad del suelo se tomaron con una frecuencia quincenal o mensual dependiendo de la especie y año de estudio. En las siguientes tablas se detallan las fechas de medida (Tablas 2.4 y 2.5).

Se realizaron dos recolecciones anuales, para medir la producción de otoño (hoja) y primavera (hoja + inflorescencias) (Fig. 2.7) y las fechas de las recolecciones se muestran en la Tabla 2.6.



**Figura 2.7.- Calendario de medidas anual**

**Tabla 2.4.- Fechas de medidas de contenido hídrico del suelo**

<b>2003</b>	13 de mayo, 16 junio, 10 julio, 26 agosto
<b>2004</b>	14 junio, 2 julio, 15 julio, 31 agosto, 21 septiembre
<b>2005</b>	5 julio, 17 julio, 28 agosto
<b>2006</b>	6 junio, 14 julio, 28 de julio, 4 agosto, 11 agosto, 19 agosto, 27 agosto, 8 septiembre, 17 septiembre, 28 septiembre
<b>2007</b>	2 agosto, 13 agosto, 22 agosto, 3 septiembre, 7 septiembre, 25 septiembre, 4 octubre

**Tabla 2.5.- Fechas de medida relativas al agua en plantas e intercambio gaseoso en hoja.**

	<i>S. officinalis</i>	<i>S. lavandulifolia</i>
<b>2003</b>	5 junio, 17 junio, 2 julio, 22 julio, 7 agosto, 20 agosto, 2 septiembre, 24 septiembre.	
<b>2004</b>	1 junio, 16 junio, 1 julio, 14 julio, 28 julio, 18 agosto, 31 agosto, 9 septiembre y 25 septiembre.	
<b>2005</b>	7 julio, 28 julio, 20 agosto y 20 septiembre.	15 julio, 28 julio, 23 agosto, 27 septiembre.
<b>2006</b>	26 julio, 9 agosto y 30 septiembre.	12 julio, 1 agosto, 28 agosto, 19 septiembre.
<b>2007</b>	4 julio, 22 agosto y 20 septiembre.	10 julio, 7 agosto, 28 agosto,

**Tabla 2.6.- Fechas de cosecha.**

	<i>S. officinalis</i>	<i>S. lavandulifolia</i>
<b>2003</b>	29 septiembre	
<b>2004</b>	Otoño : 29 septiembre Primavera: 29 abril	
<b>2005</b>	Otoño : 24 octubre Primavera: 5 mayo	
<b>2006</b>	Otoño : 10 noviembre Primavera: 2 junio	Otoño : 5 noviembre Primavera: 5 mayo
<b>2007</b>	Otoño : 10 octubre Primavera: 16 mayo	Otoño : 28 octubre Primavera: 15 mayo

#### **2.4.1.- Medidas relativas al agua en plantas.**

Estos datos se tomaron al mediodía a lo largo del período de aplicación de los tratamientos, en las últimas hojas completamente expandidas sobre las que también se midieron los parámetros fisiológicos. Las determinaciones efectuadas para caracterizar el efecto de los tratamientos de riego en la disponibilidad de agua para la planta fueron las siguientes:

– Potencial hídrico foliar ( $\Psi_h$ ). El potencial hídrico foliar se midió con una cámara de presión (Soil Moisture, USA), empleando la metodología descrita por Scholander (1965). Los valores obtenidos se expresan en unidades de presión (Mpa).

– Contenido hídrico foliar (CHF). Se registraron los pesos fresco y seco de las hojas. Éstas se secaron en una estufa con circulación de aire, a 65°C, durante 48 horas, hasta peso constante. El contenido de agua del tejido foliar, en %, se calculó según la siguiente ecuación:  $CHF = [(PF-PS) / PF] \times 100$

#### **2.4.2.- Fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática.**

Los parámetros de intercambio gaseoso se midieron sobre las últimas hojas completamente expandidas, en tres plantas elegidas al azar de cada una de las parcelas. La medida se realizó aproximadamente a las 12 h A.M. (intervalo de 11 a 13 horas), manteniendo la radiación incidente constante ( $1.600 \mu\text{moles.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) sobre la hoja objeto de medida. Las condiciones oscilaron en un intervalo de temperatura del aire de 35-40°C y 360-380 ppm de  $\text{CO}_2$ . Los parámetros se calcularon con la medida del intercambio de gases ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ), obtenidas con un analizador de gases por infrarrojos (IRGA) (L.MAN-LCPro, ADC BioScientific Ltd., Hoddesdon, Herts) y una cámara LCP-010 C, de sistema abierto, provista de ventilador para hacer mínima la capa estacionaria.

Estas medidas obtenidas fueron:

- tasa de fotosíntesis neta ( $A$ ,  $\mu\text{moles CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )
- tasa de transpiración ( $E$ ,  $\text{mmoles H}_2\text{O}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )
- conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{moles}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

#### **2.4.3.- Producción.**

##### **a.- Producción de biomasa.**

Las recolecciones se realizaron en septiembre (producción de otoño) y entre abril y mayo (producción de primavera). En otoño se recolectaron los tallos y hojas, y en primavera tallos, hojas e inflorescencias. En ambos casos la recolección se efectuó en 5 plantas por

parcela, a una altura de 10 cm del cuello de la planta. La recolección fue manual para evitar los posibles daños en las plantas que puede ocasionar la recolección mecanizada (Muñoz, 1987).

Se determinó la producción de materia fresca y seca. Para ello se desecaron muestras de 500 g hasta peso constante en estufa con circulación de aire, durante 48 horas a 65°C. Las variables de producción de biomasa así obtenidas, se expresaron como:

- producción de peso fresco (Peso fresco), materia fresca producida en una hectárea del cultivo, con calidad comercial ( $t.ha^{-1}$ )
- producción de materia seca (Materia seca), materia seca producida en una hectárea de cultivo ( $t.ha^{-1}$ )

#### **b.- Producción de aceite esencial.**

El rendimiento en aceite esencial se obtuvo destilando 500 g de material vegetal oreado durante dos días, en un secadero, con circulación de aire y sombreado. La destilación se realizó por arrastre de vapor, en un destilador de laboratorio compuesto por un sistema de vidrio y una manta térmica. El sistema de destilación era tipo Clavenger (Carruba *et al.*, 2002). Se modificó la estructura del destilador para disponer una bureta graduada que permitiera medir el volumen destilado de aceite una vez producida la decantación. El tiempo de destilación fue de una hora y treinta minutos por muestra.

Muestras del material oreado también se secaron en estufa hasta peso constante (24 h a 65 °C), para poder conocer el contenido en humedad de las muestras y expresar el rendimiento en aceite esencial sobre materia seca. Las variables de producción de aceite así obtenidas fueron:

- rendimiento en aceite esencial (Rend.AE), centímetros cúbicos de aceite esencial obtenidos por kilogramo de materia seca ( $ml.kg^{-1}$ )
- rendimiento en aceite esencial del cultivo (Rend.AE), litros de aceite esencial producidos por hectárea de cultivo ( $L.ha^{-1}$ )

#### **c.- Eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa y aceite esencial.**

Para estimar la eficiencia del uso del agua aplicada en la producción de biomasa y aceite esencial se consideró la producción y el agua empleada en el riego de cada tratamiento y la pluviometría sin considerar la evaporación, por lo que de un modo estricto, los parámetros considerados a continuación son de eficiencia evapotranspiratoria del cultivo (Ludlow y

Muchow, 1990), en los que la evaporación desde el suelo no se ha tenido en cuenta. Los parámetros determinados fueron:

- Eficiencia en el uso del agua para la producción de biomasa fresca (**EUA pf**): peso fresco de la parte aérea producida en un período determinado dividida por la cantidad de agua recibida en ese período
- Eficiencia en el uso del agua para la producción de biomasa seca (**EUA ps**): peso seco de la parte aérea producida en un período determinado dividida por la cantidad de agua recibida en ese período
- Eficiencia en el uso del agua para la producción de aceite esencial por unidad de peso (**EUA AEp**): volumen de aceite esencial producido en un período determinado dividido por la cantidad de agua recibida en ese período
- Eficiencia en el uso del agua para la producción de aceite esencial por unidad de superficie de cultivo (**EUA AEs**): volumen de aceite esencial producido por hectárea en un período determinado dividido por la cantidad de agua recibida en ese período

#### **2.4.4.-Composición química y calidad del aceite esencial.**

Fue necesaria la preparación de las muestras para eliminar trazas de agua mediante la deshidratación del aceite esencial con sulfato sodio anhidro. Posteriormente las muestras se diluyeron con éter dietílico para realizar los análisis (1:5, aceite:éter).

El análisis de la composición química se realizó por cromatografía gaseosa. Para ello se empleó un cromatógrafo GC-2010 Shimadzu y una columna capilar TR-WAX de 10 m x 0,1mm x 0,1 $\mu$ m (Teknokroma).

Las condiciones de análisis fueron:

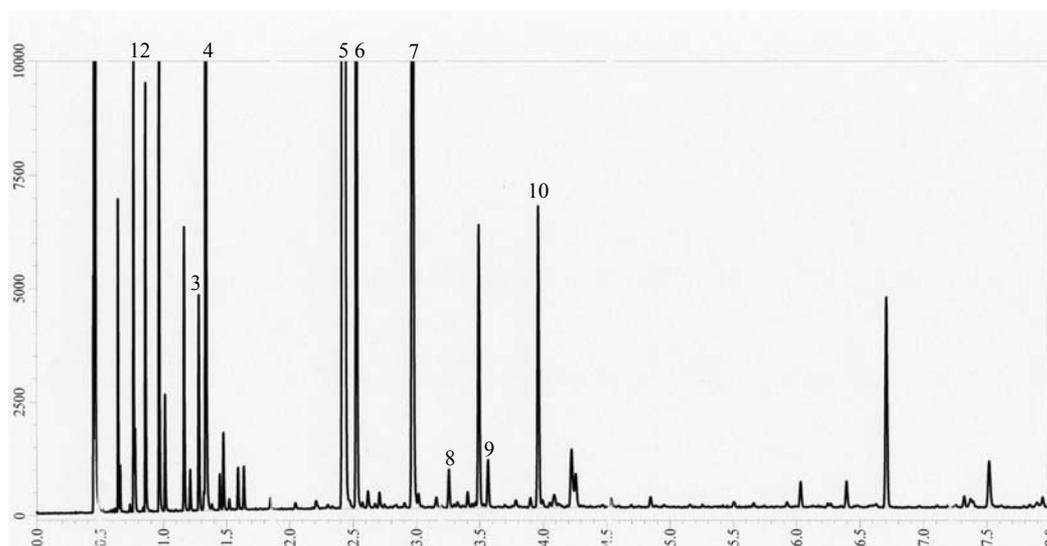
- Gas portador: Helio
- Temperatura de inyección: 200 °C
- Volumen inyectado: 1  $\mu$ l
- Split ratio: 1000:1
- Velocidad lineal constante: 35 cm.s<sup>-1</sup>
- Presión 257,8 KPa
- Flujo total 383,7 mL.min.<sup>-1</sup>
- Flujo en columna 0,38 mL.min.<sup>-1</sup>
- Detector: Ionizador de llama, FID. a 240 °C

Se adaptó el programa de temperaturas en la columna para cada una de las especies analizadas (Tabla 2.7).

**Tabla 2.7.- Programa de temperaturas de columna para el análisis del aceite esencial de cada una de las especies.**

<i>S. officinalis</i>	50-90°C con una velocidad de 20°C.min. <sup>-1</sup>
	90-240°C con una velocidad de 15°C.min. <sup>-1</sup>
	240°C durante 3 min.
<i>S. lavandulifolia</i>	50-90°C con una velocidad de 20°C.min. <sup>-1</sup>
	90-150°C con una velocidad de 10°C.min. <sup>-1</sup>
	150-240°C con una velocidad de 20°C.min. <sup>-1</sup>
	240°C durante 12 min.

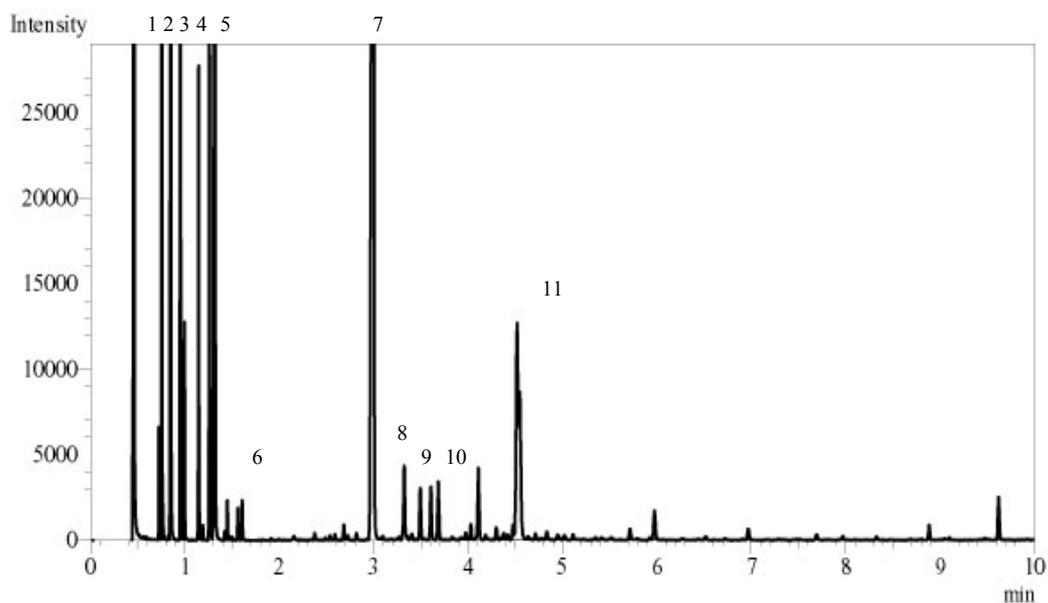
Los componentes se identificaron por los tiempos de retención de los compuestos introducidos como patrones internos en muestras representativas del aceite esencial de *Salvia officinalis* L y *Salvia lavandulifolia* Subsp. *vellerea* (Tabla 2.8 y 2.9), según el perfil de cada una de las especies (Fig 2.8 y 2.9).



**Fig. 2.8.- Perfil típico del aceite esencial de *Salvia officinalis* L.**

**Tabla 2.8.-Tiempos de retención de cada uno de los componentes más importantes presentes en el aceite esencia de *Salvia officinalis* L.**

Pico	Componente	Tiempo de retención (min.)
1	$\alpha$ -pineno	0,764
2	canfeno	0,858
3	limoneno	1,281
4	1,8-cineol	1,338
5	$\alpha$ -tuyona	2,435
6	$\beta$ -tuyona	2,528
7	alcanfor	2,971
8	linalol	3,255
9	acetato de bornilo	3,512
10	$\alpha$ -humuleno	3,986



**Fig. 2.9.- Perfil típico del aceite esencial de *Salvia lavandulifolia* subsp. *vellerea***

**Tabla 2.9.-Tiempos de retención de cada uno de los componentes más importantes constituyentes del aceite esencial de *Salvia lavandulifolia* subsp. *vellerea***

Pico	Componente	Tiempo de retención (min.)
1	$\alpha$ -pineno	0,752
2	canfeno	0,840
3	sabineno	0,942
4	limoneno	1,244
5	cineol	1,298
6	terpinolene	1,585
7	alcanfor	2,937
8	linalol	3,268
9	acetato de linalilo	3,437
10	1-terpinen 4 ol	3,622
11	borneol	4,442

La calidad se determinó teniendo en cuenta los criterios establecidos por las normas internacionales que regulan la calidad de los aceites esenciales de ambas especies: ISO 9909 (1997) e ISO3526 (1991) (Tabla 2.10 y 2.11).

**Tabla 2.10.- Contenido relativo de cada uno de los componentes que dictan la calidad del aceite esencial de *Salvia officinalis* L. (ISO 9909:1997)**

Componente	Mínimo, %	Máximo, %
$\alpha$ -pineno	1,0	6,5
canfeno	1,5	7,0
limoneno	0,5	3,0
1,8-cineol	5,5	13,0
$\alpha$ -tuyona	18,0	43,0
$\beta$ -tuyona	3,0	8,5
alcanfor	4,5	24,5
linalol	-	1,0
acetato de bornilo	-	2,5
$\alpha$ -humuleno	-	12,0

**Tabla 2.11.- Contenido relativo de cada uno de los componentes que dictan la calidad del aceite esencial de *Salvia lavandulifolia* (ISO 3526: 1991)**

<b>Componente</b>	<b>Mínimo, %</b>	<b>Máximo, %</b>
$\alpha$ -pineno	4	11
canfeno	-	-
sabineno	0,1	3
limoneno	2	5
cineol	11	25
terpinolene	-	-
alcanfor	11	36
linalol	0,5	9
acetato de linalilo	-	5
1 terpinen 4 ol	-	2
borneol	1	8

## 2.5. Análisis de los datos

Todos los parámetros se trataron estadísticamente con el programa Statistix 8.0 mediante dos diseños.

1. Diseño de parcelas sub-subdivididas, considerando los tratamientos de riego como parcelas principales y los años de cultivo como subparcelas. La sub-subparcela se adecuó al tipo de dato:
  - a. En el caso de la producción y la composición química de los aceites esenciales, se consideraron las recolecciones (primavera u otoño) como sub-subparcelas (Little y Jackson Hills, 1987).
  - b. En el estudio fisiológico, la sub-subparcela fue el mes de medida dentro del verano, en tres meses distintos: junio (inicio del verano), agosto (momento de mayor déficit hídrico, altas temperaturas y condiciones climáticas más adversas) y septiembre (final de la estación, comienzo de la recuperación del déficit hídrico).
2. Diseño de bloques al azar, considerando como fuente de variación los tratamientos de riego en cada una de las recolecciones o toma de datos.

El test de comparación de medias utilizado fue la mínima diferencia significativa (MDS) para un nivel de confianza del 95% y el 99%. En las tablas, los valores medios seguidos de diferentes letras representan las diferencias significativas al 95%. Y en las figuras, la existencia de diferencias significativas entre tratamientos se señalan mediante asteriscos, \*\*= $P \leq 0,01$  y \*= $P \leq 0,05$ .

También se efectuó un estudio de las relaciones entre variables mediante análisis de regresión y correlación para los datos medios de producción y fisiología. Para este análisis y los gráficos correspondientes se empleó el programa SPSS13.

# RESULTADOS





### 3.1. Efecto del déficit hídrico en el intercambio gaseoso y las relaciones hídricas.

#### 3.1.1.- *Salvia officinalis*.

Las medidas de relaciones hídricas e intercambio gaseoso, realizadas al medio día en distintos momentos del verano, se vieron afectadas por los tratamientos de riego durante los cinco años de estudio de *Salvia officinalis* L. En la Tabla 3.1. se presentan los resultados del análisis estadístico general, incluyendo tratamientos, meses de medida y años de estudio como síntesis introductoria.

La actividad fotosintética (A) varió de manera muy significativa con los tratamientos de riego, revelando diferencias significativas entre cada uno de estos (Tabla 3.1). La aplicación

**Tabla 3.1.1. - Intercambio gaseoso y relaciones hídricas en *Salvia officinalis* durante el verano con distintos tratamientos de riego en los cinco años estudiados (2003-07).**

	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>g<sub>s</sub></i>	<i>EUAI</i>	<i>CHF</i>	$\Psi_h$
<b>ETo</b>	**	**	**	*	**	**
0 %	12,7 e	5,6 d	0,19 d	2,79 a	59,8 c	-2,1 d
25%	15,9 d	6,2 d	0,22 d	3,01 a	63,7 b	-1,9 c
50%	18,5 c	8,8 c	0,31 c	2,27 b	67,3 a	-1,8 b
75%	20,9 b	9,6 b	0,36 b	2,44 b	68,2 a	-1,6 a
100%	22,5 a	10,7 a	0,41 a	2,28 b	68,7 a	-1,6 a
<b>Mes</b>	**	**	**	**	**	**
Junio	20,6 a	9,3 a	0,39 a	2,49 b	69,2 a	-1,6 a
Agosto	17,3 b	8,1 b	0,25 b	2,25 c	64,4 b	- 2,0 b
Septiembre	16,4 c	7,1 c	0,26 b	2,98 a	63,1 c	-
<b>Año</b>	**	**	**	**	**	**
2003	18,8 b	6,9 c	0,31 b	2,88 a	68,3 a	-1,72 ab
2004	15,3 d	7,2 bc	0,27 c	2,37 c	64,8 b	-1,70 a
2005	16,3 c	7,4 bc	0,25 cd	2,61 b	63,3 c	-1,79 c
2006	20,7 a	11,5 a	0,43 a	1,94 d	65,4 b	-1,98 d
2007	19,4 b	7,7 b	0,24 d	3,07 a	66,0 b	-1,79 bc
<b>ETo x año</b>	**	**	**	ns	ns	**
<b>ETo x mes</b>	**	**	**	ns	**	**
<b>Año x mes</b>	**	**	**	**	**	**
<b>ETo x año x mes</b>	**	**	**	**	**	**

*A*, tasa de fotosíntesis neta ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); *E*, tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); *g<sub>s</sub>*, conductancia estomática ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); *EUAI*, eficiencia en el uso del agua de la fotosíntesis ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol HO}_2$ ); *CHF*, contenido hídrico foliar (%P:P);  $\Psi_h$ , potencial hídrico (MPa). \*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

de mayor volumen de riego produjo un aumento paulatino de la fotosíntesis, con una tendencia prácticamente lineal. El tratamiento de secano mostró los valores medios más bajos de  $A$  y el regadío con el 100% de la  $E_{To}$  la máxima tasa fotosintética, con valores medios de  $22,5 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . El déficit hídrico por las condiciones de secano produjo un descenso en  $A$  de un 44% con respecto al tratamiento de riego de 100%  $E_{To}$ .

Los cambios de la actividad fotosintética a lo largo del verano fueron muy significativos en las tres medidas realizadas. Los valores máximos de absorción de  $\text{CO}_2$  se alcanzaron en junio, al inicio del verano. Posteriormente se produjo un descenso significativo en los meses de agosto y septiembre, como consecuencia de la menor disponibilidad hídrica en el suelo y la alta demanda evaporativa (altas temperatura y baja humedad relativa del aire, por lo tanto elevado DPV) (Anexo II: Condiciones climáticas). Como veremos más adelante, en algunos años en septiembre se produjo una recuperación de los valores de  $A$ , pero esto sólo ocurrió de manera particular cuando las condiciones climáticas fueron especialmente favorables. Como podemos apreciar en la Tabla 3.1, la media de las medidas de  $A$  realizadas en septiembre fue menor incluso que la de agosto.

A lo largo de los años de cultivo, la actividad fotosintética mostró diferencias significativas entre los distintos años estudiados. Los mayores valores se alcanzaron en 2006, seguidos del primer y último año estudiado (2003 y 2007 respectivamente). Los valores más bajos se midieron en 2005 y 2004 (Tabla 3.1).

La transpiración ( $E$ ) promedio de todos los años estudiados mostró un descenso altamente significativo con el déficit hídrico. Los tratamientos de mayor déficit hídrico produjeron los valores más bajos de  $E$ . A medida que aumentó la dosis de riego, se incrementó  $E$  alcanzando el máximo nivel en el tratamiento de 100%  $E_{To}$ , con valores que prácticamente duplicaron a los de secano (Tabla 3.1).

A lo largo del verano vemos que los valores medios de  $E$  disminuyeron. En la media de junio se observaron valores más elevados, que descendieron significativamente en los siguientes meses (Tabla 3.1). En las medias de  $E$  por año se apreciaron diferencias: el primer año de cultivo se observó la media más baja mientras que la media más alta se encontró en el año 2006.

La conductancia estomática ( $g_s$ ) también mostró diferencias producidas como consecuencia de los tratamientos, disminuyendo  $g_s$  cuando disminuía el aporte hídrico (Tabla 3.1). Los tratamientos de mayor déficit hídrico alcanzaron los valores medios más bajos de  $g_s$ , guardando a su vez diferencias altamente significativas con los demás tratamientos de riego. El

secano sufrió el mayor descenso de  $g_s$ , con una disminución media de un 54% con respecto al tratamiento de 100 % ETo.

La conductancia estomática disminuyó a lo largo del verano, siendo la media de  $g_s$  en junio la más alta (Tabla 3.1) y significativamente diferente a las medias de julio y agosto que no guardaron diferencia entre ellas.

A lo largo de los distintos años estudiados se encontraron diferencias en las medias de  $g_s$ . En 2006 se alcanzó la mayor medida significativamente superior al resto de los años, mientras que en 2005 se encontró la menor media de  $g_s$ . Estas diferencias están relacionadas muy probablemente con las condiciones climáticas de cada uno de los años estudiados. El año 2005 fue un año especialmente seco desde el punto de vista del balance hídrico (se registraron las precipitaciones anuales más bajas de todo el período y las temperaturas durante el verano fueron extremas, alcanzándose los mayores valores de DPV) (Anexo II).

La eficiencia en el uso del agua de la fotosíntesis (EUAi) también se vio afectada por el déficit hídrico. Aumentó significativamente en los tratamientos de mayor estrés y, en los tratamientos de mayor dosis de riego, las medias de EUAi fueron más bajas (Tabla 3.1). *Salvia officinalis* fue por tanto más eficiente en el uso del agua de la fotosíntesis en situaciones de estrés hídrico.

La EUAi varió a lo largo del verano en las tres medidas realizadas (Tabla 3.1). En septiembre se obtuvieron los mayores valores de eficiencia, seguidos del mes de junio. El mes de agosto, que fue el de mayor déficit hídrico en general, mostró la menor media de eficiencia en el uso del agua de la fotosíntesis.

Se alcanzaron los mayores valores de EUAi en el primer y último año de cultivo coincidiendo con valores de apertura estomática intermedios y bajos. Los valores más bajos de eficiencia se encontraron en 2006, coincidiendo con una media de  $g_s$  muy alta (Tabla 3.1).

El contenido hídrico foliar (CHF) de *S. officinalis* se vio afectado por los niveles de riego aplicados, disminuyendo muy significativamente con la menor disponibilidad hídrica. El tratamiento con menor volumen de riego mostró el menor contenido hídrico foliar seguido por el tratamiento de 25% ETo (Tabla 3.1). A lo largo del verano el CHF mostró diferencias significativas, disminuyendo de junio a septiembre.

El potencial hídrico foliar ( $\Psi_h$ ) de *Salvia officinalis* disminuyó con el estrés hídrico producido por el riego deficitario (Tabla 3.1). Las diferencias entre tratamientos fueron altamente significativas, a excepción de los riegos con mayor dosis de agua entre los que no se apreciaron diferencias (Tabla 3.1).

Durante el verano se apreciaron diferencias entre las medidas de  $\Psi_h$  en junio y agosto (Tabla 3.1). El  $\Psi_h$  disminuyó a medida que transcurría el verano y las condiciones climáticas (temperatura, HR) eran más extremas. Los valores de potencial hídrico mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los distintos años. Los valores más bajos de  $\Psi_h$  se registraron en 2006 y los más altos los dos primeros años de cultivo en los que la media estuvo en torno a -1,7 MPa. Este comportamiento estaría relacionado con el agua disponible en el perfil del suelo para la planta y las condiciones climáticas del año en estudio. En 2003 se produjeron grandes precipitaciones (Anexo II, Tabla AII.1.) y el año 2005 estuvo caracterizado por unas condiciones de temperaturas extremas y bajas precipitaciones, disminuyendo de manera importante el contenido en humedad del suelo (Anexo I). En 2006 mejoraron las temperaturas pero no las precipitaciones en la primera parte del año en la que las lluvias fueron escasas (Anexo II: condiciones climáticas, Fig. AII.4). Aun considerando la importancia de otros factores, como temperatura y humedad relativa del aire, el potencial hídrico foliar se relacionó con la humedad del suelo en forma significativa (p.e. en 2006,  $r = 0,583$ ).

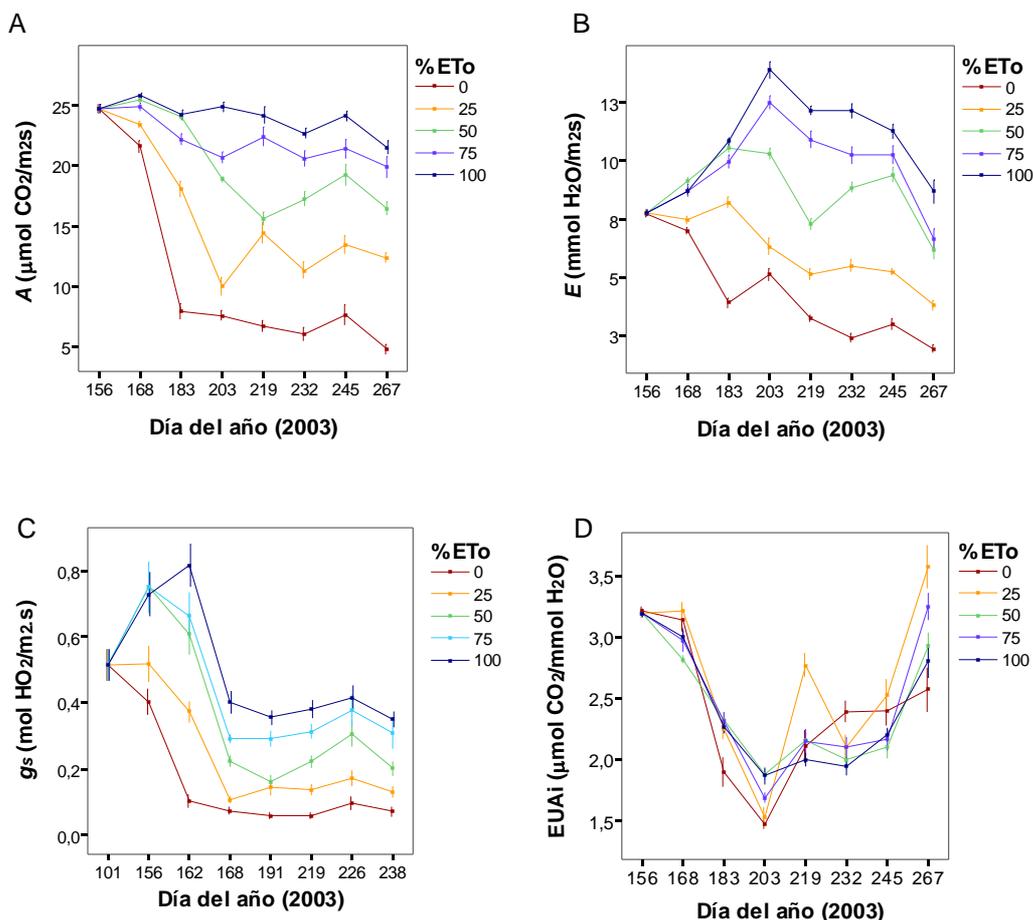
### **Año 2003**

En el primer año de implantación del cultivo, salvia mostró una actividad fotosintética muy sensible al déficit hídrico, condicionada por las condiciones ambientales, el estado hídrico de suelo y posiblemente el estado de la planta. Entre los parámetros determinados, *A* fue el que mostró mayores diferencias entre los tratamientos.

La fotosíntesis disminuyó a lo largo del verano (Fig. 3.1.1), pudiendo diferenciarse en tres períodos consecutivos: el primero transcurrió hasta mediados de junio, durante el que no se apreciaron diferencias entre los tratamientos; un segundo hasta el 2 de julio, en el que los tratamientos de mayor déficit comenzaron a diferenciarse (183 dda); el resto de las medidas realizadas hasta finales septiembre (267 dda), en las que se observaron niveles diferentes de actividad fotosintética en cada uno de los tratamientos, sin grandes diferencias en el transcurso del tiempo.

Si observamos la interacción de momento de medida (día del año) y dosis de riego podemos apreciar que las plantas regadas con el 100% de la ETo mostraron un ligero descenso, no significativo, en la fotosíntesis a lo largo de la estación de cultivo, observándose el valor mínimo ( $22 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) el 24 de septiembre (267 dda), pero en líneas generales *A* se mantuvo estable a lo largo de todo el verano. Los tratamientos de 75 y 50% ETo no guardaron diferencias claras con el 100% ETo, aunque si valores algo menores.

El tratamiento de secano, mostró un descenso brusco de  $A$  a partir del 17 de junio, disminuyendo en algunas medidas en un 72-77%, con respecto al riego.



**Figura 3.1.1. - Medidas de intercambio gaseoso en *Salvia officinalis* a lo largo del verano de 2003.**

A: Tasa de fotosíntesis neta ( $A$ ) al mediodía, B: Transpiración ( $E$ ), C: Conductancia estomática ( $g_s$ ) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis (EUA<sub>i</sub>). Barras verticales  $\pm$ ES.

La transpiración mostró un comportamiento desigual en el transcurso del verano ante el déficit hídrico (Fig. 3.1.1). Los tratamientos de mayor riego, después de una subida importante siguiendo el incremento en el déficit de presión de vapor (DPV), mantuvieron los niveles estables hasta el último período, en el que descendieron. Su comportamiento fue muy semejante al DPV que aumentó considerablemente a finales del mes de julio de 2003 (Anexo II, Fig. AII.2).

Los tratamientos de riego que imponían mayor déficit hídrico produjeron una disminución de la transpiración conforme aumentaba el DPV, descendiendo significativamente

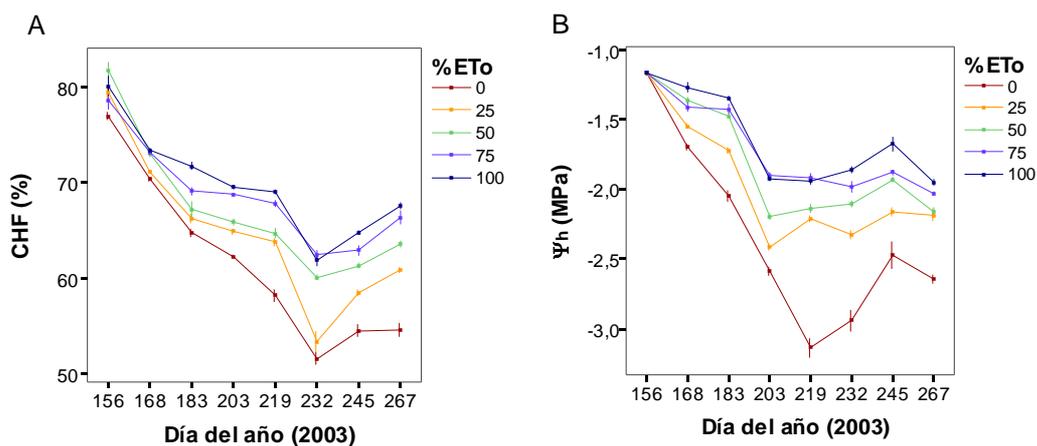
en caso de marcado déficit. Esta disminución en la transpiración fue paralela a la caída de fotosíntesis y supuso que la eficiencia en el uso del agua se mantuviera sin grandes diferencias entre los tratamientos.

El comportamiento de la conductancia estomática en los tratamientos de riego deficitario varió con el transcurso del verano (Fig. 3.1.1), principalmente en una primera etapa, en la que sólo disminuyó  $g_s$  en los tratamientos de 0 y 25% de  $E_{To}$ , mientras los tratamientos de mayor dosis de riego produjeron un aumento importante de  $g_s$ , hasta un 160% sobre los valores iniciales. A partir del descenso que coincidió con la última semana de julio (203 dda), en la que se produjeron los valores más elevados de DPV (Anexo II, Fig AII.2), la conductancia estomática se estabilizó ya prácticamente para todos los tratamientos.

La eficiencia en el uso del agua de la fotosíntesis ( $EUA_i$ ) varió con el tiempo en cada uno de los tratamientos, los valores más bajos pertenecieron a las medidas realizadas en la mayor parte de los tratamientos a finales del mes de julio (Fig. 3.1.1) cuando las condiciones climáticas fueron más extremas (Anexo II). Bajo condiciones de riego deficitario más severo aumentó la  $EUA_i$  ya que se redujo la transpiración en mayor medida que la fotosíntesis (Fig. 3.1.1), como veíamos con anterioridad. De manera que las plantas con mayor disponibilidad de agua, no aprovecharon el agua transpirada con tanta eficiencia en la fijación de  $CO_2$  como lo hicieron las plantas con déficit hídrico. Estas últimas disminuyeron la transpiración y fotosíntesis de manera significativa, resultando en un mayor número de moles de  $CO_2$  fijado por mol de  $H_2O$  perdida (Fig. 3.1.1).

Con el transcurso del verano el contenido hídrico foliar (CHF) disminuyó de manera significativa en cada una de las medidas realizadas (Fig. 3.1.1), en un 75% desde el transplante hasta mediados de agosto en seco, que como se señaló con anterioridad fue cuando se registraron las temperaturas más altas del período medido. Posteriormente, los contenidos hídricos de la hoja se recuperaron en cierta medida hasta valores anteriores al período mencionado (Fig. 3.1.2).

El potencial hídrico foliar respondió de manera progresiva a los tratamientos (Fig. 3.1.2). Este parámetro alcanzó valores menores a medida que transcurría el verano, y la humedad en el suelo se reducía. A partir de la medida realizada el 2 de julio (183 dda) se distanciaron las diferencias de  $\Psi_h$  entre los tratamientos con mayor riego y los de mayor déficit (Figura 3.1.2).



**Figura 3.1.2.- Contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de *Salvia officinalis* a lo largo del verano de 2003.**

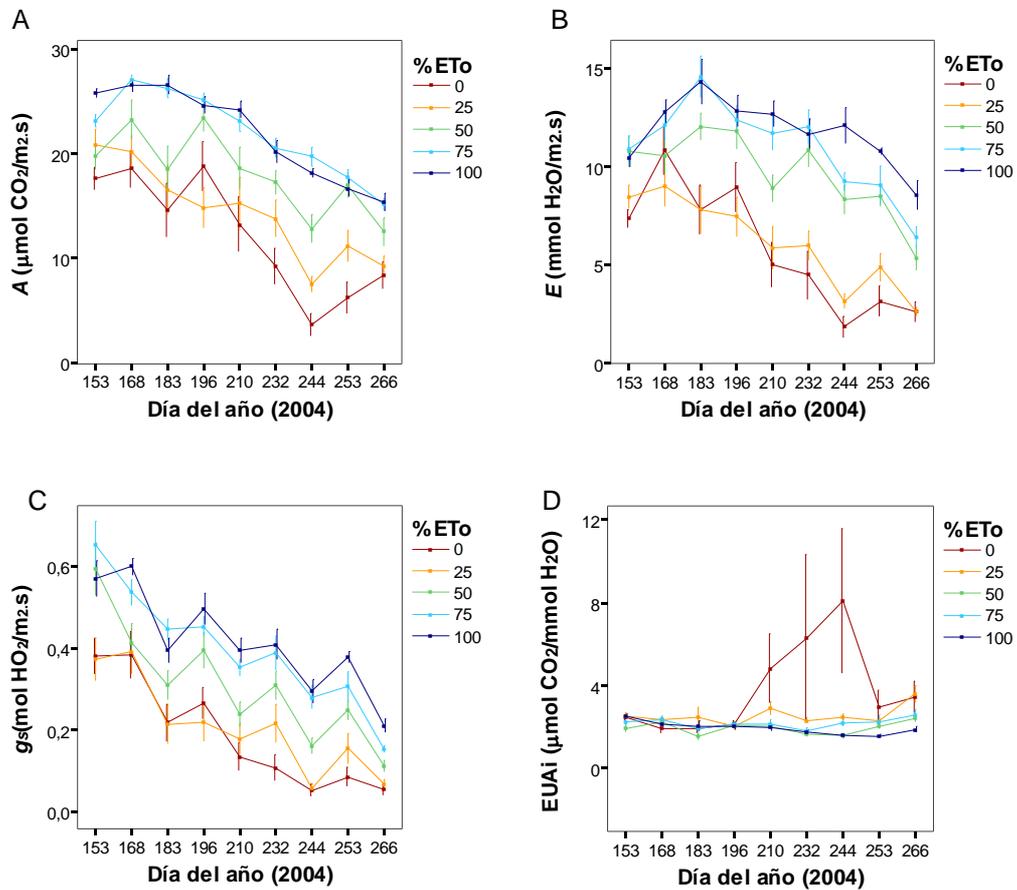
A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico ( $\Psi_h$ , MPa). Barras verticales  $\pm$ ES.

En secano las plantas alcanzaron valores de  $\Psi_h$  de hasta  $-3$  MPa en la primera semana de agosto, coincidiendo con las máximas temperaturas del verano (Anexo II). En las medidas posteriores, el  $\Psi_h$  se recuperó hasta valores de  $-2,5$  MPa a finales de septiembre.

El CHF y el  $\Psi_w$  presentaron un comportamiento muy similar, si bien el contenido hídrico foliar no tuvo una caída tan brusca como el potencial hídrico.

## Año 2004

A comienzos del segundo año de cultivo (2004) los distintos tratamientos de riego deficitario mostraron ya diferencias en la actividad fotosintética desde el inicio de la aplicación de los tratamientos (Fig. 3.1.3).



**Figura 3.1.3.-** Medidas de intercambio gaseoso en *Salvia officinalis* a lo largo del verano de 2004.

A: Tasa de fotosíntesis neta (A) al mediodía, B: Transpiración (E), C: Conductancia estomática (g<sub>s</sub>) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis (EUAi). Barras verticales  $\pm$ ES.

Las plantas regadas con las dosis más elevadas mantuvieron los valores más altos de fijación de CO<sub>2</sub> ( $26 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) durante todo el verano y sufrieron un leve descenso a medida que transcurrió el tiempo observándose el mínimo valor de A ( $15 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) el 22 de septiembre (266 dda). Este descenso pudo estar relacionado al bajo contenido hídrico de suelo que, junto a las condiciones climáticas, fueron más severas a medida que transcurrió el verano (Anexo I: humedad en suelo y Anexo II: condiciones climáticas verano 2004).

El tratamiento de secano (0% ETo), produjo el descenso más acusado de  $A$ , siendo inferior en algunas medidas hasta un 79% con respecto al riego. Estos valores mínimos se alcanzaron en las medidas realizadas el día 31 de agosto (244 dda) (Fig. 3.1.3).

La transpiración mostró una tendencia decreciente en todos los tratamientos a lo largo del verano. Sólo en una primera etapa se produjeron ligeros aumentos, más importantes en los tratamientos de mayor dosis de riego (Fig. 3.1.3). A partir de los 183 dda la transpiración comenzó a disminuir de forma significativa, con descensos más acusados en los tratamientos con riego más deficitario. El momento en el que se observó la máxima tasa de transpiración ( $14 \text{ mmoles H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) coincidió con un período en el que se produjo un ascenso de temperaturas y descenso de humedad relativa (168 y 183 dda respectivamente), mientras aún existían contenidos altos de humedad en el suelo, sobre todo en los tratamientos de mayor dosis de riego (Anexos I y II).

En los tratamientos con mayor déficit hídrico la transpiración disminuyó, de manera más acusada a medida que las condiciones climáticas se hicieron extremas, por la subida de las temperaturas medias a lo largo del verano. Los menores valores de transpiración se observaron en la medida tomada el 31 de agosto de 2005 (244 dda) (Fig. 3.1.3), descendiendo en torno a  $3 \text{ mmoles H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

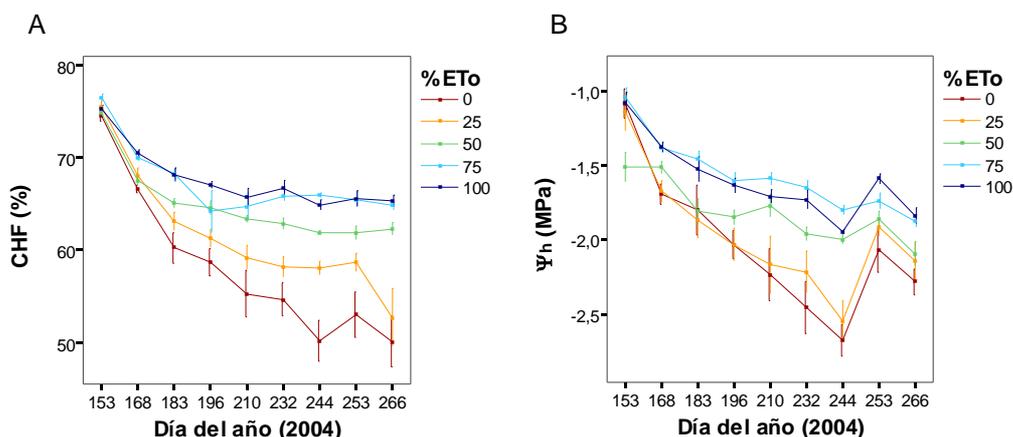
La conductancia estomática, medida al mediodía solar en el segundo año del cultivo (Fig. 3.1.3), adoptó valores significativamente diferentes a lo largo del verano. Las medidas realizadas los días 1 y 28 de julio y 31 de agosto (183, 210 y 244 dda), en las que se produjeron descensos más acusados, coinciden con los tres períodos de tiempo en los que se han producido ascensos de las temperaturas medias (Anexo II).

Los tratamientos produjeron diferencias significativas claras en  $g_s$ , disminuyendo significativamente con el estrés hídrico (Fig. 3.1.3).

Sólo mostraron diferencias significativas en EUAi las plantas de *Salvia officinalis* cultivadas en ausencia de riego, que alcanzaron las mayores tasas de eficiencia a finales de agosto (244 dda). Posteriormente estas diferencias se redujeron en las medidas realizadas en septiembre (253 y 266 dda) (Fig. 3.1.3).

El contenido hídrico foliar (CHF) mostró diferencias significativas para cada uno de los tratamientos de riego aplicados (Fig. 3.1.4), relacionándose estrechamente con la disponibilidad de agua suministrada por el riego. El descenso de CHF más importante se produjo en todos los tratamientos en el primer periodo del verano, hasta finales de julio (210 dda). Los tratamientos de mayor dosis de riego no produjeron diferencias significativas en CHF durante el verano y el

CHF se estabilizó prácticamente a partir de principios de julio. A partir de este momento el descenso del CHF en los tratamientos más deficitarios fue muy acusado.



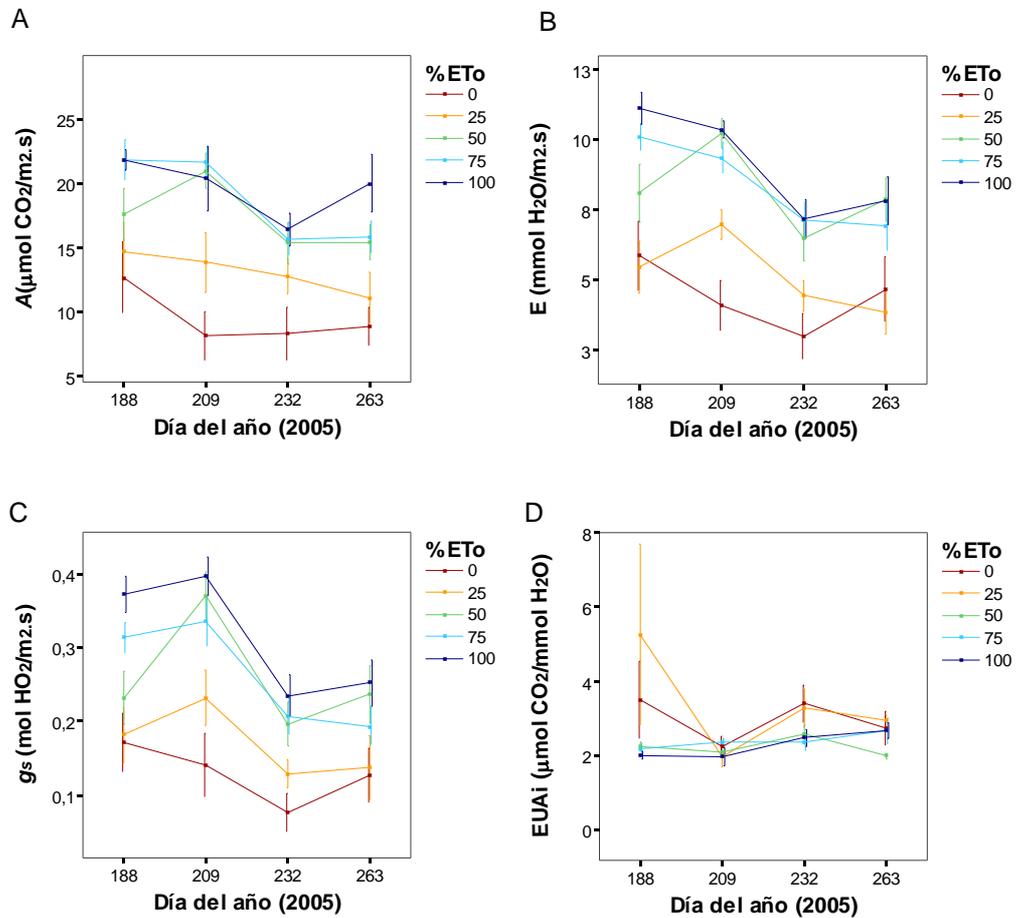
**Figura 3.1.4.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de *Salvia officinalis* a lo largo del verano de 2004.**

A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico ( $\Psi_h$ , MPa). Barras verticales  $\pm$ ES.

El potencial hídrico foliar de todos los tratamientos decreció al aumentar el déficit hídrico, mostrando diferencias notables a lo largo del verano. Con las dosis de riego mayores, el  $\Psi_h$  fue de  $-1,6$  MPa. En el caso de las plantas en secano, el descenso alcanzó los  $-2,6$  MPa al final del periodo estival (244 dda) (Fig. 3. 1. 4). Este comportamiento del  $\Psi_h$  fue muy similar al primer año de cultivo (2003) produciéndose el menor potencial como consecuencia del déficit hídrico más importante, en el que coincidieron bajos niveles de humedad en suelo y las condiciones climáticas más severas. Posteriormente se produjo una recuperación, aunque las diferencias de  $\Psi_h$  entre los tratamientos de riego se mantuvieron (Figura 3.1.4).

## Año 2005

Durante el tercer año de cultivo (2005) la actividad fotosintética continuó mostrando diferencias entre los tratamientos de riego (Figura 3.1.5), aunque la significación estadística de las diferencias entre tratamientos disminuyó comparada con veranos anteriores.



**Figura 3.1.5.- Medidas de intercambio gaseoso en plantas de *S. officinalis* a lo largo del verano de 2005.**

A: Tasa de fotosíntesis neta ( $A$ ) al mediodía, B: Transpiración ( $E$ ), C: Conductancia estomática ( $g_s$ ) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis ( $\text{EUAi}$ ). Barras verticales  $\pm\text{ES}$ .

En el año 2005 se observaron valores iniciales de  $A$  bastante bajos en los tratamiento con mayor dosis de riego, no habiéndose recuperado los valores de otras primaveras (Fig. 3.1.5). Aparentemente no se produjo una recuperación de las plantas durante el período de lluvias ya que resultaron ser las menores precipitaciones registradas durante los años de cultivo estudiados (Anexo II).

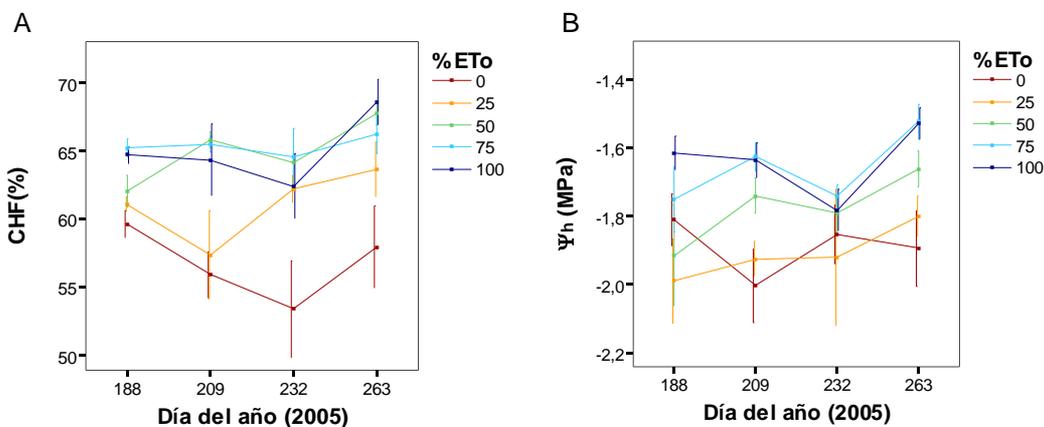
La transpiración en este caso tuvo un comportamiento muy similar a la tasa de fotosíntesis (Fig. 3.1.5). En los tratamientos de mayor déficit se observaron niveles muy bajos de  $E$ . Si comparamos el comportamiento de  $E$  con los anteriores años de cultivo se apreció una disminución importante de su valor en la segunda parte del verano.

Como en años precedentes la conductancia estomática se vio afectada por el déficit hídrico, descendiendo significativamente en los tratamientos con riego más deficitario, y en general se registraron valores de  $g_s$  muy bajos, siempre por debajo de  $4 \text{ moles HO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Durante 2005 no existieron diferencias significativas en EUA entre tratamientos de riego.

Sí hubo diferencias en el contenido hídrico foliar que se fueron acentuando a lo largo del verano, y el tratamiento de secano presento mayores diferencias significativas con el resto, alcanzando los menores valores a finales de agosto (232 dda) (Fig. 3.1.6).

El potencial hídrico foliar descendió al aumentar el déficit hídrico, pero las diferencias entre los tratamientos de mayor y menor riego disminuyeron (Fig. 3.1.6), situándose en valores intermedios. El secano no llegó a reducir el  $\Psi_h$  por debajo de  $-2 \text{ MPa}$  en todo el verano, a pesar de los bajos niveles de humedad en suelo y las severas condiciones climáticas.

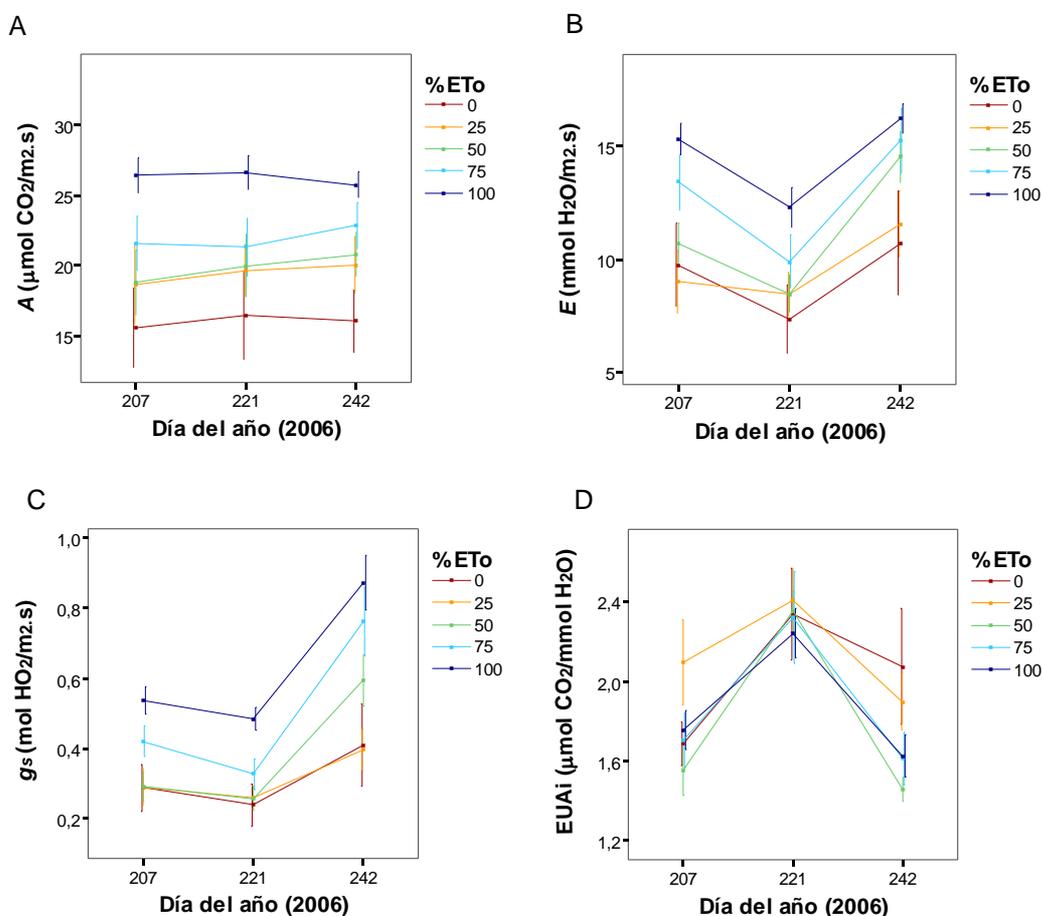


**Figura 3.1.6.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar de plantas de *S. officinalis* a lo largo del verano de 2005.**

A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico ( $\Psi_h$ , MPa). Barras verticales  $\pm$ ES.

## Año 2006

La primera medida de intercambio gaseoso durante el verano de 2006 se realizó a finales de julio (207 dda), después de un mes de aplicación de los tratamientos de riego. La actividad fotosintética ya mostró diferencias entre tratamientos (Fig. 3.1.7). En las medidas del verano de 2006, A se mantuvo estable con valores considerablemente altos ( $25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) en el tratamiento de 100% ETo, y bajos en el secano ( $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Fig. 3.1.7).



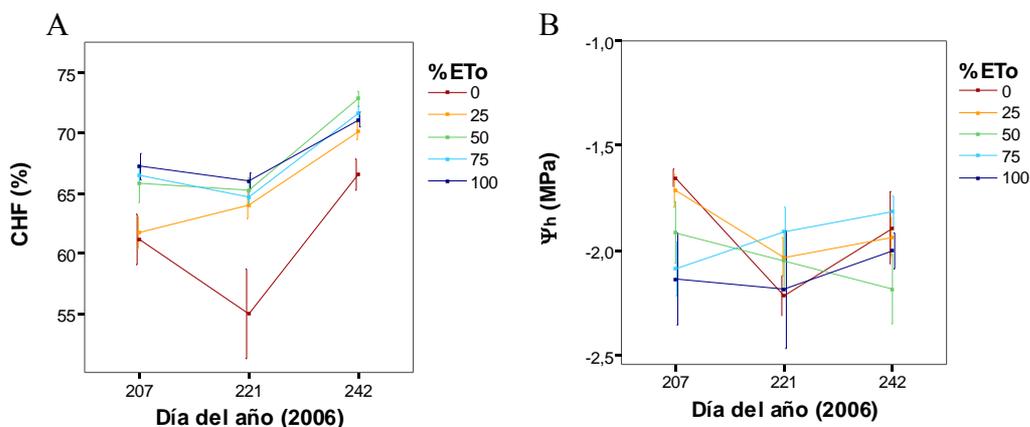
**Figura 3.1.7.- Medidas de intercambio gaseoso en *S. officinalis* con distintos tratamientos de riego a lo largo del verano de 2006.**

A: Tasa de fotosíntesis neta (A) al mediodía, B: Transpiración (E), C: Conductancia estomática ( $g_s$ ) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis (EUAi). Barras verticales  $\pm$ ES.

Los niveles de fotosíntesis fueron altos comparados con los años anteriores (Figs. 3.1.1., 3.1.3, 3.1.5). Las lluvias durante el invierno y la primavera fueron casi el doble que en 2005 (Anexo II) lo que posiblemente habría hecho posible la recuperación del cultivo, y en particular de las plantas cultivadas en secano.

Las medidas de  $E$  y  $g_s$  mantuvieron un comportamiento muy similar durante el verano (Fig. 3.1.7).

La eficiencia en el uso del agua fue algo más elevada en los tratamientos de mayor déficit principalmente al inicio y al final del verano. En el período de mayor déficit, por coincidencia de condiciones climáticas severas y niveles de humedad del suelo bajos (221 dda), la EUAi fue muy similar en todos los tratamientos.



**Figura 3.1.8.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de *S. officinalis* a lo largo del verano de 2006.**

A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico ( $\Psi_h$ , MPa). Barras verticales  $\pm$ ES.

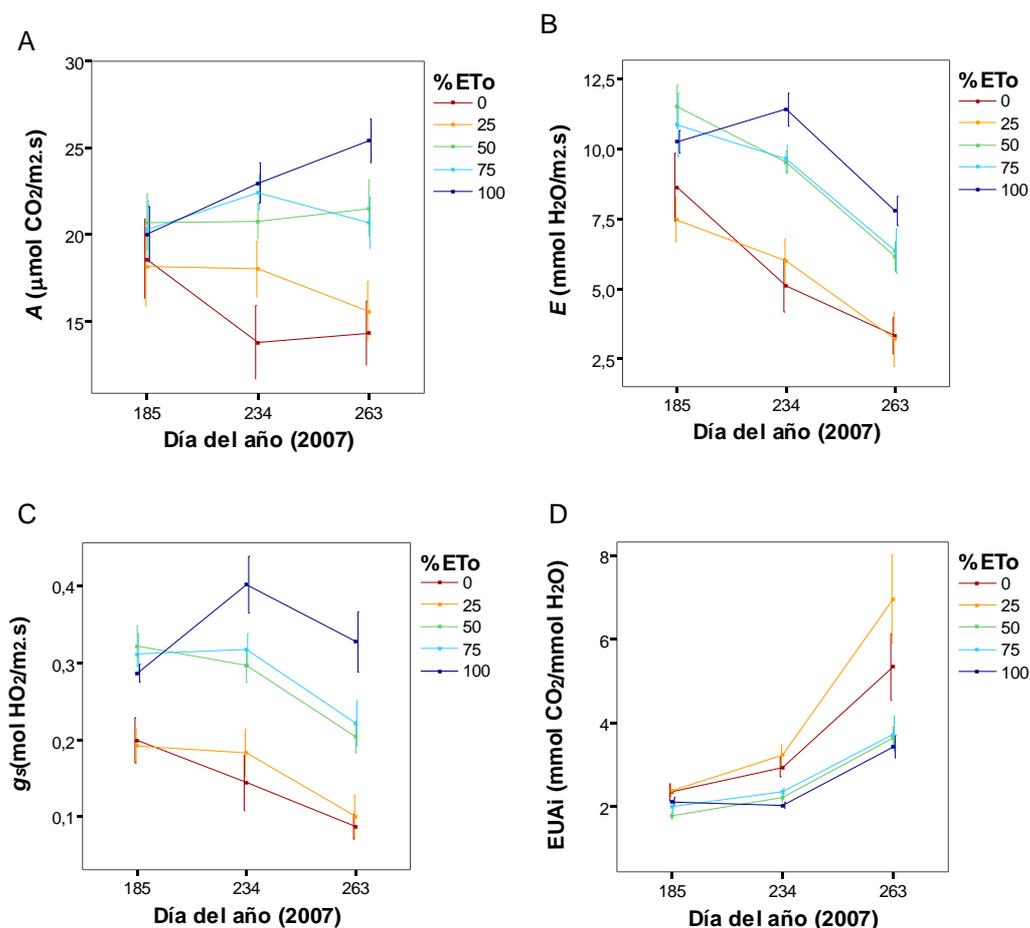
El contenido hídrico foliar disminuyó con el déficit hídrico, especialmente en el tratamiento de secano (Fig. 3.1.8), se observó un descenso notable en la medida de principio de agosto (221 dda). El resto de los tratamientos mantuvo CHF elevados, superiores al 65% durante la segunda mitad del verano (242 dda).

El potencial hídrico foliar en el verano de 2006 no mostró grandes diferencias entre los tratamientos de riego. Sólo se registraron diferencias estadísticamente significativas en la medida de  $\Psi_h$  realizada durante el mes de agosto, coincidiendo con las condiciones climáticas más severas del verano, entre el tratamiento de secano y el resto de los tratamientos de riego (Anexo V).

### Año 2007

La actividad fotosintética durante 2007 se vio afectada por el déficit hídrico especialmente en la segunda parte del verano (Fig. 3.1.9). Los valores registrados en los tratamientos de mayor déficit hídrico se distanciaron del resto en la medida de finales de agosto (234 dda) y mediados de septiembre (263 dda). Estos valores, en torno a  $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , fueron muy semejantes a los de veranos anteriores.

La transpiración descendió en todos los tratamientos a lo largo del verano, pero en los tratamientos de mayor déficit hídrico el descenso de  $E$  fue significativamente más acusado, manteniéndose en niveles por debajo de  $5 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Fig 3.1.9).



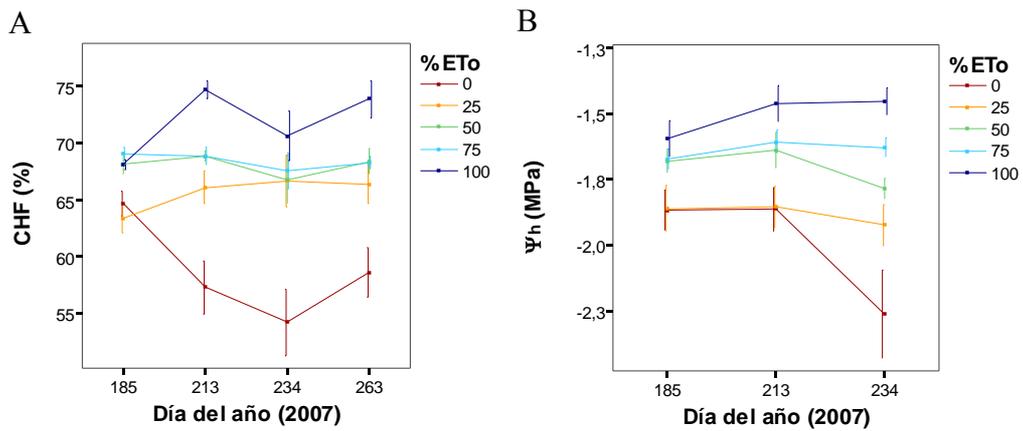
**Figura 3.1.9.- Medidas de intercambio gaseoso en plantas de *S. officinalis* a lo largo del verano de 2007.**

A: Tasa de fotosíntesis neta ( $A$ ) al mediodía, B: Transpiración ( $E$ ), C: Conductancia estomática ( $g_s$ ) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis ( $EUAI$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.

Las medidas de  $g_s$  tuvieron un comportamiento muy similar al de los años anteriores, aunque con la peculiaridad de que en todos los casos estuvo por debajo de  $0,4 \text{ moles H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

La EUAi aumentó con el transcurso del verano de un modo significativo (Fig. 3.1.9).

El CHF y el  $\Psi_h$  mostraron diferencias inducidas por las diferencias de riego (Fig. 3.1.9), con comportamientos similares a veranos anteriores. Los mayores descensos en CHF y  $\Psi_h$  se observaron a finales de agosto (234 dda), y en el tratamiento de secano se produjo el descenso más severo.



**Figura 3.1.10.- Medidas del contenido hídrico y potencial hídrico foliar en plantas de *S. officinalis* a lo largo del verano de 2007.**

A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico foliar ( $\Psi_h$ , MPa).

### 3.1.2.- *Salvia lavandulifolia*.

Las medias de intercambio gaseoso y relaciones hídricas realizadas al media día en *Salvia lavandulifolia* subsp. *vellerea* durante 3 años de cultivo, se representan en la Tabla 3.1.2 a modo de introducción.

En *Salvia lavandulifolia* la actividad fotosintética (A) descendió con el estrés hídrico producido por los tratamientos de riego deficitario. Estas diferencias fueron muy significativas y se produjeron principalmente entre tres grupos, el tratamiento de 100% ETo, los tratamientos intermedios (75, 50 y 25% ETo) y por último el secano (Tabla 3.1.2).

A lo largo del verano variaron las medias de A: los valores más altos se observaron en junio, en agosto disminuyó significativamente y en septiembre se recuperó algo.

**Tabla 3.1.2.- Medidas de intercambio gaseoso, contenido hídrico y potencial hídrico foliar en *Salvia lavandulifolia* durante el verano con distintos tratamientos de riego en los tres años estudiados (2005-07).**

	A	E	gs	EUAI	CHF	Ψ <sub>h</sub>
<b>ETo</b>	**	**	**	ns	**	ns
0 %	19,0 c	8,7 d	0,28 c	2,29	65,2 c	-1,2
25%	22,2 b	10,8 bc	0,35 b	2,13	67,0 b	-1,2
50%	23,5 b	10,5 c	0,38 b	2,41	67,8 b	-1,2
75%	23,7 b	11,2 b	0,35 b	2,15	68,4 ab	-1,2
100%	26,1 a	12,3 a	0,43 a	2,23	69,5 a	- 1,1
<b>Mes</b>	**	**	**	**	**	**
Junio	23,7 a	11,5 a	0,34 b	2,10 b	67,8 b	-
Agosto	22,1 b	11,4 a	0,34 b	2,05 b	65,5 c	-1,3 b
Septiembre	23,0 ab	9,14 b	0,39 a	2,58 a	69,4 a	-1,1 a
<b>Año</b>	**	**	**	**	**	*
2005	24,1 a	11,5 a	0,43 a	2,27 b	67,8 b	-1,1 a
2006	21,6 c	11,5 a	0,35 b	1,91 c	65,5 c	-1,2 ab
2007	22,9 b	9,3 b	0,30 c	2,55 a	69,4 a	-1,2 b
<b>ETo x Año</b>	**	**	ns	*	ns	ns
<b>Eto x mes</b>	*	**	*	**	**	ns
<b>Año x mes</b>	**	**	**	**	**	*
<b>Eto x año x mes</b>	**	**	ns	ns	**	ns

A, tasa de fotosíntesis neta ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); E, tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $g_s$ , conductancia estomática ( $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); EUAI, eficiencia en el uso del agua de la fotosíntesis ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol HO}_2$ ); CHF, contenido hídrico foliar (%); Ψ<sub>h</sub>, potencial hídrico (MPa).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

Durante los tres años de estudio de este cultivo se observó una variación significativa en las medias de fotosíntesis, el primer año (2005) se midieron los valores más altos de fotosíntesis, que descendieron en el segundo y tercer año de cultivo.

El déficit hídrico también produjo un descenso en la transpiración de *S. lavandulifolia*. En los distintos tratamientos de riego se registraron diferencias significativas en  $E$  entre los tratamientos de secano, regadío intermedio y regadío máximo (100% ETo). Los valores de  $E$  mostraron diferencias a lo largo del verano. Durante junio y agosto se mantuvieron estables pero en septiembre disminuyeron de manera significativa, descendiendo un 34% (Tabla 3.1.2). A lo largo de los años, los valores de transpiración del cultivo variaron de manera significativa. Durante los dos primeros años (2005 y 2006) se mantuvieron en niveles más elevados que en 2007 cuando la media de  $E$  disminuyó significativamente.

La conductancia estomática mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos de riego, disminuyendo cuando se acentuó el déficit hídrico. Se observaron tres grupos diferenciados: el secano mostró los valores más bajos de  $g_s$ , seguido de los tratamientos con menor riego y por último el tratamiento de 100% de ETo con la mayor apertura estomática (Tabla 3.1.2). La conductancia estomática mostró diferencias también a lo largo del verano y entre los diferentes años de estudio. En las medias de junio y agosto los valores de  $g_s$  fueron similares, y en septiembre se produjo un aumento en la apertura estomática de un 12%. La media de  $g_s$  de cada verano fue descendiendo con el tiempo, disminuyendo a medida que pasaron los años (Tabla 3.1.2). El primer año de cultivo se encontraron los niveles más altos de  $g_s$ .

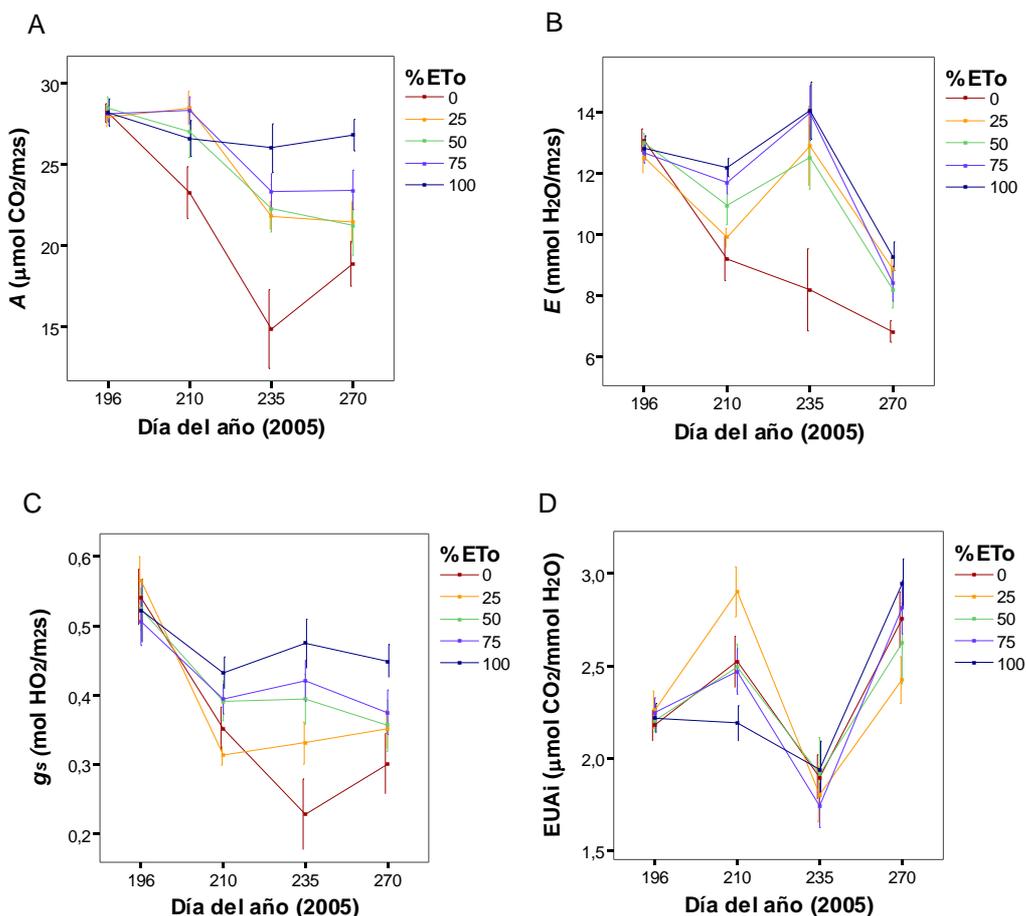
*Salvia lavandulifolia* no mostró diferencias en EUAi con diferente disponibilidad de agua, todos los tratamientos mantuvieron un comportamiento similar que rondó los 2,1-2,4  $\mu\text{moles CO}_2 / \text{mmol HO}_2$  (Tabla 3.1.2). En las distintas medidas tomadas a lo largo del verano aparecieron diferencias altamente significativas en EUAi en septiembre y la media de todos los tratamientos alcanzó 2.6  $\mu\text{moles CO}_2 / \text{mmol HO}_2$ .

El CHF descendió a medida que los tratamientos de riego reducían la disponibilidad de agua en el suelo (Tabla 3.1.2). Entre los tres meses estudiados existieron diferencias altamente significativas, y el CHF disminuyó a medida que los tratamientos de riego y las condiciones climáticas agravaban la intensidad del estrés (Tabla 3.1.2). Entre los años también se apreciaron diferencias significativas en el CHF, probablemente por la influencia de las condiciones climáticas específicas de cada año. Los valores más altos de contenido hídrico foliar se observaron en el último año estudiado (2007), con una media de 69.4% (Tabla 3.1.2).

El potencial hídrico foliar en *Salvia lavandulifolia* no mostró diferencias entre los tratamientos de riego aplicados y las medias ofrecieron valores muy semejantes (Tabla 3.1.2). Sí se observaron diferencias significativas en  $\Psi_h$  entre los distintos meses de verano, siendo agosto el mes donde se registraron los valores promedio más bajos.

### Año 2005

Durante el primer año (2005) la actividad fotosintética de *Salvia lavandulifolia* se redujo en el tratamiento de secano (Fig 3.1.11). En el resto de los tratamientos de riego,  $A$  descendió más lentamente con la disminución de los niveles de humedad de suelo y el aumento de DPV. En la última semana de agosto de 2005 las condiciones climáticas fueron especialmente adversas, con elevados DPV (Anexo I y II). En el tratamiento de 100% ETo se mantuvieron los valores de  $A$  algo más estables a lo largo del verano, siempre por encima de  $25 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .



**Figura 3.1.11. - Medidas de intercambio gaseoso en *Salvia lavandulifolia* a lo largo del verano de 2005.**

A: Tasa de fotosíntesis neta ( $A$ ) al mediodía, B: Transpiración ( $E$ ), C: Conductancia estomática ( $g_s$ ) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis (EUAi). Barras verticales  $\pm$ ES.

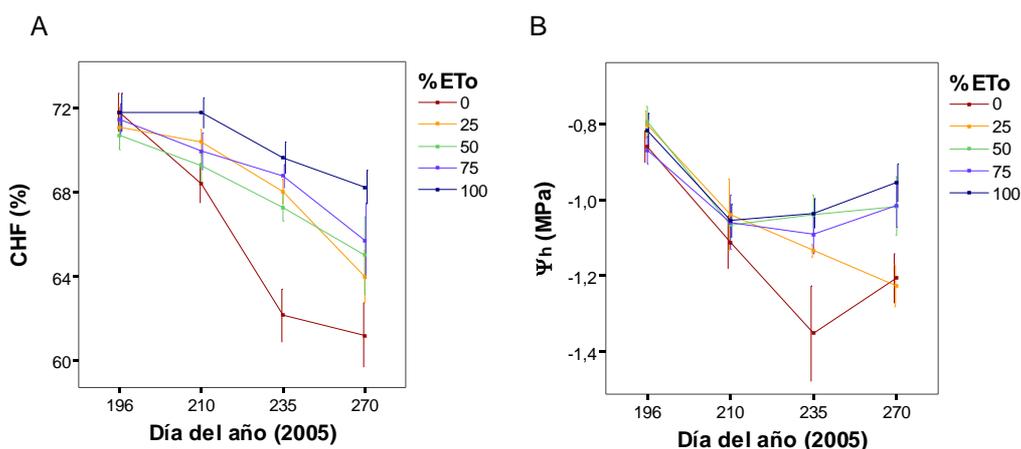
La transpiración disminuyó con el riego deficitario a lo largo del verano, salvo en la medida realizada a finales de agosto (235 dda), en la que se produjo un aumento generalizado de  $E$  en todos los tratamientos de riego a excepción del secano donde  $E$  continuó disminuyendo (Fig. 3.1.11). Este aumento de  $E$  en los tratamientos de riego está relacionado con un aumento del DPV que se produjo en ese período.

La conductancia estomática disminuyó en relación con el déficit hídrico provocado por los tratamientos (Fig. 3.1.11). Sufrió un descenso generalizado al inicio del verano y a partir de mediados de julio (210 dda),  $g_s$  se mantuvo estable con excepción del secano, en el que la conductancia continuó disminuyendo (Fig.3.1.11).

La eficiencia en el uso del agua presentó cambios importantes a lo largo del verano. En agosto (235 dda) la EUAi alcanzó el mínimo en todos los tratamientos.

El contenido de agua foliar fue sensible al cambio en la disponibilidad hídrica (Fig. 3.1.12), disminuyendo paulatinamente en todos los tratamientos de riego.

El potencial hídrico foliar disminuyó en un primer período del verano de manera similar en todos los tratamientos durante el mes de julio (210 dda), pero en una segunda parte del verano, a finales de agosto (235 dda), los tratamientos con menor dosis de agua se estabilizaron los valores de  $\Psi_h$  y sólo disminuyeron los tratamientos de mayor déficit (Fig. 3.1.12).



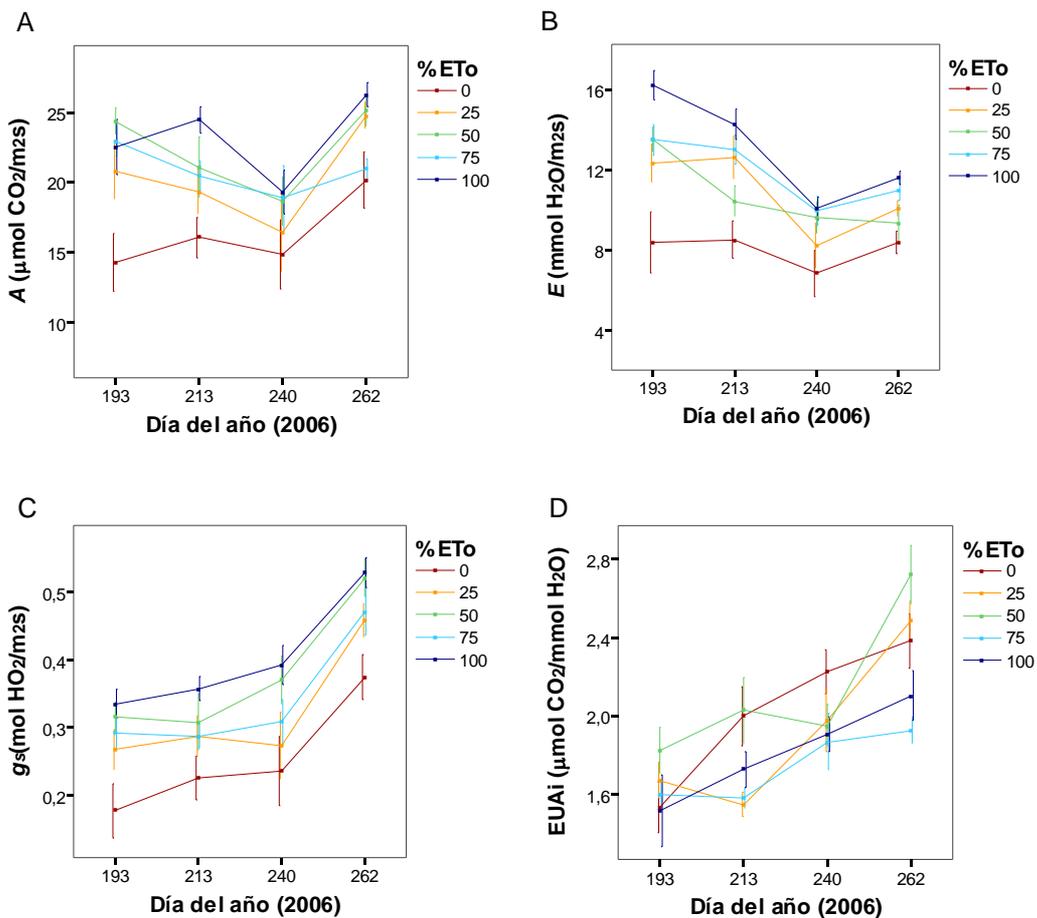
**Figura 3.1.12.- Medidas del contenido de agua y potencial hídrico foliar en *Salvia lavandulifolia* a lo largo del verano de 2005.**

A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico ( $\Psi_h$ , MPa). Barras verticales  $\pm$ ES.

## Año 2006

El déficit hídrico produjo un descenso de la actividad fotosintética en *Salvia lavandulifolia* como en el año precedente (Fig. 3.1.13) desde la primera medida realizada a mediados de julio (193 dda) y el efecto de los tratamientos de riego fue evidente.

La transpiración descendió de forma más o menos acusada, en todos los tratamientos con el transcurso del verano (Fig. 3.1.13). El descenso de  $E$  fue más acusado en los tratamientos de riego limitado. Los valores más bajos de  $E$  se registraron a finales de agosto (240 dda) y posteriormente se produjo una pequeña recuperación en todos los tratamientos (Fig. 3.1.13).

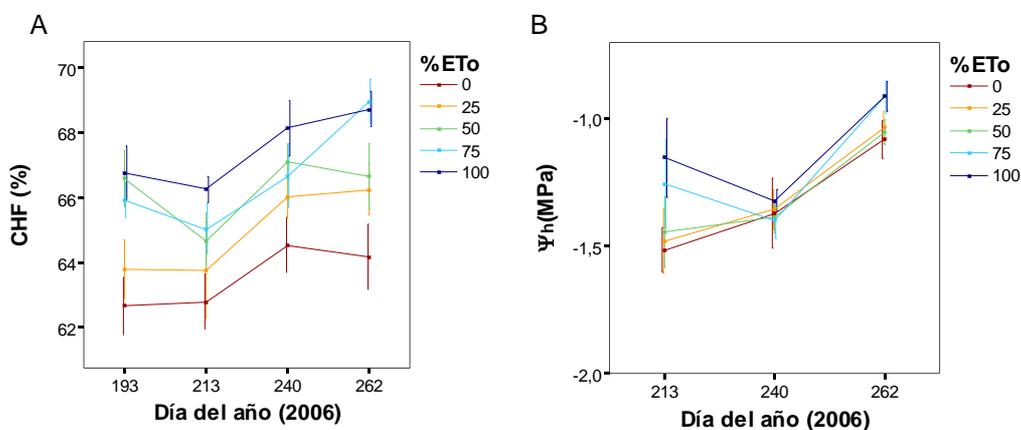


**Figura 3.1.13.- Medidas de intercambio gaseoso en *Salvia lavandulifolia* a lo largo del verano de 2006.**

A: Tasa de fotosíntesis neta ( $A$ ) al mediodía, B: Transpiración ( $E$ ), C: Conductancia estomática ( $g_s$ ) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis (EUAI). Barras verticales  $\pm$  ES.

A diferencia con el año anterior, la conductancia estomática se incremento a lo largo del verano en todos los tratamientos de riego (Fig. 3.1.13).

La eficiencia en el uso del agua aumentó a lo largo del verano, mostrando los valores más altos en los tratamientos con mayor déficit hídrico en el último período de la estación estival (Fig. 3.1.13).



**Figura 3.1.14.- Medidas del contenido de agua y potencial hídrico foliar en *Salvia lavandulifolia* a lo largo del verano de 2006.**

A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico ( $\Psi_h$ , MPa). Barras verticales  $\pm$ ES.

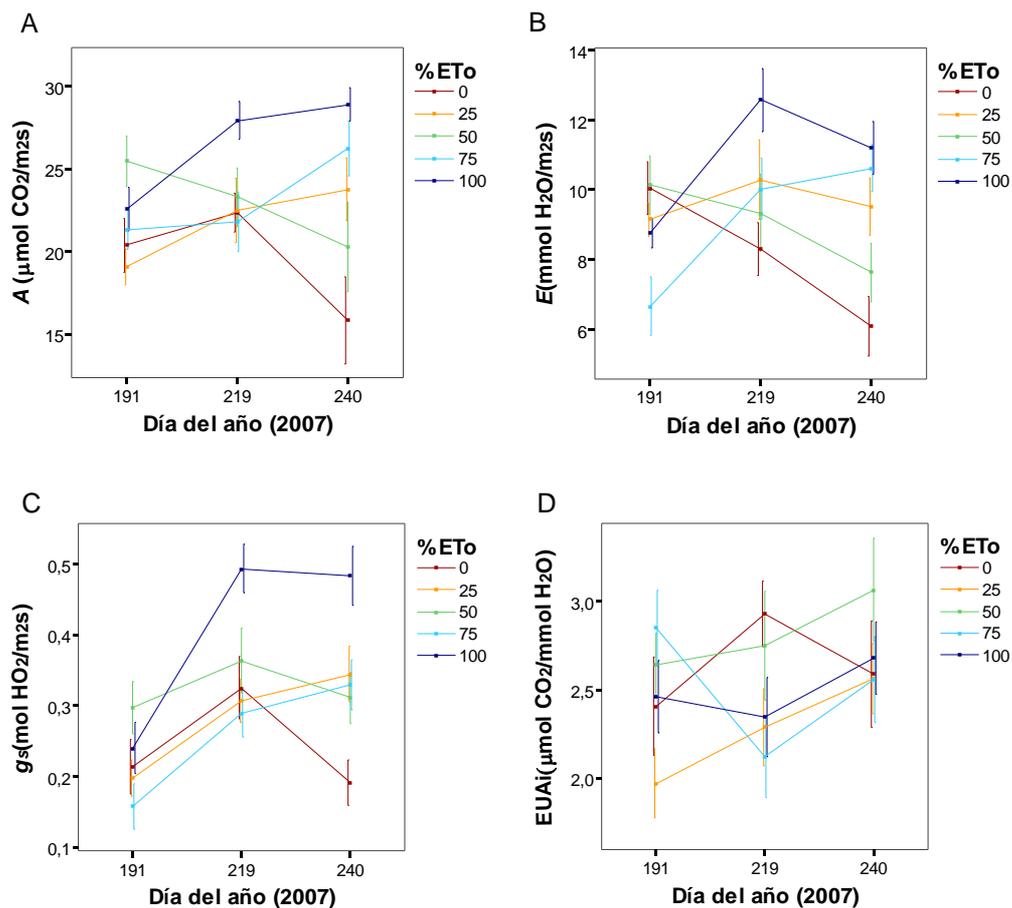
El contenido hídrico foliar se mostró muy sensible a la disponibilidad de agua en el terreno (Fig. 3.1.14), con diferencias significativas entre los tratamientos y con una tendencia al incremento a lo largo del verano, en contraste con el comportamiento del CHF del año precedente (Fig. 3.1.12).

El potencial hídrico mostró diferencias producidas por el régimen hídrico al inicio del verano (213 dda), pero estas diferencias entre tratamientos desaparecieron posteriormente. Los tratamientos de mayor déficit hídrico mostraron los valores más bajos de  $\Psi_h$ , semejantes a los del 2005, que se recuperaron a finales de agosto con las lluvias y la mejora de la climatología.

## Año 2007

La actividad fotosintética al inicio del verano no presentó diferencias entre los tratamientos de riego, pero descendió especialmente en los tratamientos deficitarios coincidiendo con las condiciones climáticas más extremas (a partir de 219 dda), cuando el descenso de humedad en el suelo descendió considerablemente (Anexo II). El tratamiento con máximo riego se diferenció del resto de los tratamientos durante todo el verano de manera significativa, rozando los  $28 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  durante el mes de agosto (Fig. 3.1.15).

La transpiración tuvo un comportamiento similar al de  $A$  (Fig. 3.1.15). Las mayores diferencias en  $E$  se observaron entre el tratamiento de mayor dosis de riego y el secano (Fig. 3.1.15).

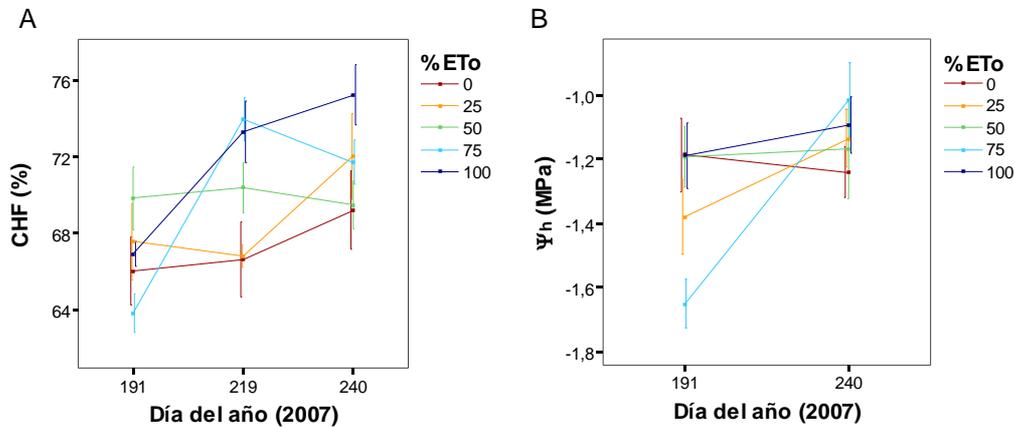


**Figura 3.1.15.-** Medidas de intercambio gaseoso en *Salvia lavandulifolia* a lo largo del verano de 2007.

A: Tasa de fotosíntesis neta ( $A$ ) al mediodía, B: Transpiración ( $E$ ), C: Conductancia estomática ( $g_s$ ) y D: Eficiencia en el uso del agua en la fotosíntesis (EUAi). Barras verticales  $\pm$ ES.

La conductancia estomática disminuyó con el déficit hídrico, y los valores más bajos de  $g_s$  se observaron en el secano a finales de agosto (Fig. 3.1.15).

La EUAi no mostró diferencias claras producidas por el déficit hídrico, siendo la relación de  $\text{CO}_2$  fijado y agua perdida similar durante todo el verano en todos los tratamientos (Fig. 3.1.15).



**Figura 3.1.16.- Medidas del contenido de agua y potencial hídrico foliar en *Salvia lavandulifolia* a lo largo del verano de 2007.**

A: Contenido hídrico foliar (CHF, %), B: Potencial hídrico ( $\Psi_h$ , MPa). Barras verticales  $\pm$ ES.

El contenido hídrico foliar en el tercer año de cultivo (2007) de *S. lavandulifolia* se mantuvo en valores altos, que no descendieron en ningún caso del 64% (Fig. 3.1.16), y como en el año anterior el CHF aumentó de forma más o menos significativa a lo largo del verano con excepción del tratamiento de 50% de ETo.

En 2007 sólo se obtuvieron medidas de potencial hídrico en julio y agosto. A principios de julio (191 dda) existieron diferencias en el  $\Psi_h$  que desaparecieron a finales de agosto (240 dda) (Fig. 3.1.16).

### 3.2.- Análisis de regresión entre los parámetros de intercambio gaseoso.

#### 3.2.1.- *Salvia officinalis*.

En *Salvia officinalis* la relación entre los parámetros de intercambio gaseoso, actividad fotosintética, transpiración y conductancia estomática, resultó elevada y significativa. Considerando tres medidas anuales efectuadas en los veranos desde 2003 a 2007, los coeficientes de correlación lineal que se determinaron fueron: para  $A$  vs.  $g_s$ ,  $r = 0,825$ ; para  $E$  vs.  $g_s$ ,  $r = 0,845$ ; para  $A$  vs.  $E$ ,  $r = 0,844$  ( $P \leq 0,01$ ).

La relación entre los parámetros de intercambio gaseoso mostró diferentes ajustes para cada tratamiento. Los resultados demuestran que en situaciones de estrés hídrico, bajo los tratamientos de menor aporte hídrico (secano y 25% de ETo), el ajuste de la regresión lineal entre  $A$ - $g_s$ ,  $E$ - $g_s$ ,  $A$ - $E$  fue mucho mayor que en los tratamiento de mayor riego (Figs. 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3), donde la relaciones estarían mejor representadas por funciones no lineales.

Del mismo modo se comportaron las pendientes de la regresión, que en el caso de los tratamientos de mayor déficit hídrico fueron mayores (Fig 3.2.1).

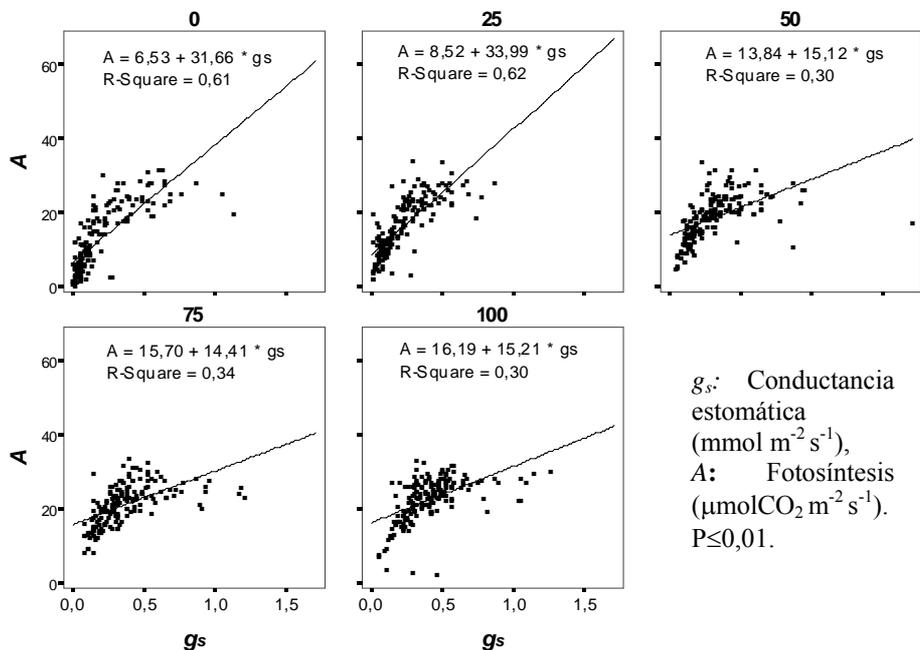


Figura 3.2.1.- Relación entre  $A$  y  $g_s$  en *S. officinalis*.

Las ecuaciones de regresión en el caso de la relación entre transpiración y conductancia,  $E$  vs.  $g_s$ , mostraron resultados similares a los de  $A$  vs.  $g_s$ , pero en general con pendientes más bajas (Fig. 3.2.2).

Las relaciones entre  $E$  y  $A$  (Fig. 3.2.3) permiten analizar las variaciones que se produjeron en la eficiencia en el uso del agua en cada uno de los tratamientos. Se comprueba que en secano y en riego limitado (25 y 50 % de ETo) (Fig. 3.2.3), la relación es más estrecha y la pendiente de la recta es mayor que en los tratamientos de riego abundante.

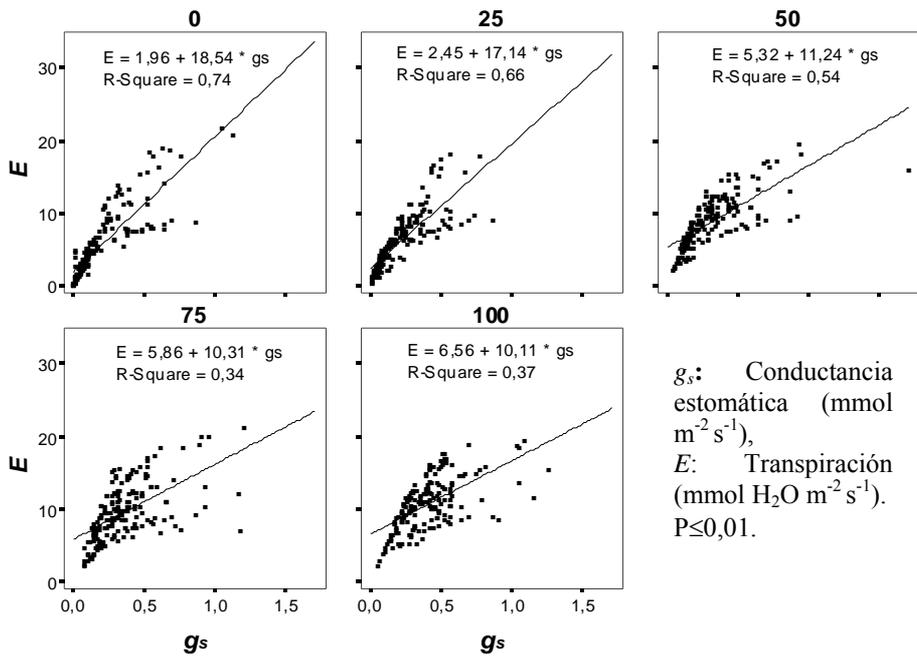
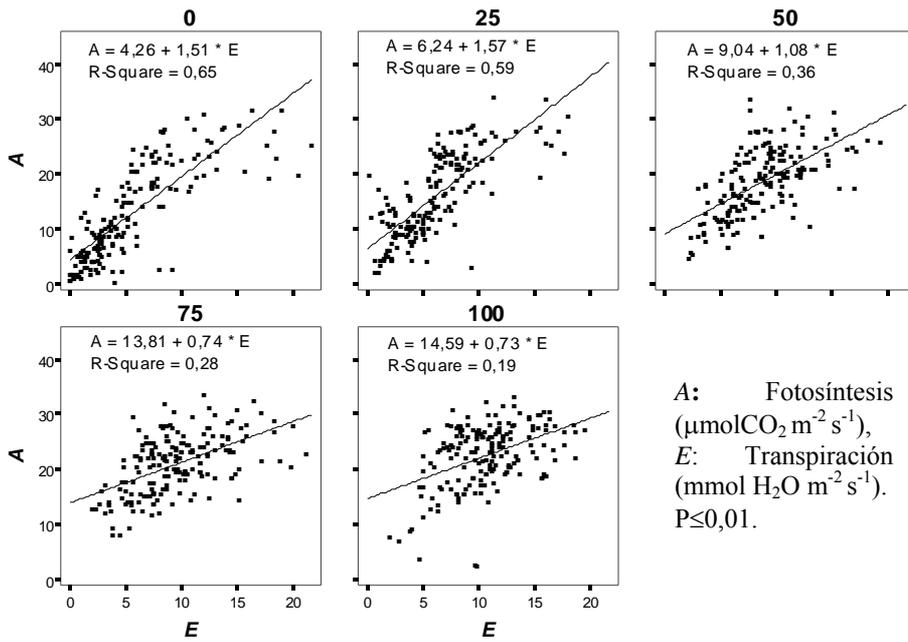


Figura 3.2.2.- Relación entre  $E$  y  $g_s$  en *S. officinalis*.



**Figura 3.2.3.-** Relación entre *A* y *E* en *S. officinalis*.

### 3.2.2.- *Salvia lavandulifolia*.

En esta especie la relación entre los parámetros de intercambio gaseoso ( $A$ ,  $E$  y  $g_s$ ) resultó significativa, aunque menor que en *S. officinalis*: los coeficientes de correlación determinados fueron para  $A$  vs.  $g_s$ ,  $r = 0,649$ ; para  $E$  vs.  $g_s$ ,  $r = 0,706$ ; para  $A$  vs.  $E$ ,  $r = 0,480$  ( $P \leq 0,01$ ).

El análisis de regresión de los parámetros de intercambio gaseoso mostró un menor ajuste en general (Figs. 3.2.4, 3.2.5 y 3.2.6). Se observa en condiciones de mayor déficit (secano, 25 y 50% de ETo) las relaciones entre  $A$ -  $g_s$ ,  $E$ -  $g_s$  y  $A$ - $E$  tienen una mayor pendiente y un mayor ajuste como ocurriera en *S. officinalis*.

El menor ajuste en la asociación entre  $A$  y  $g_s$  ó  $E$  y  $g_s$  sugiere una menor dependencia de fotosíntesis y transpiración del comportamiento estomático, y la influencia de otros factores no considerados en este trabajo, como las diferencias en área y morfología foliar entre ambas especies, o bien la mayor variabilidad intrínseca en el material vegetal de *S. lavandulifolia*. Es interesante destacar las diferencias entre ambas especies en la relación entre  $A$  y  $E$ , como medida de la eficiencia en el uso del agua (Figs. 3.2.3 y 3.2.6), y entre  $A$  y  $g_s$  (Figs. 3.2.1 y 3.2.4), principalmente en riegos superiores a 25% de ETo, donde la ordenada en el origen y la pendiente difieren sustancialmente entre especies.

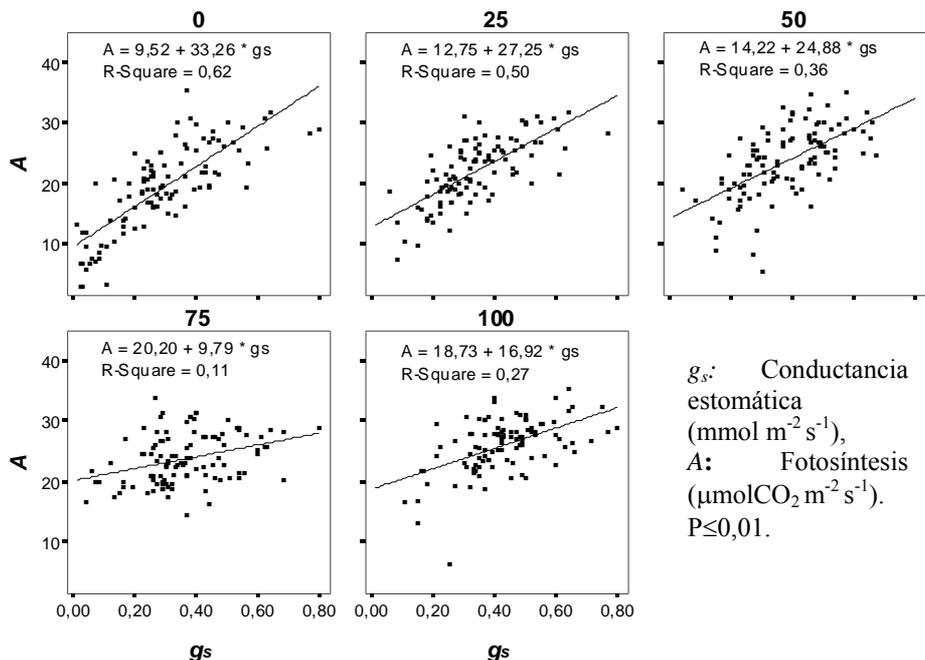


Figura 3.2.4.- Relación entre  $A$  y  $g_s$  en *S. lavandulifolia*.

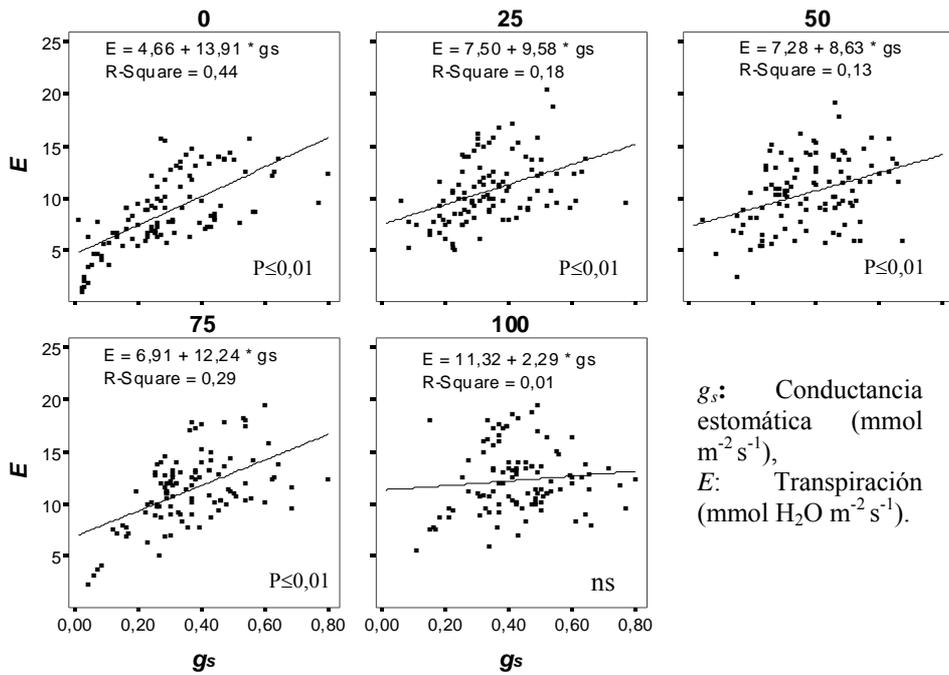


Figura 3.2.5.- Relación entre  $E$  y  $g_s$  en *S. lavandulifolia*.

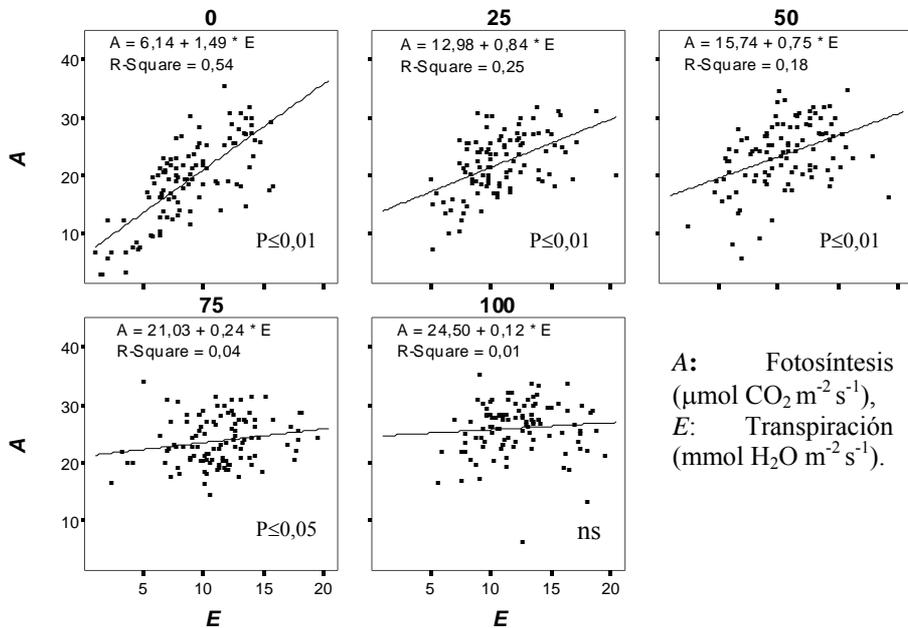


Figura 3.2.6.- Relación entre  $A$  y  $E$  en *S. lavandulifolia*.



### 3. 3. Efecto del déficit hídrico en la producción del cultivo.

#### 3.3.1. *Salvia officinalis*.

El análisis de las variaciones de la producción de *S. officinalis* en distintos años de cultivo y dos estaciones de recolección nos permitió determinar el efecto del riego sobre diferentes parámetros productivos como acumulación de biomasa y rendimiento en aceite esencial.

Se apreciaron diferencias en la producción de peso fresco, materia seca y en el rendimiento de aceite esencial, por unidad de biomasa y por hectárea, al avanzar las recolecciones en el tiempo (Tabla 3.3.1).

**Tabla 3.3.1.- Efecto de los tratamientos de riego, años de cultivo y estaciones de recolección sobre la producción de biomasa y aceite esencial en *S. officinalis*.**

	<b>Peso fresco (t.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Peso seco (t.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>RAEp (ml.kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>RAEs (L.ha<sup>-1</sup>)</b>
<b>Año</b>	**	**	**	**
2004	8,0 a	2,9 c	7,8 c	22,1 c
2005	38,8 b	11,0 a	7,6 c	76,8 a
2006	15,4 b	4,4 b	9,1 b	46,3 b
2007	8,4 c	2,4 c	11,4 a	29,5 c
<b>ETo</b>	ns	ns	ns	ns
0 %	13,3	3,4	9,1	32,7
25%	16,4	5,0	8,4	40,1
50%	19,3	5,6	8,5	44,4
75%	18,6	5,4	9,0	46,1
100%	20	6,1	9,9	55,1
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	ns	ns
<b>Estación</b>	ns	**	ns	**
Primavera	17,2	4,1 b	10,2 a	43,1
Otoño	18,2	6,3 a	7,8 b	44,2
<b>ETo x estación</b>	ns	ns	ns	ns
<b>Año x estación</b>	**	**	**	**
<b>ETo x año x estación</b>	ns	ns	ns	ns

Producción de biomasa en peso fresco y seco, rendimiento de aceite esencial por unidad de peso seco (RAEp) y por unidad de superficie (RAEs).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

El cultivo alcanzó su máximo productivo en el tercer año, en 2005, cuando se obtuvieron los valores más altos de producción, que disminuyeron en los años posteriores. No se tuvieron en cuenta en este análisis los datos del primer año (2003).

El rendimiento en aceite esencial por unidad de biomasa fue el único parámetro que aumentó de manera sostenida con los años, y en el último año (2007) se observaron los mayores rendimientos (Tabla 3.3.1).

El rendimiento en peso fresco y seco de la biomasa y del aceite esencial no varió por efecto de los tratamientos de riego en la media de los años 2004-2007 (Tabla 3.3.1), aunque sí hubo pequeñas oscilaciones entre recolecciones, como ligeros aumentos en la cosechas de primavera.

En los componentes del rendimiento no existió interacción entre tratamientos de riego y año, ni entre tratamientos y estación. Ahora bien, sí se observaron interacciones entre el año y las estaciones.

La eficiencia en el uso del agua del cultivo (Fig. 3.3.2) mostró diferencias entre los diferentes años estudiados, y fue en 2005 cuando se observaron las mayores eficiencias tanto en la producción de biomasa (peso fresco y seco) como en los rendimientos del aceite esencial. En el año 2005 se puede considerar que el cultivo alcanzó su máximo productivo, y la eficiencia en el uso del agua también fue la más alta en este período (Tabla 3.3.2).

Los distintos tratamientos determinaron diferencias en la eficiencia del uso del agua de la producción, y el cultivo en secano destacó por tener una mayor eficiencia, significativamente distinta del resto de los tratamientos de riego (Tabla 3.3.2).

En el caso de las estaciones sólo se observó un comportamiento diferenciado en la eficiencia en el uso de agua de la materia seca y el rendimiento en aceite esencial por unidad de biomasa. En este caso las cosechas de otoño fueron más eficientes en la producción de biomasa y aceite por unidad de agua aportada al cultivo (Tabla 3.3.2).

La eficiencia en el uso del agua del cultivo sí mostró interacciones entre el tratamiento de riego y el año, entre la estación y el año y entre el tratamiento, la estación y el año (Tabla 3.3.2).

**Tabla 3.3.2.- Efecto de los tratamientos de riego, años de cultivo y estación de recolección sobre la eficiencia en el uso del agua del cultivo de *S. officinalis*.**

	<b>EUA pf</b>	<b>EUA ps</b>	<b>EUA AEp</b>	<b>EUA AEs</b>
<b>Año</b>	**	**	**	**
2004	0,06 b	7,2 b	0,024 c	17,3 b
2005	0,42 a	65,7 a	0,048 a	224,3 a
2006	0,14 b	12,9 b	0,028 bc	45,6 b
2007	0,6 b	5,8 b	0,030 b	18,9 b
<b>ETo</b>	**	**	**	**
0 %	0,34 a	50,3 a	0,066 a	151,8 a
25%	0,16 b	21,5 b	0,029 b	72,1 b
50%	0,14 b	17,0 b	0,023 bc	61,3 b
75%	0,12 b	13,2 b	0,021 c	49,4 b
100%	0,12 b	12,7 b	0,022 bc	49,0 b
<b>ETo x Año</b>	**	**	**	**
<b>Estación</b>	ns	**	**	ns
Primavera	0,14	13,7 b	0,029 b	60,8
Otoño	0,21	32,1 a	0,035 a	92,3
<b>ETo x estación</b>	**	**	**	**
<b>Año x estación</b>	**	**	**	**
<b>ETo x año x estación</b>	**	**	**	**

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AEp, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AEs, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).  
 \*\*:P≤0,01, \*:P≤0,05 y ns: diferencias no significativas.

## Otoño

El análisis por separado de las recolecciones de cada año en otoño mostró claras variaciones en la producción del cultivo debidas al riego (Tabla 3.3.3). El déficit hídrico supuso una disminución significativa de las producciones desde 2003 a 2007. En secano, esta variación llegó a suponer un descenso de un 44,4% de la producción de peso fresco, un 53,4% en materia seca y un 60,3% en el volumen de aceite esencial por hectárea.

El rendimiento en aceite esencial por unidad de biomasa no sufrió variaciones por el efecto del déficit hídrico (Tabla 3.3.3).

El cultivo de *S. officinalis* mostró en el año 2005 las mayores producciones de peso fresco, materia seca y aceite esencial por hectárea.

El rendimiento en aceite esencial por unidad de biomasa también varió en los años estudiados, en 2004 se observó un primer aumento y un nuevo repunte en 2007. En 2005, el rendimiento en aceite esencial fue el más bajo de los años estudiados (Tabla 3.3.3) coincidiendo con las medias de producción de biomasa más altas.

**Tabla 3.3.3.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo durante las recolecciones de otoño sobre la producción de *S. officinalis***

	Peso fresco (t.ha <sup>-1</sup> )	Peso seco (t.ha <sup>-1</sup> )	RAEp (ml.kg <sup>-1</sup> )	RAEs (L.ha <sup>-1</sup> )
<b>ETo</b>	**	**	**	ns
0 %	9,6 c	3,4 c	22,4 d	7,3
25%	14,2 bc	4,9 bc	29,6 cd	6,6
50%	18,6 ab	6,2 ab	43,4 b	7,7
75%	18,1 ab	6,2 ab	42,1 bc	7,2
100%	21,6 a	7,3 a	56,9 a	8,2
<b>Año</b>	**	**	**	**
2003	9,6 b	2,7 b	17,6 bc	6,1 c
2004	6,7 b	4,0 b	31,5 b	8,4 b
2005	50,3 a	16,7 a	106,1 a	6,1c
2006	9,0 b	2,1 b	13,4 c	6,2 c
2007	6,6 b	2,2 b	25,8 bc	10,4 a
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	ns	**

Producción de biomasa en peso fresco y seco, rendimiento de aceite esencial por unidad de peso seco (RAEp) y por unidad de superficie (RAEs).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

La eficiencia en el uso del agua mostró diferencias con la dosis de agua aportada, y en el tratamiento de secano se alcanzaron mayores tasas de eficiencia en el uso del agua en la mayoría de los parámetros estudiados (Tabla 3.3.4). En las plantas de secano se alcanzaron elevados niveles de biomasa y aceite esenciales, diferenciados estadísticamente con respecto a los tratamientos de riego. Los valores más bajos de eficiencia se observaron en el tratamiento de 100% de ETo.

La eficiencia en el uso del agua aumentó de manera paulatina hasta alcanzar el máximo en 2005 en todos los parámetros productivos, para posteriormente disminuir. Existieron interacciones entre los tratamientos de riego y los diferentes años de cultivo.

**Tabla 3.3.4.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la eficiencia en el uso del agua en la producción de biomasa y aceite esencial del cultivo de *S. officinalis* para las recolecciones de otoño.**

	<b>EUA pf</b>	<b>EUA ps</b>	<b>EUA AEp</b>	<b>EUA AEs</b>
<b>ETo</b>	**	**	**	**
0 %	206,0 a	73,0 a	0,09 a	0,46 a
25%	68,2 b	23,4 b	0,03 b	0,14 b
50%	50,8 b	16,9 b	0,02 c	0,12 b
75%	34,3 b	11,6 b	0,01 c	0,08 b
100%	31,2 b	10,6 b	0,01 c	0,08 b
<b>Año</b>	**	**	**	**
2003	21,4 b	6,9 b	0,02 c	0,04 b
2004	21,3 b	12,0 b	0,05 b	0,10 b
2005	301,3 a	103,0 a	0,05 a	0,62 a
2006	28,3 b	6,9 b	0,02 c	0,04 b
2007	18,1 b	6,7 b	0,04 b	0,69 b
<b>ETo x Año</b>	**	**	**	**

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AEp, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AEs, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

## Primavera

En los valores de rendimiento no se observaron diferencias provocadas por los tratamientos de riego recibidos en el verano anterior (Tabla 3.3.5.). Se apreció una recuperación en el cultivo del déficit hídrico sufrido, tras la mejora de las condiciones climáticas y las precipitaciones invernales.

Sí se apreciaron diferencias entre los distintos años en las producciones de primavera, y en 2005 y 2006 se observaron los mayores valores de producción del cultivo (Tabla 3.3.5).

El rendimiento en aceite esencial por unidad de biomasa tuvo un comportamiento diferente, y aumentó cada primavera de manera paulatina, alcanzando en la primavera de los años 2005 y 2006 valores más elevados. La mayor producción de aceite esencial pudo deberse a la presencia de flores en la recolección primaveral, pero las floraciones más importantes se registraron en los años 2004 y 2005. No se apreciaron interacciones entre los tratamientos de riego y los distintos años de cultivo (Tabla 3.3.5).

La eficiencia en el uso del agua del cultivo varió con el transcurso de los años, alcanzando los valores más elevados en 2005 (Tabla 3.3.6).

**Tabla 3.3.5.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la producción de biomasa y aceite esencial de *S. officinalis* para las recolecciones de primavera.**

	Peso fresco (t.ha <sup>-1</sup> )	Peso seco (t.ha <sup>-1</sup> )	Rend. ae (L.ha <sup>-1</sup> )	Rend. ae (ml.kg <sup>-1</sup> )
<b>ETo</b>	ns	ns	ns	ns
0 %	15,2	3,5	39,0	10,5
25%	16,5	4,2	46,0	9,0
50%	17,7	4,1	38,7	8,9
75%	17,7	4,0	44,5	10,3
100%	18,6	4,2	47,4	11,2
<b>Año</b>	**	**	**	**
2004	9,3 c	1,8 c	12,6 c	7,2 c
2005	27,3 a	5,3 b	47,5 b	9,1 b
2006	21,8 b	6,6 a	79,3 a	12,0 a
2007	10,2 c	2,6 c	33,1 b	12,5 a
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	ns	ns

Producción de biomasa en peso fresco y seco, rendimiento de aceite esencial por unidad de peso seco (RAEp) y por unidad de superficie (RAEs).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

La eficiencia en el uso del agua por parte del cultivo no mostró diferencias como consecuencia de los distintos tratamientos hídricos (Tabla 3.3.6). Los valores medios se mostraron algo más elevados en los tratamientos de mayor dosis de agua aportada en verano, pero no existieron diferencias estadísticas significativas. Tampoco se apreciaron interacciones en la EUA entre el tratamiento y los diferentes años del estudio (Tabla 3.3.6).

**Tabla 3.3.6.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la eficiencia en el uso del agua para la producción de biomasa y aceite esencial del cultivo de *S. officinalis* en las recolecciones de primavera.**

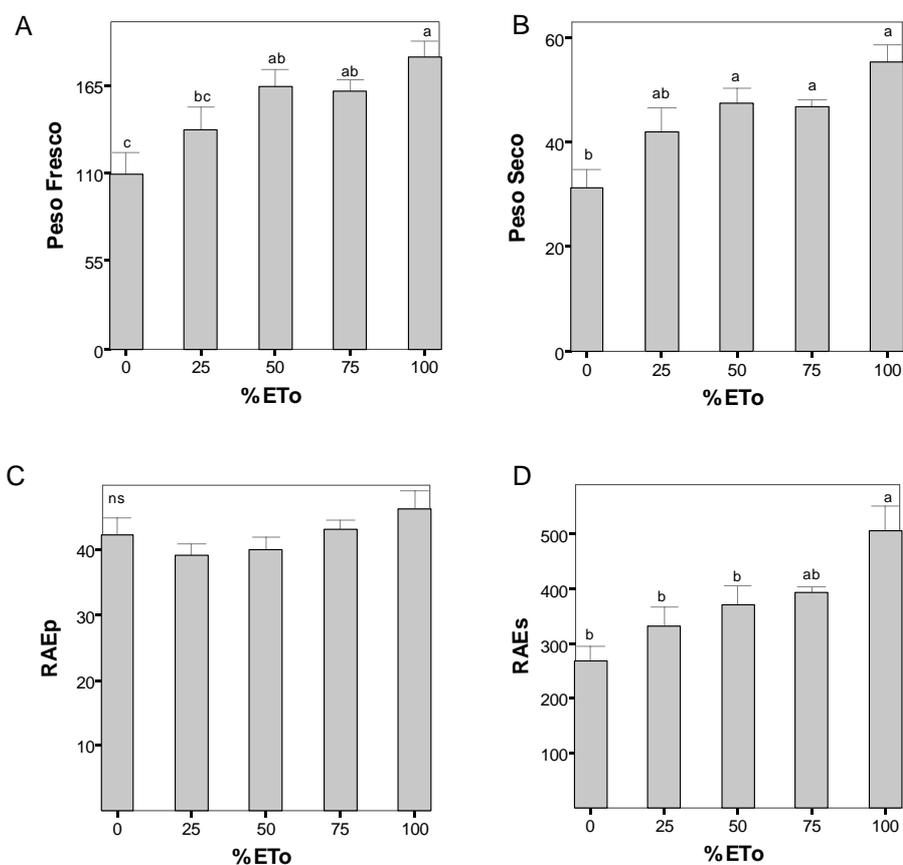
	<b>EUA<sub>pf</sub></b>	<b>EUA<sub>ms</sub></b>	<b>EUA<sub>AEp</sub></b>	<b>EUA<sub>AEs</sub></b>
<b>E<sub>To</sub></b>	ns	ns	ns	ns
0 %	51,1	11,5	0,03	0,12
25%	62,4	15,5	0,03	0,15
50%	64,4	14,6	0,03	0,14
75%	61,1	13,3	0,03	0,15
100%	64,9	13,8	0,03	0,15
<b>Año</b>	**	**	**	**
2004	13,3 c	2,6 c	0,01 d	0,02 b
2005	147,2 a	28,3 a	0,05 a	0,25 a
2006	62,9 b	19,0 b	0,04 b	0,23 a
2007	19,7 c	5,0 c	0,02 c	0,06 b
<b>E<sub>To</sub> x Año</b>	ns	ns	ns	ns

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AE<sub>p</sub>, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AE<sub>s</sub>, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

## Balance de producción total

La producción total de biomasa (fresca y seca) de *S. officinalis* recolectada en cada uno de los tratamientos en los cinco años estudiados mostró un incremento paulatino con el aumento de la dosis de agua aplicada al cultivo, respondiendo al riego con una tendencia lineal (Fig. 3.3.1). Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de secano y riegos superior a 25% ETo. Pero no existieron diferencias significativas entre tratamientos, por encima del tratamiento de 50% de ETo.



**Figura 3.3.1.- Producción total del cultivo durante el período 2003-2007 en *S. officinalis*.**

A: producción de peso fresco (t.ha<sup>-1</sup>), B: producción de peso seco (t.ha<sup>-1</sup>), C: rendimiento de aceite esencial por kg de materia seca (ml.kg<sup>-1</sup>), y D: rendimiento de aceite esencial por hectárea (L.ha<sup>-1</sup>) para cada uno de los tratamientos (P<0,05), NS: diferencias no significativas.

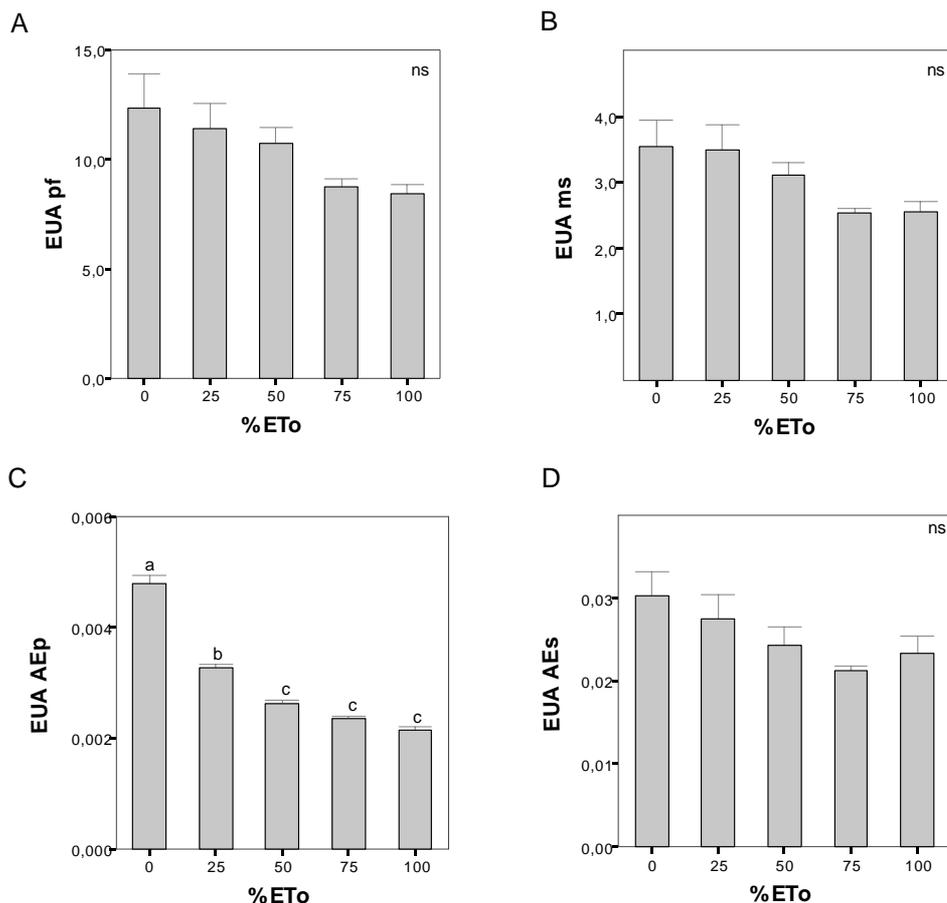
P≤0,05 y ns: diferencias no significativas.

El rendimiento en aceite esencial por unidad de biomasa no varió con los distintos tratamientos de riego (Fig. 3.3.1). En otras palabras, la producción de aceite esencial no fue dependiente del régimen hídrico en el que se desarrolló el cultivo. Sin embargo, el rendimiento

en aceite esencial total por unidad de superficie sí respondió a los tratamientos, aumentando de manera significativa cuando el riego se incrementaba por encima del 50% de la ETo (Fig. 3.3.1).

Como se puede observar en la Fig. 3.3.2. existió una tendencia al incremento de la eficiencia en el uso del agua para la producción de peso fresco, seco y de aceite esencial por hectárea con el déficit hídrico.

Los tratamientos si afectaron de modo significativo la eficiencia en el uso del agua para el rendimiento de aceite esencial por unidad de biomasa. El secano resultó ser el tratamiento más eficiente, seguido del 25% de ETo y por último los tratamientos de mayor riego entre los cuales no se observaron diferencias.



**Figura 3.3.2.- Eficiencia en el uso del agua del cultivo durante el período 2003-2007 en *S. officinalis*.**

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AEp, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AEs, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).  $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

### 3.3.2.- *Salvia lavandulifolia*.

El distinto nivel de disponibilidad hídrica determinado por los tratamientos de riego no tuvo ningún efecto en la producción de *Salvia lavandulifolia* (Tabla 3.3.7).

Se encontraron diferencias en la producción de biomasa fresca entre los dos años de ensayo (Tabla 3.3.7), pero la producción de biomasa seca, sin embargo, no presentó diferencias entre los dos años. La producción de aceite esencial fue superior en 2007, de manera muy significativa, siendo este año superior tanto el rendimiento de aceite esencial por unidad de biomasa como por superficie.

El análisis de las recolecciones estacionales mostró mayor producción en primavera, con un aumento muy significativo de peso fresco (Tabla 3.3.7). Posiblemente el mayor contenido de humedad de la biomasa en esta época, tanto por las condiciones climáticas como la presencia de flores, pudieron ser responsables de estas diferencias, ya que no se reflejaron en peso seco. En peso seco y rendimiento en aceite esencial por unidad de biomasa no se

**Tabla 3.3.7.- Efecto de los tratamientos de riego, los años de cultivo y las estaciones de recolección sobre la producción de *S. lavandulifolia*.**

	<b>Peso fresco (t.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Peso seco (t.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>RAEp (ml.kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>RAEs (L.ha<sup>-1</sup>)</b>
<b>Año</b>	**	ns	**	**
2006	11,8 a	3,0	19,1 b	54,5 b
2007	3,6 b	2,6	51,5 a	130,6 a
<b>ETo</b>	ns	ns	ns	ns
0 %	9,2	2,9	33,9	91,1
25%	7,9	3,2	30,9	112,9
50%	7,7	3,1	38,2	102,7
75%	7,1	2,5	36,6	70,7
100%	6,7	2,4	36,8	85,2
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	ns	ns
<b>Estación</b>	**	ns	*	ns
Primavera	9,9 a	3,1	32,5 b	93,5
Otoño	5,6 b	2,5	38,0 a	91,6
<b>ETo x estación</b>	ns	*	ns	ns
<b>Año x estación</b>	**	ns	**	**
<b>ETo x año x estación</b>	ns	ns	ns	ns

Producción de biomasa en peso fresco y seco, rendimiento de aceite esencial por unidad de peso seco (RAEp) y por unidad de superficie (RAEs).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

encontraron diferencias entre las recolecciones de primavera y otoño, a pesar de que en primavera el cultivo se encontraba en floración, el rendimiento en aceite no mostró diferencias en los dos años estudiados (Tabla 3.3.7). El rendimiento en aceite esencial por hectárea sí mostró diferencias en las recolecciones de otoño y primavera, siendo más alto en otoño (Tabla 3.3.7).

Existió interacción entre el efecto del tratamiento de riego y el mes en la recolección en la producción de materia seca, así como entre el año y la recolección en la producción de materia fresca y en los rendimientos en aceite esencial por unidad de biomasa y por superficie (Tabla 3.3.7).

La eficiencia en el uso del agua del cultivo para la producción de biomasa fresca (EUA pf) (Tabla 3.3.8) resultó significativamente mayor en 2006 mientras que para la producción de biomasa seca fue algo superior en 2006 pero el análisis no reveló diferencias significativas con el año 2007 (Tabla 3.3.8).

**Tabla 3.3.8.- Efecto de los tratamientos de riego, años de cultivo y estación de recolección sobre la eficiencia en el uso del agua para producción de biomasa y aceite esencial en el cultivo de *S. lavandulifolia*.**

	<b>EUA pf</b>	<b>EUA ps</b>	<b>EUA AEp</b>	<b>EUA AEs</b>
<b>Año</b>	**	ns	**	**
2006	35,9 a	9,1	0,06b	0,17 b
2007	9,8 b	7,1	0,15a	0,36 a
<b>ETo</b>	**	**	**	**
0 %	40,9 a	13,8a	0,22 a	0,47 a
25%	23,8 b	9,3 b	0,09 b	0,30b
50%	19,4bc	7,8bc	0,09bc	0,28bc
75%	16,2 c	5,0c	0,07cd	0,12d
100%	14,2 c	4,6c	0,06d	0,15cd
<b>ETo x Año</b>	**	ns	**	ns
<b>Estación</b>	**	ns	**	**
Primavera	26,4 a	7,6	0,07b	0,20 b
Otoño	19,4 b	8,6	0,14a	0,33a
<b>ETo x estación</b>	**	**	**	**
<b>Año x estación</b>	**	**	*	ns
<b>ETo x año x estación</b>	ns	ns	**	ns

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AEp, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AEs, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

La EUA para producción del aceite esencial mostró valores más elevados en 2007 y el rendimiento en aceite esencial fue muy superior como se señaló anteriormente. La eficiencia en el uso del agua en los distintos tratamientos de riego mostró diferencias altamente significativas en todos los parámetros productivos (Tabla 3.2.10). *Salvia lavandulifolia* fue mucho más eficiente en el uso del agua para la producción de biomasa y aceite en secano, y a medida que aumentó el riego disminuyó la eficiencia del cultivo.

La eficiencia en el uso del agua para producción en peso fresco fue significativamente mayor en la recolección de primavera, pero para el rendimiento en aceite esencial fue mayor en otoño (Tabla 3.3.8).

Se registraron interacciones significativas entre el tratamiento de riego y la recolección en todos los casos. De igual modo ocurrió para peso fresco, materia seca y rendimiento de aceite esencial por unidad de biomasa en año y recolección.

También se registró una interacción significativa entre el tratamiento de riego, año de producción y estación de recolección para la EUA en la producción de aceite esencial por unidad de peso (AEp) (Tabla 3.3.8).

## Otoño

En las recolecciones de otoño los tratamientos de riego no tuvieron efecto sobre los distintos parámetros productivos (Tabla 3.3.9). El déficit hídrico sufrido durante el verano por las plantas en los tratamientos que recibieron menos agua no apareció reflejado en la producción final por superficie.

**Tabla 3.3.9.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo en la producción de biomasa y aceites esenciales en las recolecciones de otoño de *S. lavandulifolia*.**

	Peso fresco (t.ha <sup>-1</sup> )	Peso seco (t.ha <sup>-1</sup> )	RAEp (ml.kg <sup>-1</sup> )	RAEs (L.ha <sup>-1</sup> )
<b>ETo</b>	ns	ns	ns	ns
0 %	5,2	2,0	40,6	76.5
25%	5,5	2,7	32,1	100.3
50%	6,7	3,4	39,8	129.0
75%	5,3	2,3	39,9	71.1
100%	5,3	2,3	37,5	80.8
<b>Año</b>	**	ns	**	ns
2006	8,1 a	2,7	26,6 b	69.1
2007	3,1 b	2,3	49,3 a	114.0
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	ns	ns

Producción de biomasa en peso fresco y seco, rendimiento de aceite esencial por unidad de peso seco (RAEp) y por unidad de superficie (RAEs).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

En las recolecciones realizadas en otoño se observó una mayor producción de biomasa (peso fresco) en 2006, relacionada probablemente con las diferencias en contenido de humedad del material recolectado, ya que la materia seca producida no guardó diferencias entre los dos años de cultivo (Anexo VI).

El contenido en aceite esencial por superficie, aunque algo superior en 2007, no mostró diferencias estadísticamente significativas entre años. Sí fueron diferentes las medias de producción de aceite esencial por unidad de biomasa, ya que en 2007 prácticamente se duplicó la producción de aceite alcanzándose rendimientos muy interesantes (Tabla.3.3.9).

También fueron significativas las diferencias entre tratamientos de riego en la eficiencia en el uso del agua para la producción de biomasa y aceite (Tabla 3.3.10). El tratamiento de secano, seguido de los tratamientos más deficitarios fueron los más eficientes en todos los componentes del rendimiento (Tabla.3.3.10).

**Tabla 3.3.10.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la eficiencia en el uso del agua del cultivo de *S. lavandulifolia* en las recolecciones de otoño.**

	<b>EUA pf</b>	<b>EUA ms</b>	<b>EUA AEp</b>	<b>EUA AEs</b>
<b>ETo</b>	**	**	**	**
0 %	46.5a	18.0 a	0.38 a	0.71 a
25%	19.9 b	9.8 b	0.12 b	0.38 b
50%	15.5 bc	8.6 b	0.09 bc	0.34 bc
75%	8.1 cd	3.4 c	0.07 cd	0.11 c
100%	6.9 d	3.0 d	0.05 d	0.11 c
<b>Año</b>	**	ns	**	**
2006	27,1 a	8,4	0,09 b	0,45 a
2007	11,7 b	8,8	0,19 a	0,22 b
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	**	ns

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AEp, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AEs, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

## Primavera

Los tratamientos de riego no afectaron la producción de biomasa o de aceite esencial (Tabla 3.3.11). Se observó una tendencia a una mayor producción en los tratamientos con menor riego, pero no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas. Los tratamientos con mayores dosis de riego (75 y 100% ETo) tuvieron menor producción, debido entre otras cosas al menor número de plantas vivas en las parcelas. La mortalidad de plantas en estos tratamientos fue muy alta, y al final del estudio la mortalidad alcanzó a más del 50% de las plantas iniciales (ver Fig. 2.2, Material y métodos). El cultivo en primavera tuvo un comportamiento muy similar al de otoño. La producción de peso fresco fue superior estadísticamente en 2006 (Tabla 3.3.11), mientras que en la producción de materia seca no se observaron diferencias entre las dos recolecciones (Tabla 3.3.11).

El rendimiento en aceite esencial, por unidad de biomasa y por superficie, fue mayor en 2007, alcanzando valores muy elevados de producción total (Tabla 3.2.11).

**Tabla 3.3.11.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo sobre la producción de *S. lavandulifolia* en las recolecciones de primavera.**

	Peso fresco (t.ha <sup>-1</sup> )	Peso seco (t.ha <sup>-1</sup> )	RAEp (ml.kg <sup>-1</sup> )	RAEs (L.ha <sup>-1</sup> )
<b>ETo</b>	ns	ns	ns	ns
0 %	13,1	3,9	27,2	105,6
25%	10,3	3,7	29,6	105,1
50%	8,9	2,9	36,6	96,8
75%	8,8	2,7	33,3	70,3
100%	8,1	2,6	36,1	89,7
<b>Año</b>	**	ns	**	**
2006	15,6 a	3,4	11,5 b	39,9 b
2007	4,2 b	2,9	53,6 a	147,1 a
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	ns	ns

Producción de biomasa en peso fresco y seco, rendimiento de aceite esencial por unidad de peso seco (RAEp) y por unidad de superficie (RAEs).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

La eficiencia en el uso del agua resultó mayor para la biomasa fresca y seca en 2006 mientras que la EUA para la producción de aceite esencial fue superior en 2007 (Tabla 3.3.12).

**Tabla 3.3.12.- Efecto de los tratamientos de riego y los años de cultivo en la eficiencia en el uso del agua del cultivo para la producción de biomasa y aceite esencial de *S. lavandulifolia* para las recolecciones de primavera.**

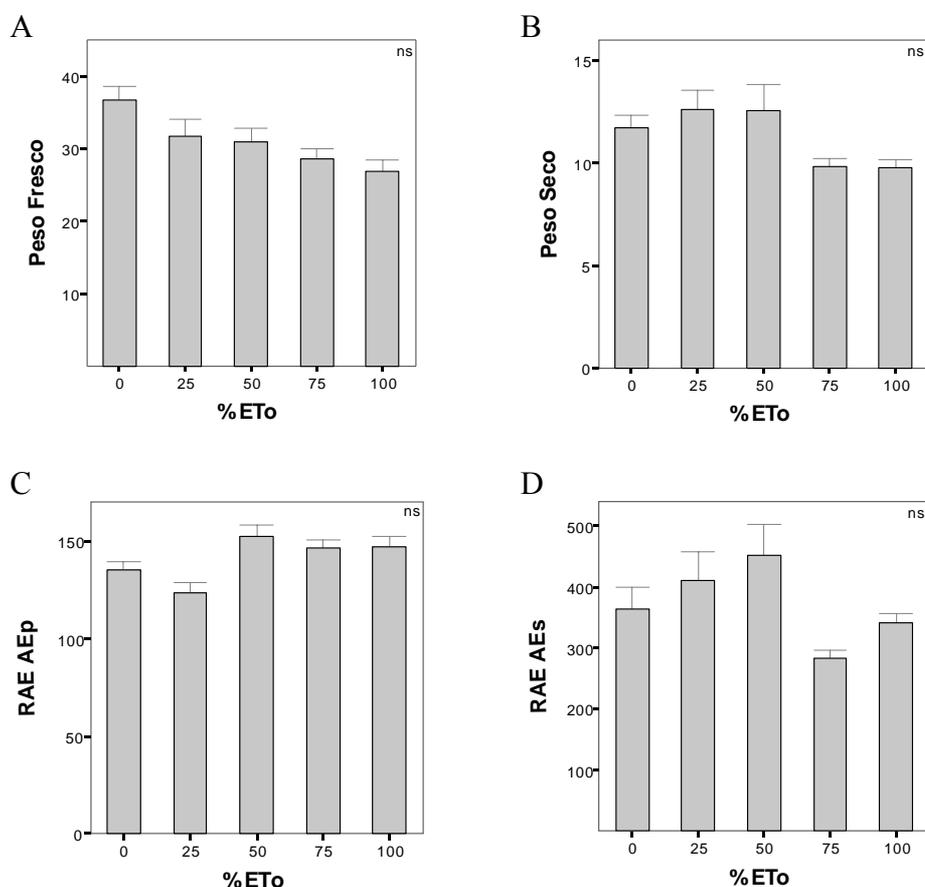
	<b>EUA pf</b>	<b>EUA ps</b>	<b>EUA AEp</b>	<b>EUA AEs</b>
<b>ETo</b>	ns	ns	ns	ns
0 %	35,3	9,5	0,06	0,23
25%	27,6	8,8	0,06	0,22
50%	23,3	7,0	0,08	0,22
75%	24,3	6,6	0,07	0,13
100%	21,5	6,2	0,07	0,19
<b>Año</b>	**	**	**	**
2006	44,9 a	9,8 a	0,03 b	0,12 b
2007	7,9 b	5,5 b	0,10 a	0,28 a
<b>ETo x Año</b>	ns	ns	ns	ns

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AEp, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AEs, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).

\*\*: $P \leq 0,01$ , \*: $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

### Balance de producción total

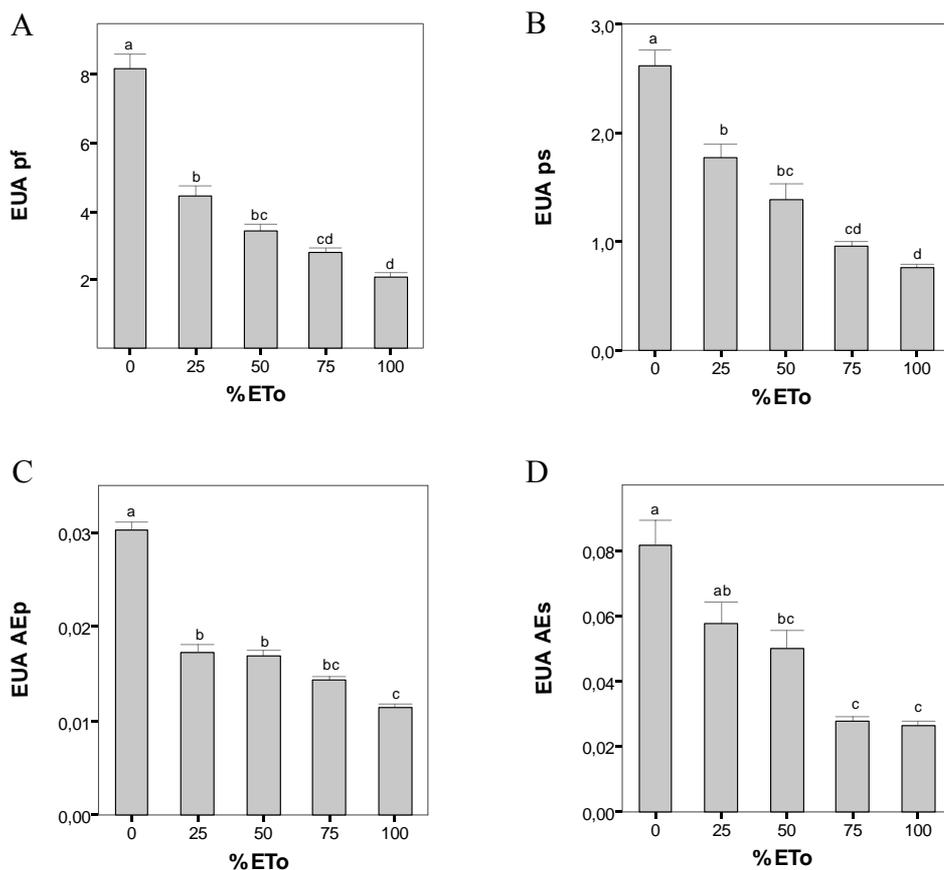
Existió una tendencia a un mayor rendimiento en déficit hídrico en los tres años estudiados, tanto en biomasa (peso fresco y seco) como para el rendimiento de aceite. En el balance global destacó el tratamiento de riego de 50% de ETo por producción de peso seco y aceite esencial por hectárea (Tabla 3.3.3).



**Figura 3.3.3.- Producción total del cultivo durante el período 2006-2007 en *S. lavandulifolia*.**

A: producción de peso fresco ( $t.ha^{-1}$ ), B: producción de peso seco ( $t.ha^{-1}$ ), C: rendimiento de aceite esencial por unidad de materia seca ( $ml.kg^{-1}$ ), y D: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie ( $L.ha^{-1}$ ) para cada uno de los tratamientos. Barras verticales  $\pm ES$ .  $P \leq 0,05$  y ns: diferencias no significativas.

Si consideramos la eficiencia en el uso del agua, ésta fue claramente mayor en secano, en todos los parámetros productivos, seguida por los tratamientos de riego deficitarios y por último los tratamientos con máximo nivel de riego (Fig 3.3.4).



**Figura 3.3.4.- Eficiencia en el uso del agua del cultivo durante el período 2006-2007 en *S. lavandulifolia*.**

Eficiencia en el uso de agua en la producción de biomasa fresca (EUA pf, kg p. fresco/Litro agua aportada), seca (EUA ps, kg p. seco/L agua aportada), rendimiento de aceite esencial por kg de biomasa (EUA AEp, ml aceite esencial/L agua aportada), producción de aceite esencial por hectárea (EUA AEs, Litros aceite esencial producido por ha/L agua aportada).

P<0,05 y ns: diferencias no significativas.

### **3.4.- Asociaciones entre parámetros fisiológicos y productivos.**

#### **3.4.1.- *Salvia officinalis*.**

El análisis de la relación entre los parámetros fisiológicos y productivos en *S. officinalis* mostró una estrecha asociación entre los parámetros, con coeficientes de correlación lineal elevados y altamente significativos (Tablas 3.4.1 a 3.4.3).

En el año 2003 existió una relación muy significativa entre fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración, potencial hídrico y contenido hídrico foliar con la producción de biomasa y el rendimiento en aceite esencial por hectárea (Tabla 3.4.1).

En el verano de 2004, las relaciones entre parámetros fisiológicos ( $A$ ,  $E$ ,  $g_s$ ,  $\Psi_h$  y CHF) y productivos (PF, PS, RAEs) también fueron muy significativas con coeficientes de correlación elevados (Tabla 3.4.2), destacó la relación negativa con la producción de aceite por unidad de peso.

Como ocurriera en 2003 y 2004, los parámetros fisiológicos y de producción de los años posteriores (Tablas 3.4.2 y 3.4.3) se relacionaron significativamente con la sola excepción de la producción de aceite por unidad de biomasa, que varió en significación estadística según el año y el parámetro fisiológico considerado.

En 2006, los datos que no mostraron relación fueron los de  $\Psi_h$ , CHF y el rendimiento (Tabla 3.4.2), probablemente por las condiciones climáticas de ese verano en concreto, aunque si existió correlación entre la producción en otoño y las medidas de CHF en el mes de agosto de 2006 (Anexo III).

**Tabla 3.4.1.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de *S. officinalis*. Media de tres medidas durante el verano de 2003 y 2004.**

2003		PF	PS	RAEp	RAEs
<b>A</b>	r	0,776**	0,840**	0,073	0,791**
	Sig	0,000	0,000	0,761	0,000
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,775**	0,825**	0,090	0,784**
	Sig	0,000	,000	0,705	0,000
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,703**	0,783**	0,333	0,786**
	Sig	0,001	0,000	0,151	0,000
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	0,667**	0,746**	0,131	0,712**
	Sig	0,001	0,000	0,583	0,000
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,793**	0,819**	0,163	0,791**
	Sig	0,000	0,000	0,492	0,000
	N	20	20	20	20
2004		PF	PS	RAEp	RAEs
<b>A</b>	r	0,824**	0,843**	-0,693**	0,736**
	Sig	0,000	0,000	0,001	0,000
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,704**	0,732**	-0,607**	0,644**
	Sig	0,001	0,000	0,005	0,002
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,652**	0,689**	-0,497*	0,635**
	Sig	0,002	0,001	0,026	0,003
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	0,701**	0,724**	-0,599**	0,672**
	Sig	0,001	0,000	0,005	0,001
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,652**	0,681**	-0,736**	0,555*
	Sig	0,002	0,001	0,000	0,011
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\* : P ≤ 0,01; \* : P ≤ 0,05

**Tabla 3.4.2.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de *S. officinalis*. Media de tres medidas durante el verano de 2005 y 2006.**

<b>2005</b>		<b>PF</b>	<b>PS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,771**	0,781**	0,455*	0,717**
	Sig	0,000	0,000	0,044	0,000
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,715**	0,720**	0,342	0,627**
	Sig	0,000	0,000	0,140	0,003
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,678**	0,678**	0,479*	0,648**
	Sig	0,001	0,001	0,033	0,002
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	0,580**	0,590**	0,447*	0,565**
	Sig	0,007	0,006	0,048	0,009
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,591**	0,592**	0,480*	0,562**
	Sig	0,006	0,006	0,032	0,010
	N	20	20	20	20
<b>2006</b>		<b>PF</b>	<b>PS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,724**	0,693**	0,023	0,556*
	Sig	0,000	0,001	0,922	0,011
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,526*	0,484*	0,193	0,488*
	Sig	0,017	0,031	0,415	0,029
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,804**	0,774**	0,135	0,675**
	Sig	0,000	0,000	0,571	0,001
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	0,507*	0,412	0,024	0,368
	Sig	0,023	0,071	0,922	0,110
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,410	0,314	-0,038	0,252
	Sig	0,072	0,177	0,875	0,285
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\* : P ≤ 0,01; \* : P ≤ 0,05

**Tabla 3.4.3.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de *S. officinalis*. Media de tres medidas durante el verano de 2007.**

		<b>PF</b>	<b>PS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,485*	0,450*	0,513*	0,492*
	Sig	0,030	0,046	0,021	0,028
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,462*	0,431	0,610**	0,527*
	Sig	0,040	0,058	0,004	0,017
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,500*	0,444*	0,556*	0,508*
	Sig	0,025	0,050	0,011	0,022
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	0,492*	0,500*	0,399	0,493*
	Sig	0,028	0,025	0,081	0,027
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,588**	0,540*	0,467*	0,611**
	Sig	0,006	0,014	0,038	0,004
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\*· P ≤ 0,01; \*· P ≤ 0,05

### 3.4.2.- *Salvia lavandulifolia*.

En *Salvia lavandulifolia*, el comportamiento observado en la relación entre parámetros fue bastante diferente al de *S. officinalis*. En los análisis de correlación efectuados en cada uno de los años de cultivo no se observaron relaciones lineales entre los parámetros fisiológicos y productivos (Tablas 3.4.4 y 3.4.5), con la excepción del año 2007, en el que se registró una relación significativa y de signo negativo entre transpiración y producción de biomasa y de aceite esencial por hectárea.

**Tabla 3.4.4.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de *S. lavandulifolia*. Media de tres medidas durante el verano de 2006.**

		PF	PS	RAEp	RAEs
<b>A</b>	r	0,176	0,291	0,059	0,348
	Sig	0,459	0,213	0,803	0,133
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,058	0,195	0,026	0,236
	Sig	0,808	0,410	0,913	0,316
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,013	0,188	0,100	0,313
	Sig	0,958	0,428	0,675	0,179
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	-0,203	-0,239	0,181	-0,073
	Sig	0,391	0,310	0,445	0,760
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	-0,013	0,055	0,130	0,146
	Sig	0,958	0,819	0,585	0,539
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\*: P ≤ 0,01; \*: P ≤ 0,05

**Tabla 3.4.5.- Coeficientes de correlación lineal para la relación entre parámetros fisiológicos y productivos de *S. lavandulifolia*. Media de tres medidas durante el verano de 2007.**

		PF	PS	RAEp	RAEs
<b>A</b>	r	0,053	-0,014	-0,221	-0,078
	Sig	0,825	0,953	0,349	0,744
	N	20	20	20	20
<b><i>g<sub>s</sub></i></b>	r	-0,014	-0,063	-0,147	-0,098
	Sig	0,953	0,791	0,536	0,681
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	-0,447*	-0,518*	-0,193	-0,548*
	Sig	0,048	0,019	0,415	0,012
	N	20	20	20	20
<b><math>\Psi_h</math></b>	r	0,449*	0,378	-0,057	0,343
	Sig	0,047	0,100	0,810	0,138
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	-0,217	-0,295	-0,360	-0,367
	Sig	0,358	0,207	0,119	0,112
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, *g<sub>s</sub>*: Conductancia estomática, E: Transpiración,  $\Psi_h$ : Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\* :  $P \leq 0,01$ ; \* :  $P \leq 0,05$

### **3.5.- Efecto del déficit hídrico en la calidad y composición química del aceite esencial.**

#### **3.5.1.- *Salvia officinalis*.**

##### **Composición química**

El déficit hídrico produjo distintas modificaciones en la composición química del aceite esencial en *S. officinalis*. Los tratamientos de riego deficitario aumentaron considerablemente componentes como canfeno, limoneno, alcanfor y linalol, mientras que redujeron los niveles de 1,8-cineol y  $\alpha$ -tuyona (Tabla 3.5.1). Los contenidos relativos de  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -tuyona, acetato de bornilo y  $\alpha$ -humuleno, mientras tanto, no se vieron afectados por los tratamientos (Tabla 3.5.1).

La composición del aceite esencial varió según la época de cosecha. El aceite esencial de las dos recolecciones (primavera y otoño) mostró diferencias en todos los componentes estudiados, a excepción de la  $\alpha$ -tuyona que presentó valores más bajos en primavera pero sin diferencias significativas con los de otoño. En primavera, el cultivo florecía (en 2004 y 2005 se produjeron las floraciones más intensas) de modo que la composición del aceite esencial se alteró especialmente por la presencia de flores, cuyo contenido en tuyonas es menor. Otros compuestos, como  $\alpha$ -pineno, limoneno, 1,8-cineol,  $\beta$ -tuyona, acetato de bornilo y  $\alpha$ -humuleno mostraron valores más elevados en primavera (Tabla 3.5.1).

Canfeno,  $\alpha$ -tuyona, alcanfor y 1,8-cineol tuvieron en primavera valores más bajos, que aumentaron en otoño. En el caso de  $\alpha$ -tuyona no existieron diferencias significativas aunque si se apreció una tendencia descendente en las cosechas de otoño.

En los tres años de este análisis se registró cierta estabilidad en los componentes del aceite esencial, ya que sólo se observaron variaciones significativas en dos componentes, como el limoneno, que se redujo paulatinamente desde 2005 a 2007, y el linalol, que en 2006 mostró un aumento considerable, aunque siempre dentro de los valores que establece la normativa de calidad ISO 9909-1997.

##### **Calidad en *Salvia officinalis***

Los valores promedio durante el período estudiado de cada uno de los componentes del aceite esencial de *S. officinalis*, estuvieron dentro de los niveles de calidad establecidos por las normas internacionales (ISO 9909, 1997), a excepción de la  $\alpha$ -tuyona, que en todos los casos superó el 43%, que es el contenido relativo máximo establecido en las normas de calidad del aceite esencial para farmacopea.

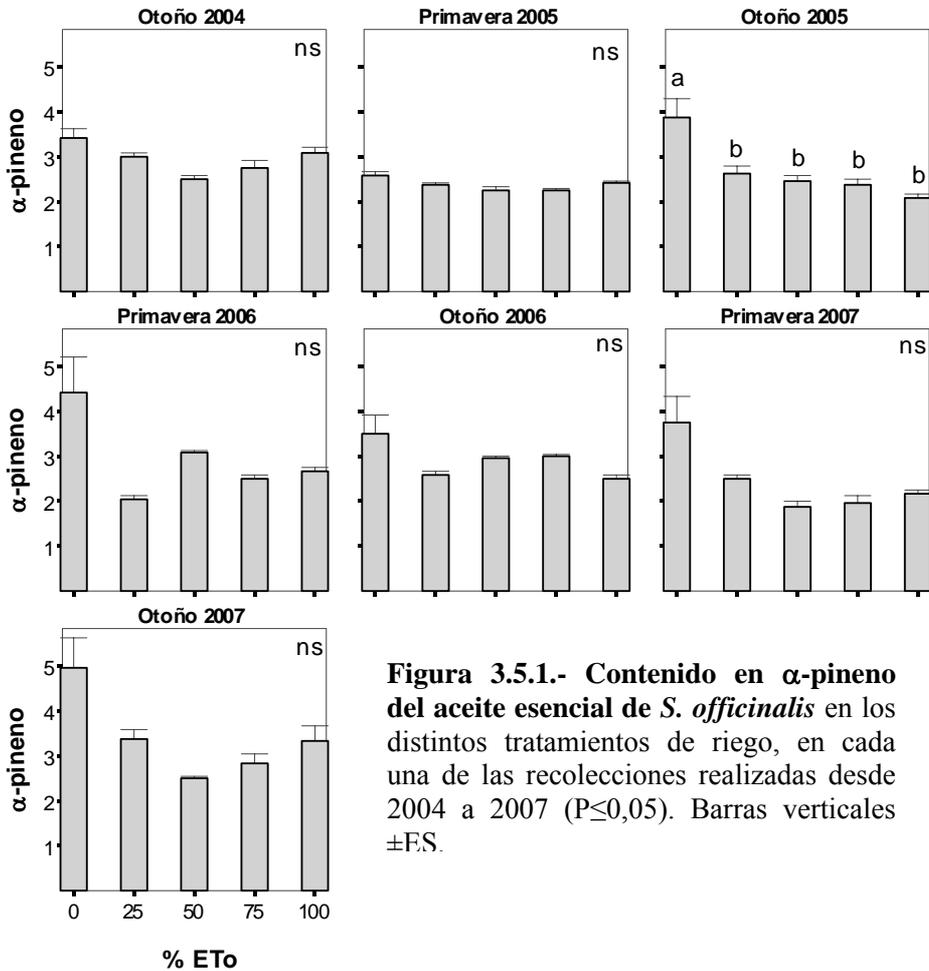
**Tabla 3.5.1.-Composición química del aceite esencial de *Salvia officinalis* en cada uno de los tratamientos de riego, en las recolecciones de primavera y otoño de 2005 a 2007.**

Componente	ISO	P	% ETo					Estación		Año			Interacciones					
			0	25	50	75	100	P	Primav.	Otoño	P	2005	2006	2007	TxA	AxR	TxR	TxAxR
<b>α-pineno</b>	<b>1-6,5</b>	ns	4,2	2,7	2,5	2,5	2,7	**	3,5	2,1	ns	2,9	2,9	2,9	ns	ns	ns	ns
<b>canfeno</b>	<b>1-5,7</b>	**	3,5 a	1,8 b	2,1 b	1,5 b	1,7 b	**	1,7 b	2,5 a	ns	2,2	2,1	2,1	ns	**	*	*
<b>limoneno</b>	<b>0,5-3</b>	*	1,2 a	0,9 bc	1,0 ab	0,8 c	0,9 bc	**	1,0 a	0,9 b	**	1,2 a	1,1 a	0,6 b	ns	**	ns	ns
<b>1,8-cineol</b>	<b>5,5-13</b>	**	6,5 c	7,7 ab	6,7 bc	6,7 bc	8,9 a	**	7,8 a	6,8 b	ns	7,1	7,4	7,4	ns	ns	*	ns
<b>α-tuyona</b>	<b>18-43</b>	*	47,8 b	53,9 a	54,4 a	57,3 a	54,7 a	ns	52,9	54,4	ns	53,4	56,7	53,7	ns	ns	ns	ns
<b>β-tuyona</b>	<b>3-8,5</b>	ns	4,0	5,1	4,8	5,0	4,0	**	5 a	4,2 b	ns	4,8	4,5	4,5	ns	ns	ns	ns
<b>alcanfor</b>	<b>4,5-24,5</b>	*	15,4 a	11,1 b	12,8 ab	9,1 b	10,6 b	**	10,8	12,8	ns	11,8	11,8	11,8	ns	**	ns	ns
<b>linalol</b>	<b>-1</b>	**	0,6 a	0,4 b	0,4 b	0,4 b	0,4 b	**	0,3 b	0,6 a	**	0,3 b	0,8 a	0,3 b	ns	**	ns	ns
<b>acetato de bornilo</b>	<b>-2,5</b>	ns	1,6	1,3	1,1	1,2	1,4	*	1,9 a	0,7 b	ns	1,4	1,3	1,3	ns	ns	ns	ns
<b>α-humuleno</b>	<b>-12</b>	ns	2,8	3,0	2,8	2,5	2,6	**	3,5 a	2,1 b	ns	2,9	2,7	2,7	ns	**	ns	ns

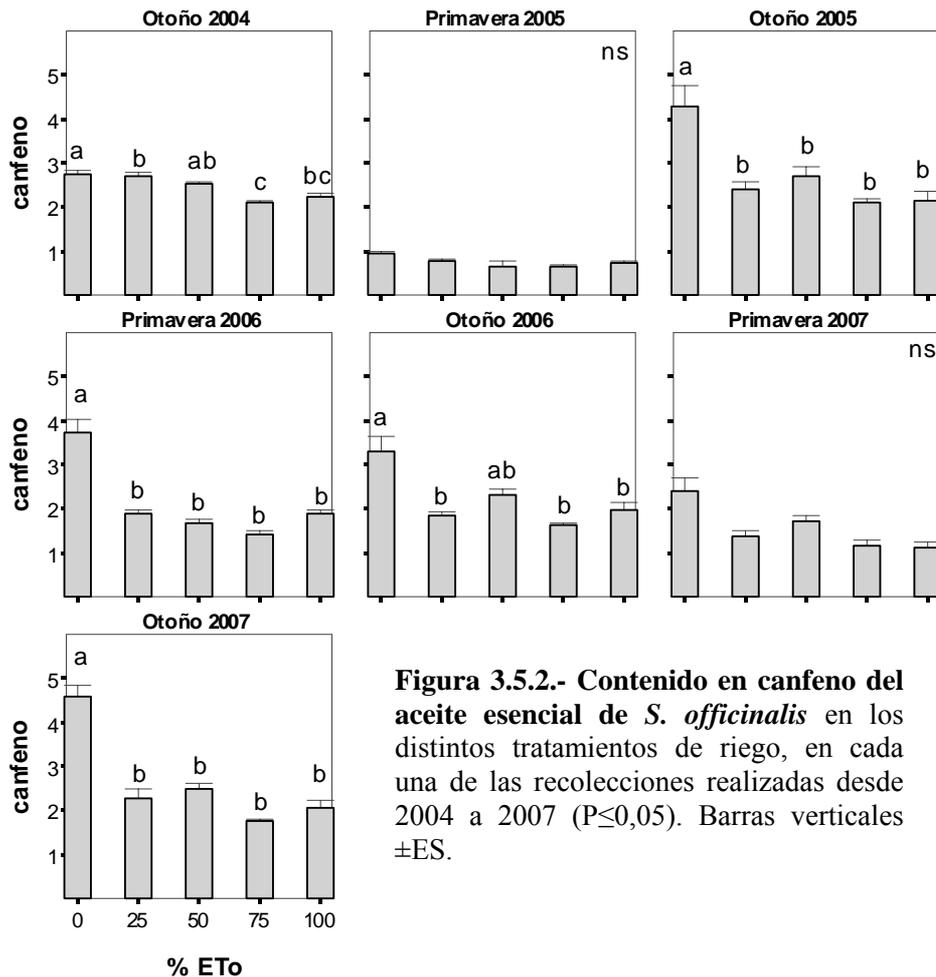
ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO9909 de 1997.

\*\*=P≤ 0.01, \*=P≤ 0.05 y ns=diferencias no significativas.

**Efecto del riego en la composición del aceite esencial de *Salvia officinalis*, en cada una de las recolecciones.**

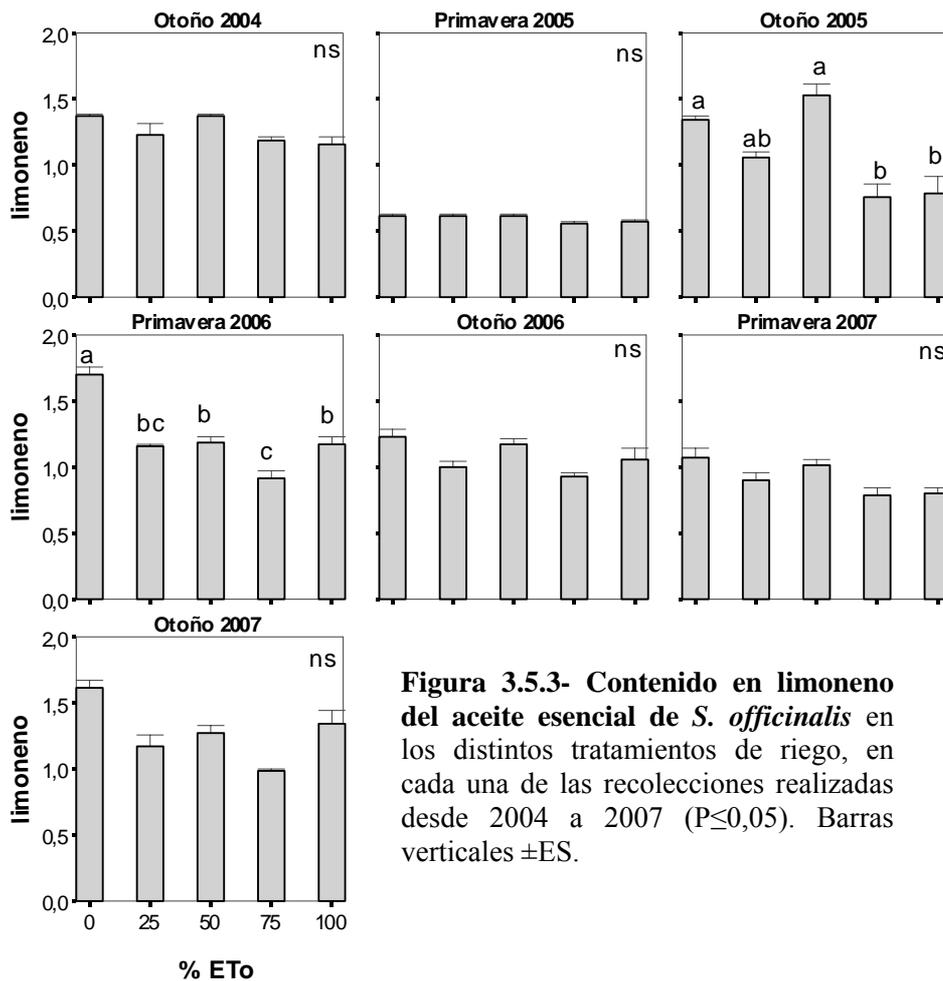


El contenido de  $\alpha$ -pineno osciló entre 2-5% en todos los tratamientos de riego y recolecciones. En secano se alcanzaron los valores más elevados de  $\alpha$ -pineno en todas las recolecciones, aunque estas diferencias sólo fueron significativas en la recolección de otoño de 2005, y en el resto de las recolecciones, aunque se apreció una tendencia similar en este sentido, las diferencias entre tratamientos no alcanzaron a ser estadísticamente significativas (Fig. 3.5.1).



El déficit hídrico produjo un aumento claro en el contenido de canfeno del aceite esencial de *S. officinalis* (Fig. 3.5.2). En todas las recolecciones de otoño, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre el secano y el resto de los tratamientos (Fig. 3.5.2). En la recolección de primavera del 2006 también se observó un mayor nivel de canfeno en secano, probablemente porque en este período se produjo el mayor déficit hídrico de los secanos, ya que las precipitaciones durante el otoño de 2005 y el invierno de 2006 fueron muy escasas (Anexo II).

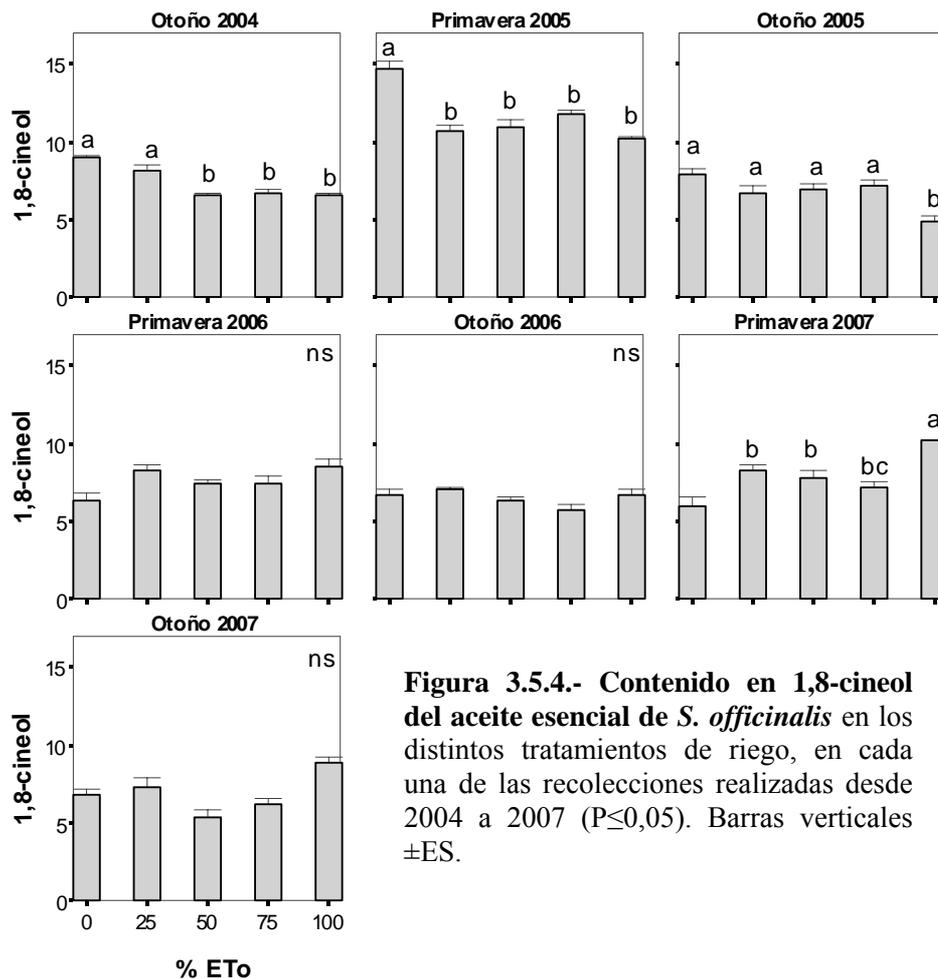
En los análisis efectuados, el canfeno llegó en general a valores más bajo en primavera en las tres recolecciones. Es posible que la floración del cultivo afectara al contenido en canfeno, ya que la presencia de flores suele modificar la composición química del aceite.



**Figura 3.5.3- Contenido en limoneno del aceite esencial de *S. officinalis* en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.**

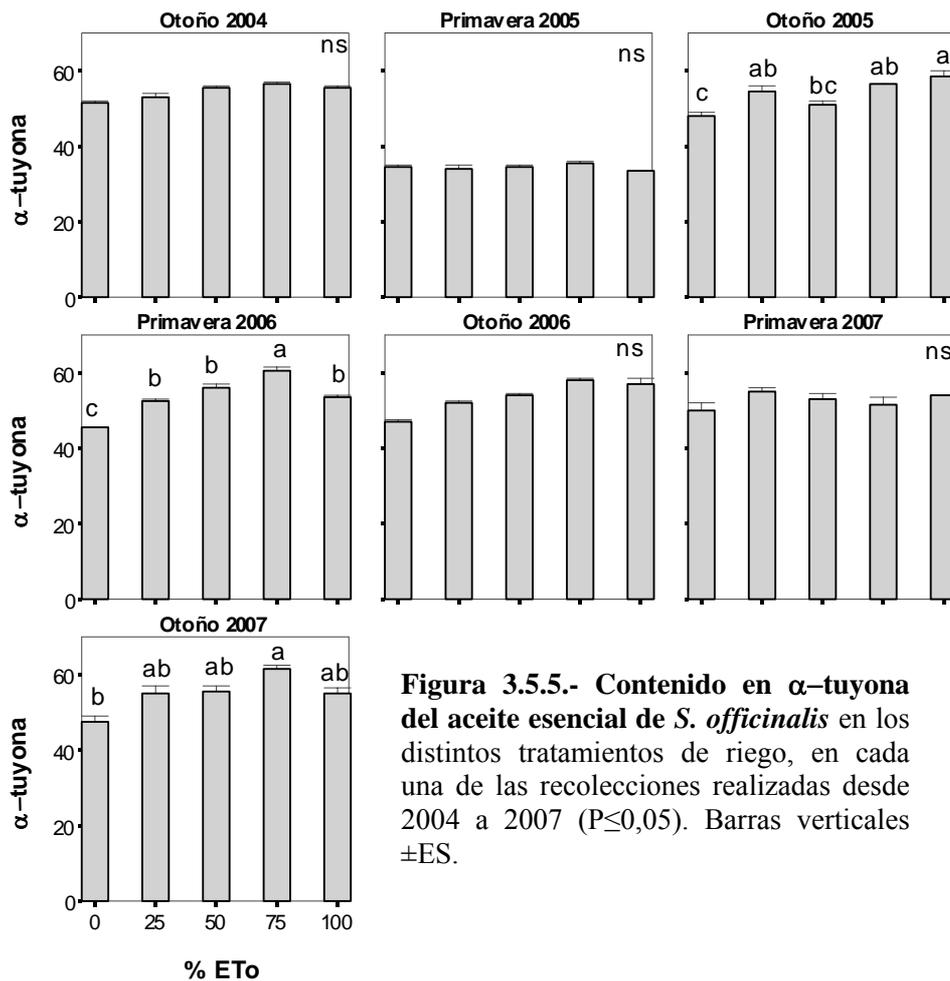
Se apreció mayor variabilidad en el contenido de limoneno, si bien en los tratamientos de secano y riegos más deficitarios, los valores de limoneno también tendían a presentarse en mayores concentraciones (Fig. 3.5.3). Pero estas diferencias sólo fueron significativas en las recolecciones de septiembre de 2005 y junio de 2006.

En primavera, por lo general, descendía el contenido en limoneno del aceite esencial, y los valores más bajos de limoneno se observaron en junio de 2005, coincidiendo con una floración importante del cultivo



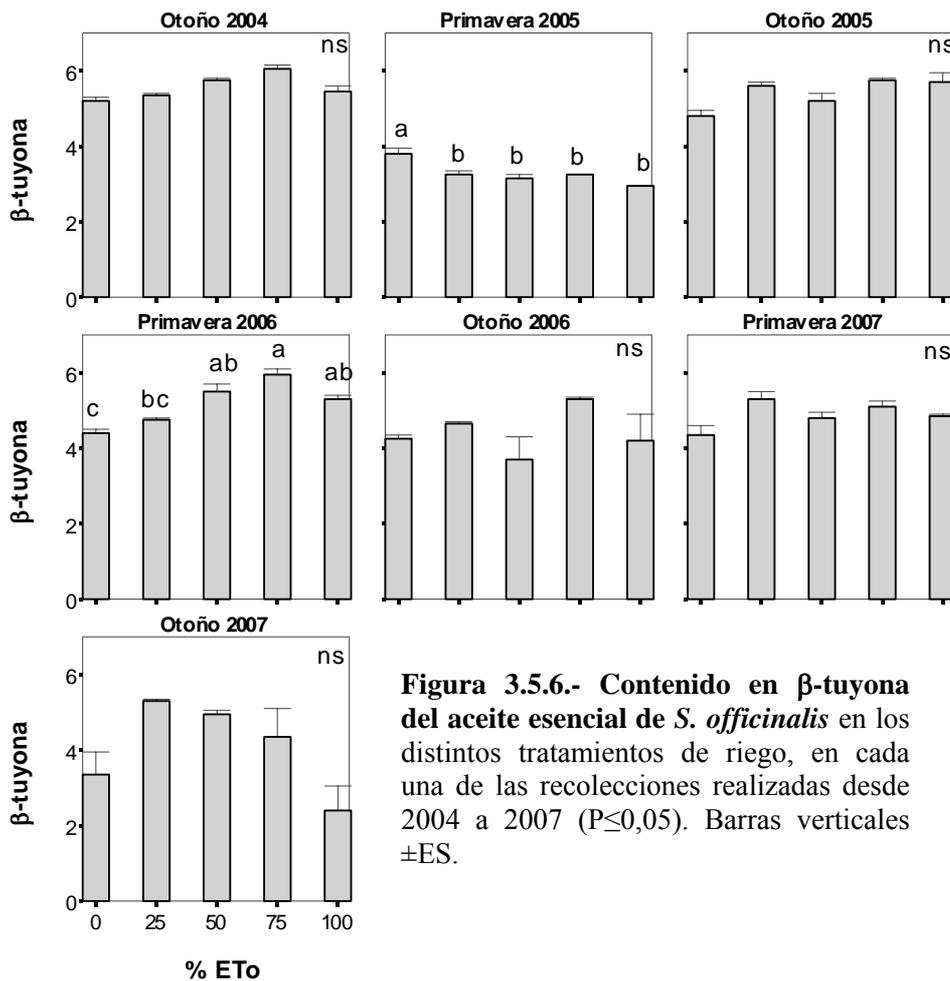
El comportamiento del 1,8-cineol con el estrés hídrico fue variable en el tiempo (Fig. 3.5.4). En las tres primeras recolecciones se observó un claro efecto producido por el déficit hídrico, aumentando el contenido en 1,8-cineol en los tratamientos de menor riego, pero en el último año (2007) se pudo observar una inversión de ese comportamiento: fue en los tratamientos de mayor riego donde se alcanzaron los valores más altos de 1,8-cineol (Fig. 3.5.4).

El aceite esencial en la primavera de 2005 mostró mayor contenido en 1,8-cineol que el resto de las recolecciones, y esto probablemente estuvo relacionado con la mayor presencia de flores en esa recolección (en las dos primeras recolecciones de primavera, 2004 y 2005 la presencia de flores fue mucho más elevada).



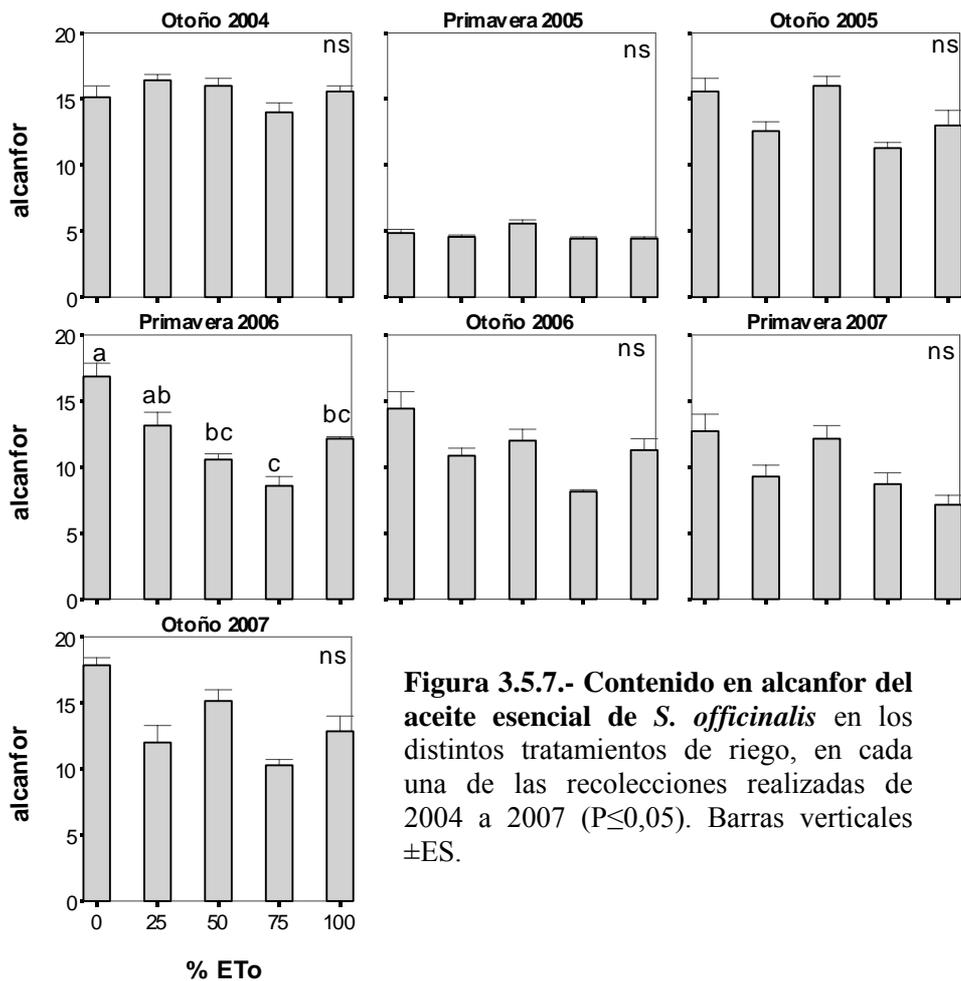
A diferencia de los compuestos anteriores, la concentración relativa de  $\alpha$ -tuyona aumentó con el aporte de agua al cultivo en algunas recolecciones (Fig. 3.5.5). Los análisis mostraron niveles más bajos de  $\alpha$ -tuyona en los tratamientos más deficitarios, en especial en seco. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas en las recolecciones de septiembre de 2005, junio 2006 y septiembre de 2007 (Fig. 3.5.5).

En la primavera de 2005 se observó un descenso generalizado en todos los tratamientos de riego del contenido en  $\alpha$ -tuyona, debido principalmente a la presencia de una de las floraciones más abundantes del cultivo (la otra floración abundante ocurrió en la primavera de 2004, de la que no tenemos datos de composición de aceite esencial).



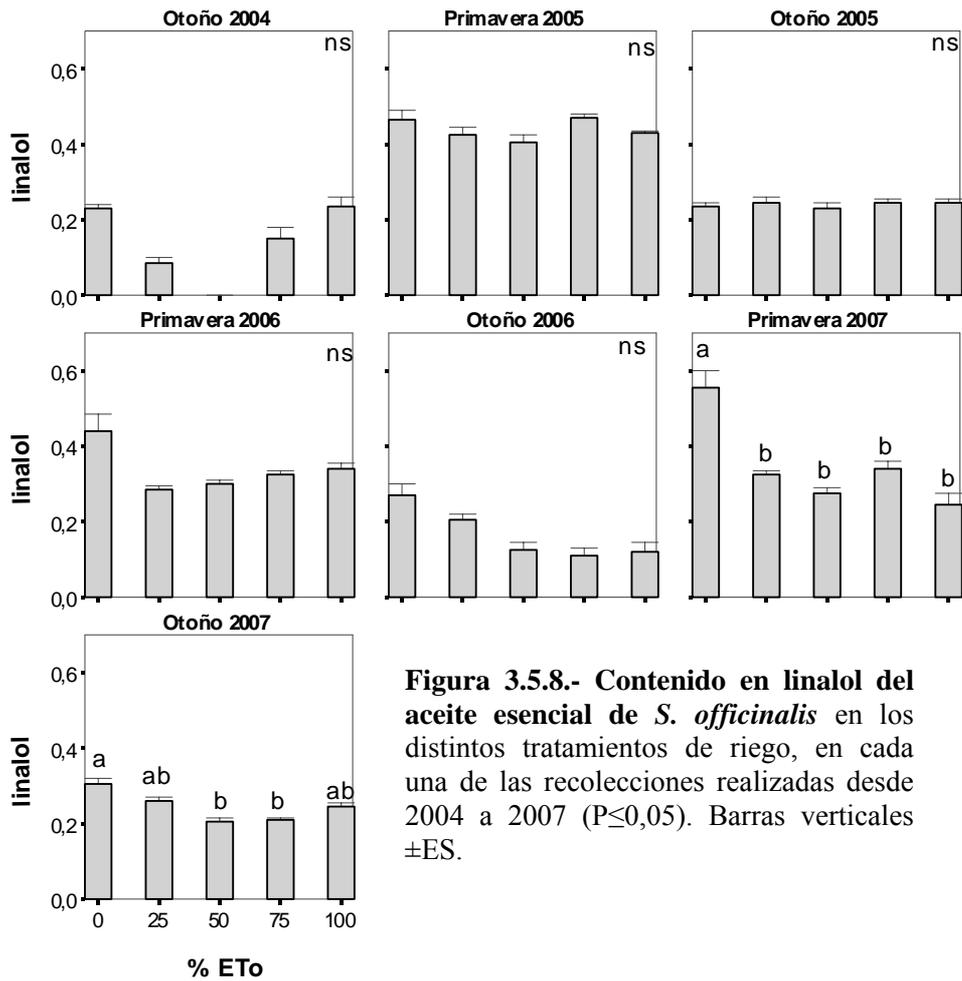
El contenido en β-tuyona mostró diferencias entre los tratamientos de riego las primaveras de 2005 y 2006. Sólo en la primavera de 2005 el secano alcanzó mayor concentración relativa de β-tuyona, mientras que en la primavera de 2006 fueron los tratamientos de mayor riego los que mostraron los niveles más elevados en este componente (Fig. 3.5.6).

El aceite esencial del resto de las recolecciones no mostró diferencias significativas por efecto del riego, aunque se apreciaron concentraciones mayores de β-tuyona en los riegos intermedios. Entre recolecciones no se apreciaron grandes diferencias en β-tuyona, a pesar de que el valor medio de β-tuyona en primavera fue estadísticamente mayor que el de otoño, como vimos anteriormente (Tabla 3.5.1).

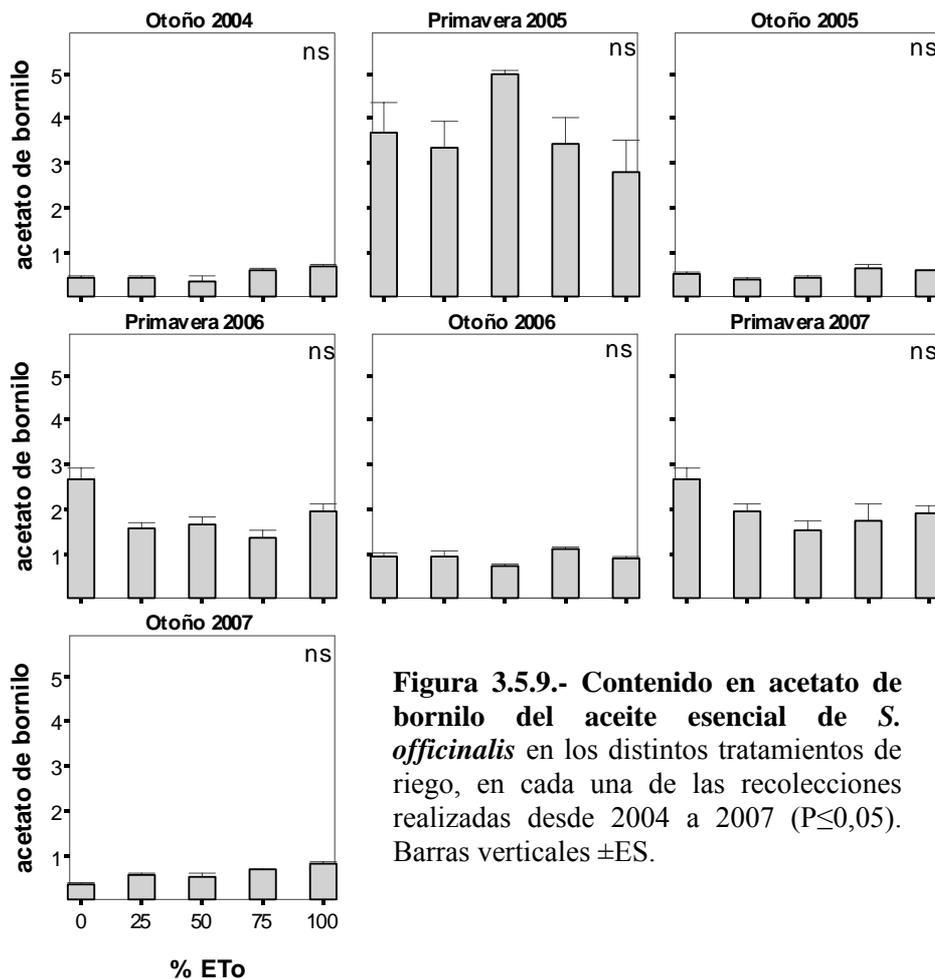


El contenido en alcanfor en general se mostró más alto en los tratamientos más deficitarios en riego (Fig. 3.5.7), aunque en las dos primeras recolecciones (otoño de 2004 y primavera de 2005) el contenido relativo de alcanfor no pareció verse afectado por los tratamientos de riego. A partir de septiembre de 2006 comenzó a apreciarse el efecto del déficit hídrico provocado por las diferencias de riego, y se observó un aumento en el contenido de alcanfor con el déficit hídrico. A pesar de esto, el único análisis que mostró diferencias estadísticamente significativas fue el de junio de 2006, en el que se observó mayor contenido de alcanfor en secano (Fig. 3.5.7).

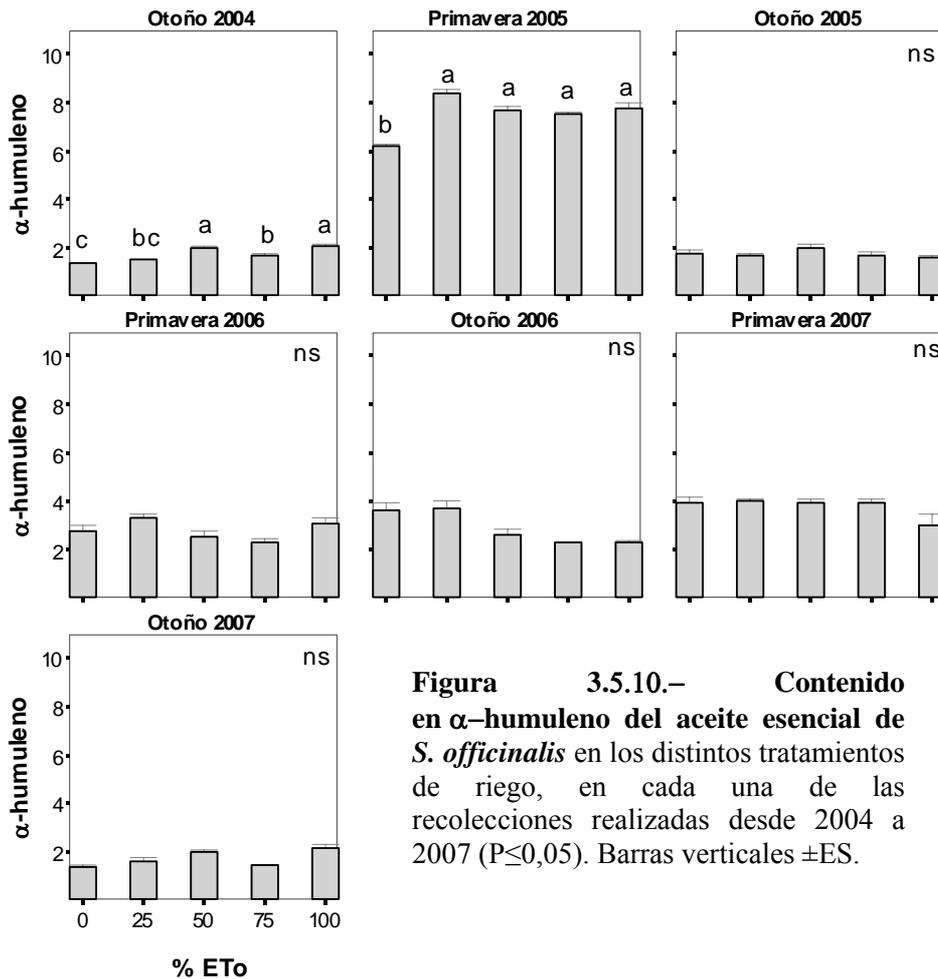
Los niveles más elevados de alcanfor se alcanzaron en las recolecciones de otoño. Mientras que en junio de 2005 se observaron los valores más bajos (Fig. 3.5.7).



El contenido relativo de linalol en los distintos tratamientos de riego tuvo un comportamiento variable en el tiempo, aunque el déficit hídrico produjo en todas las recolecciones valores más altos de este componente (Fig. 3.5.8.). El contenido de linalol en el aceite esencial destacó por sus elevados niveles en primavera, en comparación con el otoño y especialmente en la primavera de 2005, coincidiendo con una profusa floración del cultivo.



El contenido relativo en acetato de bornilo no mostró diferencias en ninguna de las recolecciones estudiadas (Fig. 3.5.9) pero es de destacar la variación estacional de este componente, con contenidos mayores en primavera, y destacando la primavera de 2005.



**Figura 3.5.10.– Contenido en α-humuleno del aceite esencial de *S. officinalis* en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.**

El contenido en α-humuleno en las dos primeras recolecciones (septiembre 2004 y junio 2005) aumentó con el aporte de riego, y los niveles más bajos de α-humuleno se observaron en los riegos más deficitarios. Estas diferencias desaparecieron con el transcurso del tiempo y no se volvió a observar diferencia alguna debida al tratamiento (Fig. 3.5.10). Destacaron los elevados valores de α-humuleno de junio de 2005 en todos los tratamientos, comparados con el resto de las recolecciones.

### **Calidad del aceite esencial *Salvia officinalis* en cada una de las recolecciones.**

La calidad del aceite esencial se estudió teniendo como referencia la norma ISO9909:1997, empleada en farmacopea, por ser la más estricta (Tabla 3.5.2).

El contenido en  $\alpha$ -tuyona fue muy alto en la inmensa mayoría de las muestras analizadas. Salvo en la recolección de junio de 2005, en todos los casos el contenido en  $\alpha$ -tuyona superó el 43%, que es el máximo permitido en la actual norma de calidad del aceite esencial de *Salvia officinalis*.

La hoja seca sí tendría calidad suficiente para condimentaría y herboristería por contener niveles de  $\alpha$  y  $\beta$  tuyonas relativamente bajos en valor absoluto, ya que los rendimientos en aceite esencial obtenidos en el cultivo fueron bajos. Los niveles máximos de tuyona que permite la Norma son de 5,80 mg.kg<sup>-1</sup> de materia seca, y en nuestro caso la mayor parte de las muestras estaban por debajo de esos niveles.

Desde el punto de vista de la calidad, la única recolección que mantuvo niveles de tuyona dentro de los criterios de la normativa fue la de primavera de 2005, ya que mostró valores de canfeno (en todos los tratamientos) y alcanfor (sólo en 75 y 100% ETo) demasiado bajos, y por el contrario demasiado altos en acetato de bornilo (en todos los tratamientos). En ninguno de los casos existirían problemas de toxicidad, pero sí de baja calidad del aceite desde el punto de vista de la Norma.

El contenido relativo de cineol, en ocasiones, presentó problemas, pero fueron muy concretos, como el caso del secano de junio de 2005 por exceso, con un 14% y el regadío de septiembre de 2005, donde no se alcanzó el mínimo de 5,5% que exige la regulación.

**Tabla 3.5.2.a.- Calidad química del aceite esencial de *S. officinalis* en las recolecciones de otoño y primavera desde 2004 a 2007, (%).**

Norma ISO	1-6,5	1,5-7	0,5-3	5,5-13	18-43	3-8,5	4,5-24,5	-1	-2,5	-12
<b>Otoño 2004</b>										
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	limoneno	1,8-cineol	$\alpha$ -tuyona	$\beta$ -tuyona	alcanfor	linalol	acetato de bornilo	$\alpha$ -humuleno
0 %	3,42	2,73	1,37	8,97	51,49	5,20	16,36	0,24	0,45	1,33
25 %	3,02	2,70	1,23	8,17	53,01	5,32	15,98	0,09	0,44	1,50
50 %	2,50	2,51	1,37	6,56	55,54	5,71	15,50	0,00	0,41	1,98
75 %	2,77	2,10	1,19	6,73	56,43	6,02	15,14	0,15	0,59	1,67
100 %	3,09	2,08	1,15	6,63	55,17	5,43	14,01	0,24	0,70	2,04
<b>Primavera 2005</b>										
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	limoneno	1,8-cineol	$\alpha$ -tuyona	$\beta$ -tuyona	alcanfor	linalol	acetato de bornilo	$\alpha$ -humuleno
0 %	2,58	0,96	0,62	14,72	34,59	3,80	4,92	0,47	3,69	6,20
25 %	2,38	0,79	0,61	10,73	33,97	3,24	4,54	0,42	3,35	8,37
50 %	2,27	0,67	0,62	10,91	34,46	3,17	5,56	0,41	4,97	7,71
75 %	2,26	0,66	0,56	11,82	35,58	3,25	4,41	0,47	3,43	7,53
100 %	2,42	0,73	0,58	10,14	33,58	2,94	4,42	0,43	2,78	7,76

Norma ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO9909 de 1997.

■ Valor medio fuera de la norma.

**Tabla 3.5.2.b.- Calidad química del aceite esencial de *S. officinalis* en las recolecciones de otoño y primavera desde 2004 a 2007, (%).**

Norma ISO	1-6,5	1,5-7	0,5-3	5,5-13	18-43	3-8,5	4,5-24,5	-1	-2,5	-12
<b>Otoño 2005</b>										
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	limoneno	1,8-cineol	$\alpha$ -tuyona	$\beta$ -tuyona	alcanfor	linalol	Acetato de bornilo	$\alpha$ -humuleno
0 %	3,89	4,26	1,34	7,91	47,74	4,79	15,58	0,24	0,51	1,73
25 %	2,64	2,40	1,06	6,74	54,56	5,60	12,60	0,25	0,41	1,67
50 %	2,44	2,72	1,53	6,98	50,93	5,20	15,96	0,23	0,44	2,02
75 %	2,40	2,09	0,76	7,15	56,21	5,72	11,33	0,25	0,65	1,69
100 %	2,08	2,15	0,79	4,84	58,37	5,66	12,98	0,24	0,59	1,63
<b>Primavera 2006</b>										
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	limoneno	1,8-cineol	$\alpha$ -tuyona	$\beta$ -tuyona	alcanfor	linalol	Acetato de bornilo	$\alpha$ -humuleno
0 %	4,40	3,72	1,70	6,32	45,37	4,40	16,81	0,44	2,69	2,73
25 %	2,04	1,88	1,51	7,42	52,32	4,73	13,16	0,29	1,56	3,35
50 %	3,10	1,69	1,19	7,42	55,75	5,47	10,62	0,30	1,67	2,55
75 %	2,52	1,42	1,92	7,37	60,27	5,93	8,69	0,33	1,36	2,30
100 %	2,66	1,89	1,17	8,54	53,35	5,30	12,10	0,34	1,95	3,10

Norma ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO9909 de 1997.

Valor medio fuera de la norma.

**Tabla 3.5.2.c.- Calidad química del aceite esencial de *S. officinalis* en las recolecciones de otoño y primavera desde 2004 a 2007, (%).**

Norma ISO	1-6,5	1,5-7	0,5-3	5,5-13	18-43	3-8,5	4,5-24,5	-1	-2,5	-12
<b>Otoño 2006</b>										
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	limoneno	1,8-cineol	$\alpha$ -tuyona	$\beta$ -tuyona	alcanfor	linalol	acetato de bornilo	$\alpha$ -humuleno
0 %	3,51	3,32	1,23	6,73	45,37	4,40	14,43	0,27	2,69	2,73
25 %	2,57	1,86	1,01	7,03	52,32	4,73	10,87	0,20	1,56	3,35
50 %	2,95	2,34	1,17	6,36	55,75	5,47	12,01	0,13	1,67	2,55
75 %	3,00	1,65	0,92	5,76	60,27	5,93	8,18	0,11	1,36	2,29
100 %	2,53	1,97	1,06	6,68	53,35	5,30	11,27	0,12	1,95	3,10
<b>Primavera 2007</b>										
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	limoneno	1,8-cineol	$\alpha$ -tuyona	$\beta$ -tuyona	alcanfor	linalol	acetato de bornilo	$\alpha$ -humuleno
0 %	3,73	2,39	1,07	6,03	49,81	4,37	12,64	0,55	2,67	3,98
25 %	2,51	1,37	0,90	8,24	54,83	5,31	9,36	0,33	1,96	4,00
50 %	1,89	1,73	1,01	7,78	52,97	4,81	12,13	0,27	1,53	3,98
75 %	1,97	1,15	0,79	7,22	51,57	5,08	8,73	0,34	1,76	3,92
100 %	2,17	1,14	0,80	10,17	54,05	4,85	7,23	0,25	1,90	3,01

Norma ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO9909 de 1997.

■ Valor medio fuera de la norma.

**Tabla 3.5.2.d.- Calidad química del aceite esencial de *S. officinalis* en las recolecciones de otoño y primavera desde 2004 a 2007, (%).**

Norma ISO	1-6,5	1,5-7	0,5-3	5,5-13	18-43	3-8,5	4,5-24,5	-1	-2,5	-12
<b>Otoño 2007</b>										
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	limoneno	1,8-cineol	$\alpha$ -tuyona	$\beta$ -tuyona	alcanfor	linalol	acetato de bornilo	$\alpha$ -humuleno
0	4,97	4,59	1,62	6,85	47,53	3,37	17,82	0,30	0,38	1,36
25	2,39	2,28	1,17	7,27	55,08	5,29	12,00	0,26	0,55	1,60
50	2,53	2,48	1,27	5,42	55,45	4,94	15,09	0,21	0,54	1,97
75	2,85	1,79	0,98	6,24	61,17	4,36	10,22	0,21	0,69	1,41
100	3,34	2,07	1,34	8,87	54,90	2,39	12,80	0,24	0,81	2,15

ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO9909 de 1997.

■ Valor medio fuera de la norma.

### 3.5.2.- *Salvia lavandulifolia*.

#### Composición química

El déficit hídrico afectó levemente el aceite esencial de *S. lavandulifolia* y la mayoría de los componentes no se vieron afectados por los distintos tratamientos de riego. Tan sólo dos componentes mostraron variaciones debidas al estrés hídrico, el cineol y el alcanfor. El contenido medio en cineol fue superior de manera significativa en el riego con 25% de ETo y el alcanfor disminuyó con el déficit hídrico, alcanzando en secano los niveles más bajos (Tabla 3.5.3).

Entre las dos recolecciones (primavera y otoño) se encontraron diferencias en contenidos de canfeno, sabineno, 1,8-cineol, terpinoleno, alcanfor y acetato de linalilo. En las recolecciones de primavera, sabineno y terpinoleno alcanzaron mayores porcentajes. En otoño, estos compuestos descendieron significativamente y fueron canfeno, 1,8-cineol, alcanfor y acetato de linalilo los que aumentaron de un modo significativo.

Entre los dos años estudiados se observaron diferencias en el contenido de sabineno, 1,8-cineol, terpinoleno, acetato de linalilo y borneol. La media de sabineno fue más alta el primer año de cultivo (2006) y posteriormente decreció. Los contenidos de 1,8-cineol, terpinoleno y acetato de linalilo aumentaron en el segundo año.

El análisis estadístico mostró interacciones para el cineol en todos los casos, para canfeno en tratamiento y año, y en sabineno y borneol para recolección y año.

#### Calidad

El aceite esencial obtenido de *S. lavandulifolia* fue de buena calidad, especialmente rico en sabineno, limoneno y alcanfor. La presencia de altos contenidos de sabineno y limoneno fue generalizada en todos los tratamientos, recolecciones y años estudiados.

En los valores medios de otoño se produjo un exceso de alcanfor, que fue un inconveniente relativamente menor, porque si bien superó el límite de la normativa en una pequeña cantidad, las medias de cada tratamiento de los dos años estudiados estuvieron dentro de los valores que establece la norma de calidad ISO 3526:1991 para la farmacopea (Tabla 3.5.3).

La mejor calidad del aceite esencial de *S. lavandulifolia* se observó en el riego de 25% de ETo, con valores por encima de la Norma sólo en el contenido de sabineno, aunque en muy poca cuantía.

La composición media de los aceites en seco quedó fuera de las normas de calidad por exceso de sabineno, limoneno y por no alcanzar niveles aceptables de cineol (Tabla 3.5.3). En las medias anuales destacó el alto contenido medio de sabineno durante el primer año de cultivo, que descendió en 2007 de manera significativa consiguiendo cumplir los contenidos exigidos por la normativa. El contenido en limoneno tuvo un comportamiento muy similar, en este caso el descenso no fue estadísticamente significativo, pero la disminución lo acercó a las cantidades aceptadas en la normativa vigente.

Todos los demás componentes, como  $\alpha$ -pineno, canfeno, 1,8-cineol, terpinoleno, linalol, acetato de linalilo, terminen-4-ol y borneol mostraron valores medios anuales dentro de los límites de calidad establecidos.

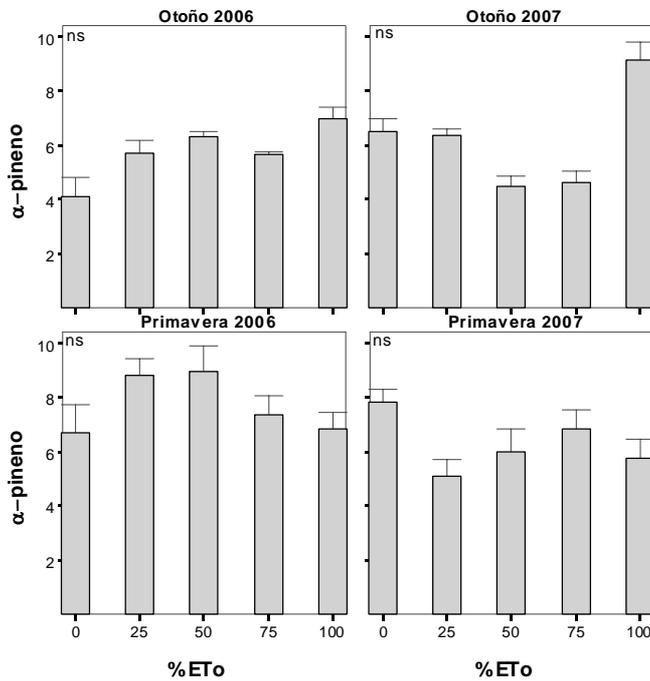
**Tabla 3.5.3.-Composición química de *S. lavandulifolia* en cada uno de los tratamientos, en las recolecciones de primavera y otoño de 2006 y 2007.**

Componente	ISO	%ETo						Estación		Año		Interacciones					
		P	0	25	50	75	100	P	Primav.	Otoño	P	2006	2007	TxA	AxR	TxR	TxAxR
<b>α-pineno</b>	<b>4-11</b>	ns	6,3	6,5	6,4	6,1	7,2	ns	7,0	6,0	ns	6,7	6,3	ns	ns	ns	ns
<b>canfeno</b>	-	ns	9,9	8,6	8,6	8,8	10,0	*	8,5 b	9,8 a	ns	9,2	9,3	*	ns	ns	ns
<b>sabineno</b>	<b>0,1-3</b>	ns	3,9	3,6	3,5	3,9	4,7	**	4,4 a	3,4 b	**	4,7	3,2	ns	**	ns	ns
<b>limoneno</b>	<b>2-5</b>	ns	5,5	4,6	5,0	5,3	5,1	ns	5,1	5,1	ns	5,2	5,1	ns	ns	ns	ns
<b>1,8-cineol</b>	<b>11-25</b>	*	10,8 b	16,0 a	12,3 b	12,7 b	12,6 b	**	10,5 b	15,7 a	*	12,0 b	13,8 a	*	**	**	ns
<b>terpinoleno</b>	-	ns	0,4	0,4	0,5	0,6	0,4	**	0,6 a	0,3 b	**	0,5	0,5	ns	ns	ns	ns
<b>alcanfor</b>	<b>11-36</b>	*	33,9b	34,5ab	35,5 a	35,2 a	35,4a	**	32,8 b	36,9 a	ns	35,2	34,5	ns	*	ns	ns
<b>linalol</b>	<b>0,5-9</b>	ns	0,8	0,6	0,8	0,6	0,7	ns	0,7	0,7	ns	0,7	0,7	ns	ns	ns	ns
<b>acetato de linalilo</b>	<b>&lt;5</b>	ns	0,6	0,2	0,5	0,5	0,4	*	0,3	0,6	*	0,4 b	0,5 a	ns	ns	ns	ns
<b>terpinen-4-ol</b>	<b>&lt;2</b>	ns	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	ns	0,5	0,5	ns	0,5	0,5	ns	ns	ns	ns
<b>borneol</b>	<b>1-8</b>	ns	4,6	3,6	4,3	3,1	3,6	ns	3,9	3,7	*	3,4	4,3	ns	**	ns	ns

ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO3526 de 1991.

\*\*=P≤0,01, \*=P≤0,05 y ns=diferencias no significativas.

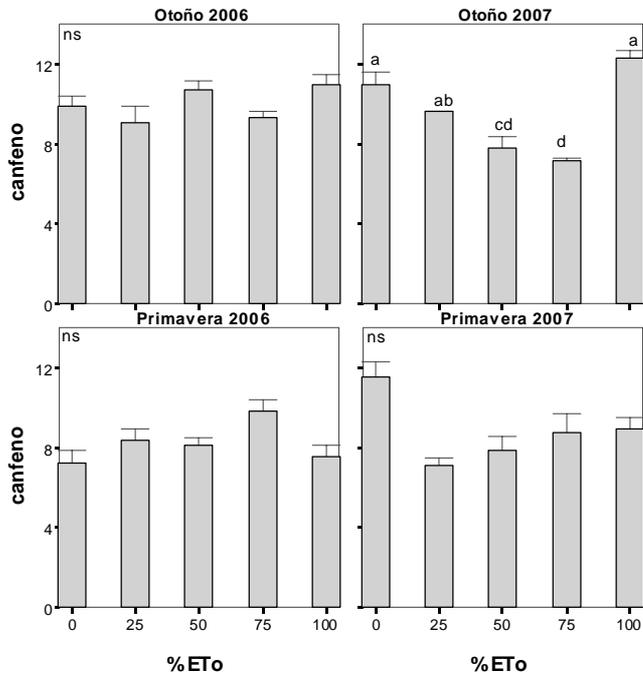
**Efecto del riego en la composición del aceite esencial de *Salvia lavandulifolia* subsp. *vellerea*, en cada una de las recolecciones**



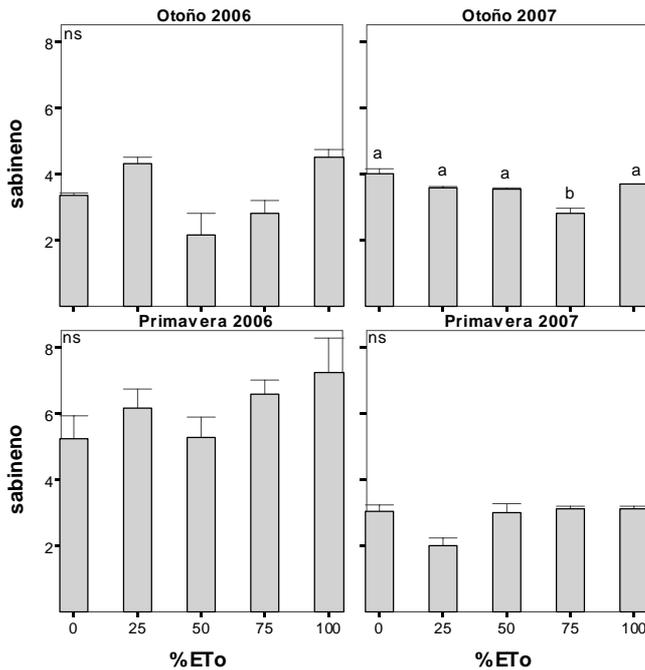
**Figura 3.5.11.-** Contenido en  $\alpha$ -pineno del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2006 a 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.

El contenido de  $\alpha$ -pineno del aceite esencial de *S. lavandulifolia* no mostró variaciones significativas debidas a los tratamientos en ninguna de las recolecciones. Los niveles alcanzados de  $\alpha$ -pineno en todos los aceites analizados fueron medio-bajos (Fig.3.5.11).

El contenido en canfeno se vio afectado por los tratamientos en la recolección realizada en otoño de 2007, alcanzándose en secano y en riego de 100% de ETo los mayores valores de este componente (Fig. 3.5.12). En los tratamientos restantes se observaron valores más bajos, que fueron mínimos en el tratamiento de 75% de ETo. Este comportamiento sólo ocurrió en la segunda recolección de verano del cultivo, ya que en el primer otoño (2006), al igual que en las primaveras no se apreciaron diferencias significativas entre tratamientos.

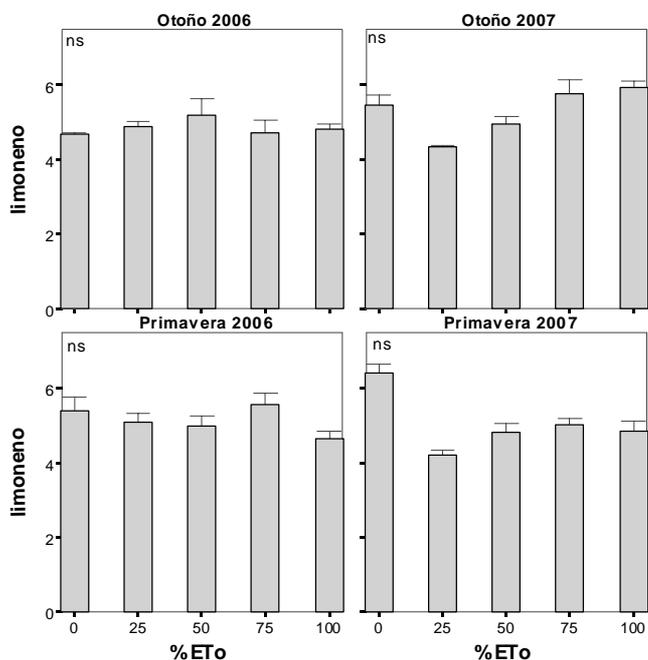


**Figura 3.5.12.-** Contenido en canfeno del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones realizadas desde 2004 a 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.



**Figura 3.5.13.-** Contenido en sabineno del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.

El contenido en sabineno tampoco se vio claramente afectado por el déficit hídrico. En general, el contenido de sabineno en todas las muestras de aceite fue alto, especialmente en la primavera del año 2006, en la que todos los tratamientos estuvieron por encima de un 5% de contenido relativo. Por el contrario, los valores más bajos se observaron en otoño de 2007, especialmente en el tratamiento de 75% de ETo (Fig. 3.5.13).

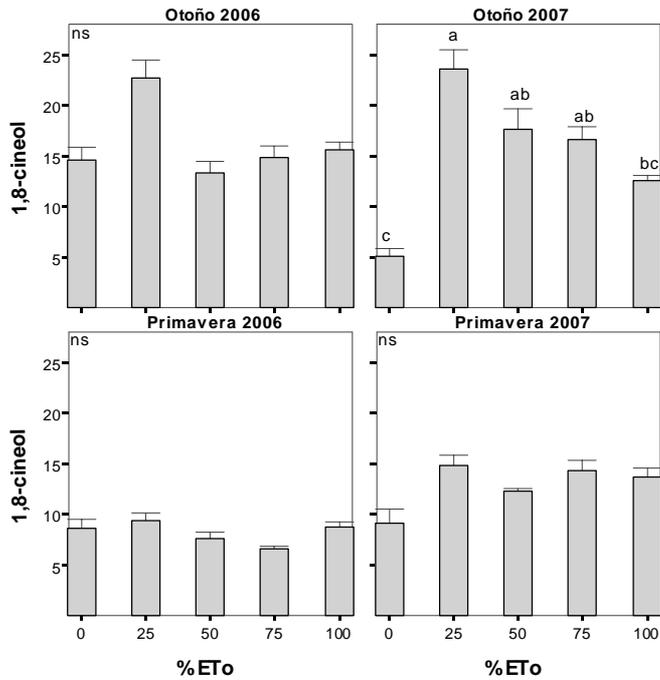


**Figura 3.5.14.- Contenido en limoneno del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.**

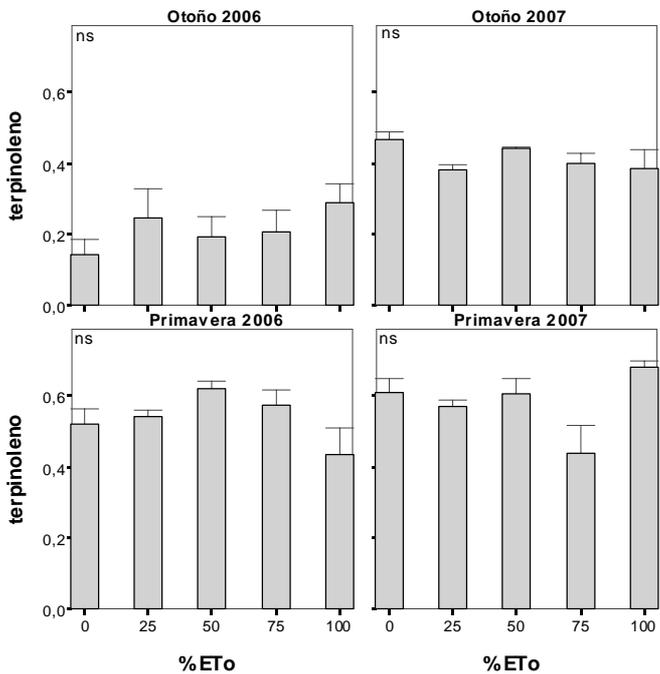
Las variaciones del contenido de limoneno en el aceite esencial no estuvieron relacionadas al riego, ni la época de cosecha o año de recolección. Se observó en cada una de las recolecciones un contenido relativo similar, entre 4-6% (Fig. 3.5.14).

El contenido relativo en 1,8-cineol sí resultó afectado por el agua disponible en el suelo, y alcanzó valores más elevados en el tratamiento de 25% de ETo (Fig. 3.5.15). En secano o en riegos superiores al 25% ETo disminuyó el contenido en cineol del aceite esencial de *S. lavandulifolia*. Este comportamiento fue estadísticamente significativo sólo en otoño de 2007. Se observó un menor contenido en 1,8-cineol en primavera que en otoño, probablemente relacionado con la presencia de flores en la estación de primavera (Fig. 3.5.15).

El contenido en terpinoleno no se vio influenciado por el riego, aunque sí por las recolecciones y los años (Fig. 3.5.16). El terpinoleno alcanzó valores mucho más elevados en primavera que en otoño, y en el segundo año (2007) el aceite presentó mayores valores de terpinoleno que en el primer año (Fig. 3.5.16).



**Figura 3.5.15.-** Contenido en 1,8-cineol del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.



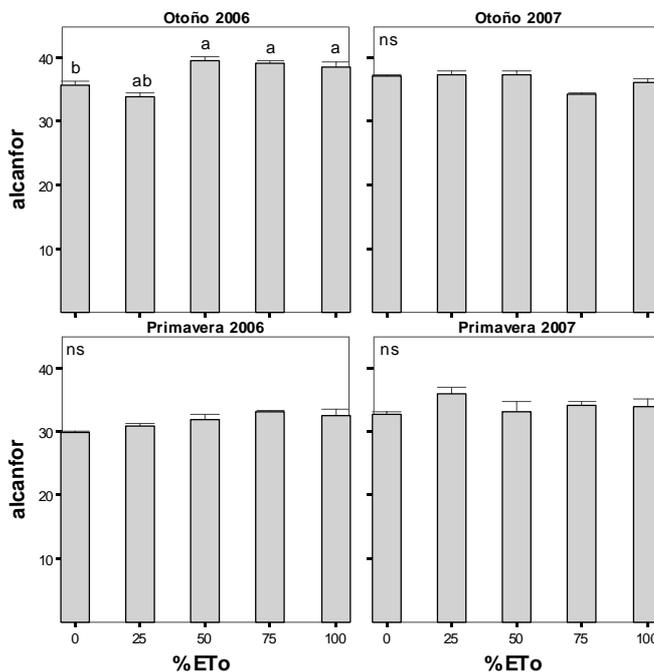
**Figura 3.5.16.-** Contenido en terpinoleno del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.

El alcanfor fue el componente mayoritario del aceite esencial de *S. lavandulifolia* en todas las muestras si bien sólo mostró diferencias significativas entre los tratamientos de riego en la primera recolección, en otoño de 2006 (Fig. 3.5.17). Las recolecciones de primavera y otoño mostraron diferencias en alcanfor (Tabla 3.5.3). En primavera se mantuvieron contenidos similares de alcanfor, en torno al 30%, y en otoño los contenidos aumentaron en todos los tratamientos, situándose alrededor del 35%, en algunos casos alcanzando casi el 40% (Fig. 3.5.17). Los dos años de cultivo tuvieron un comportamiento similar.

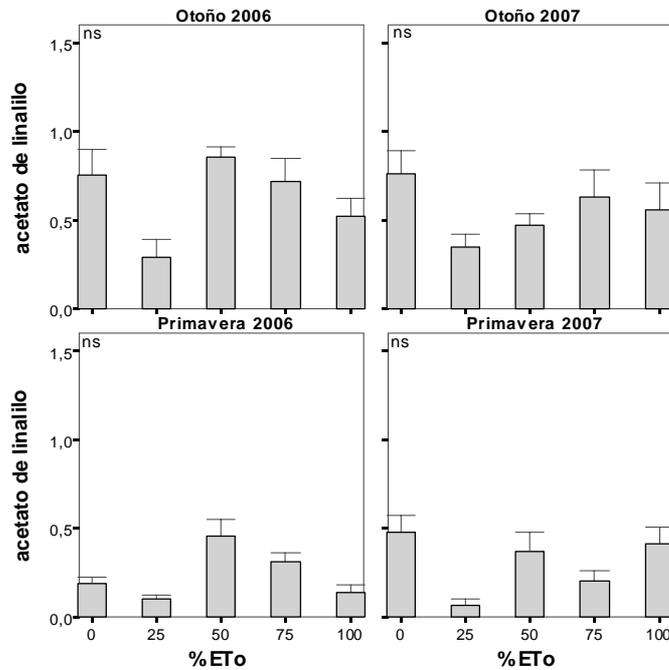
El contenido de acetato de linalilo del aceite no mostró variaciones relacionadas a los tratamientos de riego. Sí cambiaron las concentraciones relativas de este compuesto con las recolecciones, siendo más altas en otoño que en primavera (Tabla 3.5.3, Fig. 3.5.18).

Los contenidos de linalol y terminen-4-ol se mostraron muy variables, en valores bajos, y estas pequeñas variaciones no estuvieron relacionadas al déficit hídrico, ni a la estación de recolección, o al año de estudio (Figs. 3.5.19 y 3.5.20).

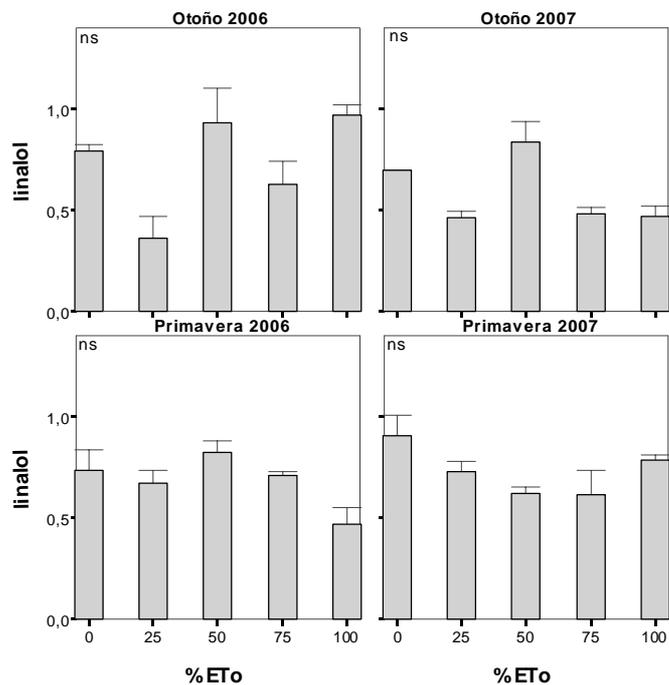
El contenido en borneol sólo mostró diferencias significativas por el riego en las recolecciones de otoño de 2007, observándose un descenso en el contenido de borneol en los riegos más abundantes (Fig. 3.5.21).



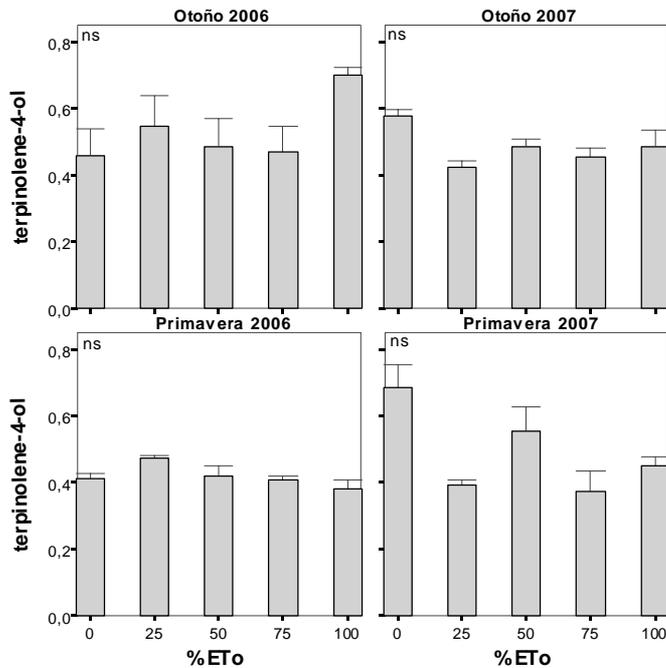
**Figura 3.5.17.-** Contenido en alcanfor del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.



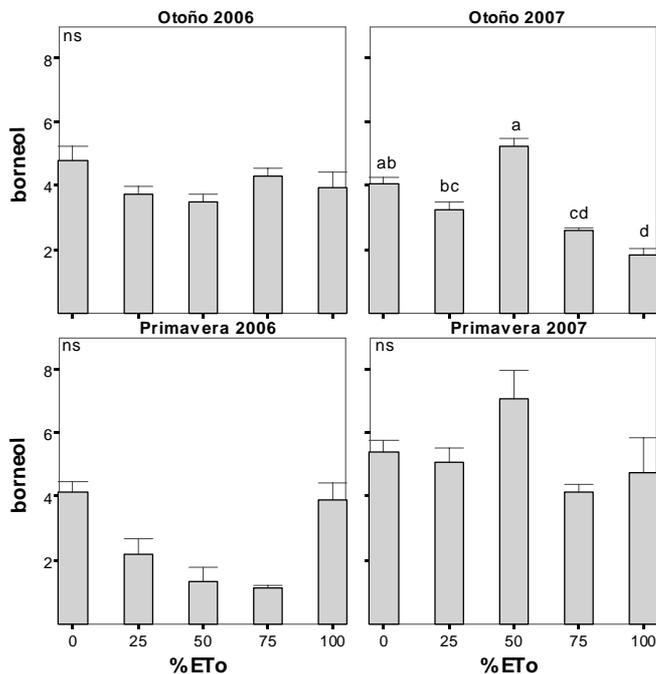
**Figura 3.5.18.-** Contenido en acetato de linalilo del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.



**Figura 3.5.19.-** Contenido en linalol del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.



**Figura 3.5.20.-** Contenido en terpineno-4-ol del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.



**Figura 3.5.21.-** Contenido en borneol del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, en los distintos tratamientos de riego, en cada una de las recolecciones, de 2006 y 2007 ( $P \leq 0,05$ ). Barras verticales  $\pm$ ES.

### **Calidad del aceite esencial de *Salvia lavandulifolia***

La calidad del aceite esencial de *S. lavandulifolia* fue mayor en las recolecciones primaverales, especialmente en la de 2007 (Tabla 3.5.4). En líneas generales, la mayor parte de los componentes que se analizaron estuvieron dentro de los niveles de calidad que establece la normativa vigente (ISO 3526:1991).

El principal inconveniente desde el punto de vista de la calidad lo encontramos en el alto contenido que alcanzó el alcanfor en la mayoría de los tratamientos para las recolecciones de otoño. Superó en muchos casos el límite del 36%. El alcanfor puede llegar a resultar tóxico, de modo que es muy importante controlar su contenido de los aceites especialmente en los productos destinadas al consumo humano.

Los altos contenidos registrados en sabineno y limoneno se repitieron en muchos tratamientos y en la mayoría de las recolecciones. Estos contenidos no fueron peligrosos, ya que estos componentes no son tóxicos y especialmente porque sobrepasaban el límite en cantidades muy pequeñas.

**Tabla 3.5.4.a.- Calidad química del aceite esencial de *S. lavandulifolia* en las recolecciones de otoño y primavera en 2006 y 2007, (%).**

Norma ISO	4-11	-	0,1-3	2-5	11-25	-	11-36	0,5-9	<5	<2	1-8
<b>Primavera 2006</b>											
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	sabineno	limoneno	1,8-cineol	terpinoleno	alcanfor	linalol	acetato de linalilo	terp.-4-ol	borneol
0%	6,68	7,21	5,25	5,38	8,59	0,52	29,79	0,74	0,19	0,41	4,14
25%	8,80	8,39	6,16	5,08	9,45	0,54	30,95	0,68	0,11	0,48	2,18
50%	8,93	8,12	5,28	5,00	8,05	0,62	31,87	0,83	0,45	0,42	1,33
75%	7,34	9,84	6,57	5,57	6,56	0,57	33,12	0,72	0,31	0,41	1,11
100%	6,83	7,55	7,24	4,63	8,74	0,43	32,60	0,48	0,14	0,89	3,9
<b>Otoño 2006</b>											
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	sabineno	limoneno	1,8-cineol	terpinoleno	alcanfor	linalol	acetato de linalilo	terp.-4-ol	borneol
0%	4,08	9,89	3,34	4,68	15,8	0,14	35,8	0,80	0,75	0,41	4,78
25%	5,70	9,07	4,14	4,88	18,8	0,25	33,9	0,36	0,29	0,48	3,75
50%	6,30	10,74	2,17	5,17	13,6	0,19	39,6	0,94	0,64	0,42	3,50
75%	5,65	9,30	2,82	4,72	14,8	0,21	39,2	0,63	0,72	0,41	4,31
100%	6,98	11,0	4,49	4,82	15,7	0,29	38,7	0,97	0,52	0,89	3,95

ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO9909 de 1997.

■ Valor medio fuera de la norma.

**Tabla 3.5.4.b.- Calidad química del aceite esencial de *S. lavandulifolia* en las recolecciones de otoño y primavera en 2006 y 2007, (%).**

Norma ISO	4-11	-	0,1-3	2-5	11-25	-	11-36	0,5-9	<5	<2	1-8
<b>Primavera 2007</b>											
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	sabineno	limoneno	1,8-cineol	terpinoleno	alcanfor	linalol	acetato de linalilo	terp.-4-ol	borneol
0%	0,83	11,56	3,04	6,40	10,63	0,61	32,63	0,91	0,48	0,68	5,42
25%	5,09	7,13	2,15	4,21	14,79	0,57	35,89	0,73	0,07	0,39	5,08
50%	5,98	7,86	3,00	4,81	12,25	0,61	33,19	0,62	0,37	0,56	7,07
75%	6,84	8,79	3,10	5,03	14,31	0,44	34,12	0,62	0,20	0,37	4,15
100%	5,73	7,13	3,13	4,85	13,65	0,68	33,85	0,79	0,41	0,45	4,75
<b>Otoño 2007</b>											
ETo	$\alpha$ -pineno	canfeno	sabineno	limoneno	1,8-cineol	terpinoleno	alcanfor	linalol	acetato de linalilo	terp.-4-ol	borneol
0%	6,50	11,01	3,99	5,45	7,9	0,47	37,25	0,70	0,76	0,58	4,07
25%	6,33	9,64	3,57	4,35	20,9	0,38	37,37	0,67	0,35	0,42	3,25
50%	4,40	7,81	3,73	4,62	15,6	0,44	40,37	0,84	0,47	0,48	5,25
75%	7,61	7,16	3,03	5,75	15,1	0,28	35,82	0,34	0,26	0,35	2,70
100%	10,62	12,32	3,77	5,81	12,5	0,13	39,41	0,24	0,07	0,24	1,81

ISO: Perfil cromatográfico de la Norma ISO9909 de 1997.

Valor medio fuera de la norma.

# DISCUSIÓN





## Efecto del déficit hídrico en el intercambio gaseoso.

El déficit hídrico producido por los tratamientos con menor dosis de riego afectó a la actividad fisiológica de ambas especies, *Salvia officinalis* y *S. lavandulifolia* principalmente al coincidir baja disponibilidad de agua en el suelo y situaciones de mayor déficit de presión de vapor (DPV). Así, el intercambio gaseoso se redujo tanto en *S. officinalis* como en *S. lavandulifolia* todos los veranos, y el descenso fue acusándose con la disminución paulatina del contenido en humedad del suelo en los tratamientos de riego más restringidos, haciéndose máximo en secano, donde se alcanzaron los valores más bajos de fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática. Las mayores diferencias observadas en secano con respecto a máximo riego supusieron una disminución en  $A$  de un 44%, en  $E$  de un 48% y en  $g_s$  de un 57% en *S. officinalis* (Tabla 3.1.1.). Sin embargo en *S. lavandulifolia* las reducciones por secano fueron menores:  $A$  disminuyó un 27%,  $E$  un 28% y  $g_s$  un 29% (Tabla 3.1.2).

Este comportamiento es semejante al experimentado por *Melissa officinalis*, en condiciones de sequía cuando a dos semanas de la suspensión de riegos se produce un descenso de un 29% en  $A$  y de un 50% en  $g_s$  (Munné-Bosh y Alegre, 1999). Del mismo modo, en *Lavandula stoechas* L. se produce un descenso en la asimilación de  $\text{CO}_2$ , el contenido hídrico relativo y la eficiencia fotoquímica del fotosistema II durante el verano. En esta especie la capacidad fotosintética llega a descender hasta un 87% por el déficit hídrico del período veraniego (Munné-Bosh y Alegre, 2000).

El efecto negativo del estrés hídrico por riego deficitario se observó durante todos los veranos en ambas especies y fue especialmente acusado entre finales de julio y principio de agosto (dependiendo de la climatología anual), momento en el que el agua disponible disminuía de manera acusada (Anexo I). A este hecho se unían las condiciones climáticas de elevadas temperaturas y bajo contenido en humedad en el aire (alto DPV), aumentando aún más las necesidades hídricas del cultivo que no se suplían adecuadamente por la baja disponibilidad de agua en el suelo (Anexo II).

En *S. officinalis*, las medidas de fotosíntesis de agosto alcanzaron los valores más bajos en el tratamiento de secano (en 2003:  $4\text{-}5 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y en 2004:  $5\text{-}7 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), bien distanciados de los tratamiento de máximo riego que estuvieron cercanos a los  $20\text{-}24 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Estos valores de  $A$  en secano son muy semejantes a los máximos valores de fotosíntesis obtenidos por otros autores en secano para *S. officinalis* en el levante peninsular ( $6 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Munné-Bosh y Alegre, 2001). Mientras tanto, *S. lavandulifolia* mantuvo diferencias menores entre secano y regadío, pero aun así evidentes, oscilando los dos primeros

años de cultivo entre 14-15  $\mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para el cultivo de secano y en torno a 25  $\mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para el cultivo con el 100% de la ETo.

Los efectos más acusados del estrés hídrico se notaron en los primeros dos años del cultivo (2003 en *S. officinalis* y 2006 en *S. lavandulifolia*), posiblemente por una menor tolerancia de los cultivos jóvenes. Si comparamos los resultados de las medidas realizadas en agosto vemos que las diferencias fueron disminuyendo conforme transcurrían los años de cultivo. Este efecto fue especialmente llamativo para  $A$  y  $g_s$  (Figs. 3.1.1 - 3.1.11). A partir del tercer año el secano mantuvo valores de fotosíntesis más altos, y a partir de 2005 no descendió de 10  $\mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  en *S. officinalis*, a pesar que durante los años 2005 y 2006 se alcanzaran altos niveles de déficit hídrico provocados por condiciones climáticas más severas (Anexo II).

A tenor de los resultados de los tres primeros años, *S. lavandulifolia* tuvo un comportamiento similar al de *S. officinalis* en este aspecto. Durante los dos primeros años, las diferencias fueron mayores entre los tratamientos de regadío y secano, pero ya en el tercer verano, los valores de  $A$  y  $g_s$  se mantuvieron más elevados ( $A$  no descendió de 20  $\mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y  $g_s$  no lo hizo de 0,3  $\text{mmoles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Fig 3.1.5). Sería necesario un estudio más prolongado para poder confirmar que en los siguientes años las diferencias entre secano y regadío tienden a disminuir, y determinar cuáles son los factores determinantes de estos cambios.

Conviene tener en cuenta las diferencias que han existido en el cultivo de las dos especies durante el estudio. Por una parte, los ensayos con ambos cultivos se iniciaron en fechas diferentes, de manera que las condiciones climáticas en cada momento del desarrollo de la planta eran distintas. En las medidas de intercambio gaseoso son determinantes las condiciones climáticas del día de medida, así como la climatología del período inmediatamente anterior. El estudio de *S. officinalis* se realizó durante un período más largo (5 años) que en el caso de *S. lavandulifolia*, donde sólo fueron tres los veranos estudiados. Por eso es interesante la comparación de los valores medios, manteniendo las reservas adecuadas cuando se efectúa esta comparación. Aún teniendo en cuenta las diferencias de tiempos de implantación de ambas especies, la comparación revela diferencias de comportamiento fisiológico muy interesantes e informativas. *S. officinalis* sufrió un mayor descenso en la actividad fisiológica por el déficit de agua mientras que *S. lavandulifolia* se vio menos afectada. Esta especie, en general, pareció mostrar una mejor adaptación frente a situaciones de sequía. Esta habilidad de mantener niveles de fotosíntesis neta más altas en situación de estrés se considera un carácter de tolerancia a la

sequía, como se ha descrito en otros cultivos anuales o perennes (Tezara *et al.*, 2008; Subrahmanyam *et al.*, 2006; Pettigrew, 2004; Lauriano *et al.*, 2004).

En general, el efecto negativo de la sequía sobre  $A$  fue menor en *S. lavandulifolia* que en *S. officinalis*. En la primera especie de *Salvia*, los valores de  $A$  en secano descendieron a  $19,0 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mientras en la segunda los descensos medios alcanzaron  $12,7 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Tablas 3.1.1 y 3.1.2). La media de todos los tratamientos en agosto también mostró diferencias entre especies. En *S. lavandulifolia* se alcanzaron valores mayores de  $A$  ( $22,1 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) que en *S. officinalis* ( $17,3 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Tabla 3.2.1 y 3.1.1).

La reducción de la conductancia estomática y la transpiración, que se observó en ambas especies, constituyen un mecanismo de adaptación de la planta para minimizar las pérdidas de agua. Como ocurre en *Euphorbia pulcherrima* en la que la sequía produce un bajada fuerte de  $g_s$  y  $E$ , especialmente cuando el déficit hídrico se mantiene todo el cultivo (Novak, 2002).

En la conductancia estomática, las diferencias interespecíficas fueron marcadas. Los valores de  $g_s$  de *S. lavandulifolia* fueron superiores ( $0,34 \text{ mmoles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) a los de *S. officinalis* ( $0,25 \text{ mmoles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Aparentemente, para un mismo nivel de déficit hídrico, *S. lavandulifolia* mantuvo una mayor apertura estomática, que permitió un mayor intercambio gaseoso (Tabla 3.2.1 y 3.1.1), con mayores tasas de fotosíntesis y transpiración.

Efectivamente, la mayor apertura estomática en *S. lavandulifolia* permitió tasas más elevadas de transpiración en los valores medios y en las medidas de agosto. La media de  $E$  en todos los tratamientos fue mayor en *S. lavandulifolia* que en *S. officinalis*, entre 35 y 42% en el caso de los tratamientos de riego más deficitarios y en torno a un 15% en los tratamiento con mayor dosis de riego (Tablas 3.1.1 y 3.1.2).

La disminución de la transpiración conseguida a través de la reducción del área foliar y el cierre estomático son las estrategias más importantes que permiten a las plantas reducir la pérdida de agua. Sin embargo, esto ocasiona una caída en la fotosíntesis, al reducirse la concentración de  $\text{CO}_2$  disponible en las células del mesófilo. En una planta sometida a sequía la fotosíntesis disminuye en una primera etapa debido a la reducción en la concentración de  $\text{CO}_2$  subestomática, por efecto del cierre de los estomas. Con déficit hídricos más acusados se presenta, además, una reducción de la actividad fotosintética por inhibición metabólica (Medrano *et al.*, 2009; Azcon-Bieto *et al.* 2004).

Los resultados obtenidos con *Salvia* sugieren que las limitaciones que se producen por déficit hídrico tienen un fuerte carácter estomático, como ocurre en otras especies estudiadas como *Nerium oleander* (Mugnai *et al.*, 1995). Del mismo modo se comportan otras especies

como *Rudbeckia triloba* y *Eupatorium rugosum* sometidas rápidamente a condiciones de estrés hídrico (6 días, plantas en macetas) (Prevete *et al.*, 2000). Los resultados de nuestro estudio, obtenidos a partir de plantas cultivadas en suelo y en condiciones de campo, donde el descenso de la humedad del suelo era paulatino, apuntan a similares conclusiones sobre la limitante estomática de la fotosíntesis, como sugiere la estrecha asociación entre  $A$  y  $g_s$  (Tablas 3.3.1 y 3.3.8).

Algunos trabajos han sugerido que las especies que muestran  $A$  y  $g_s$  muy sensibles al contenido hídrico del suelo, tienen mayor tolerancia al estrés que las especies cuyo  $A$  y  $g_s$  responden más a las variaciones ambientales que a la disponibilidad de agua en el suelo. Esto explicaría porqué varias gramíneas, como *Arrhenatherum elatius* y *Dactylis glomerata* mantienen el intercambio gaseoso sostenido en el tiempo (sin grandes altibajos provocados por las condiciones climáticas) y presentan una mayor supervivencia en sequía, que otras especies como *Poa trivilis*, *Cynosorus cristatus*, *Lolium perenne*, *Festuca rubra*, *Agrostis tenuis* o *Cynosurus cristatus* (Milbau *et al.*, 2005).

Ambas especies de *Salvia* parecen tener diferentes mecanismos de supervivencia ante situaciones de estrés hídrico. *S. officinalis*, especie originaria de centro Europa, menos adaptada a periodos de sequía tan severos como los habituales en la zona mediterránea, sufre variaciones en el intercambio gaseoso muy dependientes de las condiciones climáticas instantáneas, como cambios de radiación, temperatura, DPV, etc. mientras *S. lavandulifolia* parece responder más a la disponibilidad de agua en el suelo, y además es capaz de mantener mayores tasas de fotosíntesis y transpiración en condiciones de estrés similar.

Ambas especies muestran algunas características morfológicas típicas de plantas adaptadas a climas áridos como *Rosmarinus officinalis* y *Quercus Ilex*, que presentan contenidos hídricos bajos en los tejidos durante períodos de sequía y restricción de la pérdida de agua por transpiración, al tener los estomas en cavidades de las hojas la presencia de pubescencia foliar (Medrano y Flexas, 2009).

Aunque también se aprecian importantes diferencias interespecíficas: *S. lavandulifolia* tiene mayor pubescencia foliar y mantiene sus hojas en disposición vertical y abierta, reduciendo la captura de radiación, comportamiento indiferente del aporte de agua que recibe la planta. Mientras tanto *S. officinalis* sólo en situaciones hídricas deficitarias abarquilla y pliega sus hojas, con lo que evita la exposición del haz de la hoja al sol, reduciendo la radiación incidente y disminuye su apertura estomática, como indican los datos de  $g_s$ . Estas diferencias

podrían ser en parte factores responsables de las diferencias observadas entre especies en las relaciones  $A/g_s$ ,  $A/E$  y  $E/g_s$  bajo distintos regímenes hídricos (sección 3.2).

La presencia de tricomas en la superficie foliar constituye otro importante mecanismo adaptativo que permite a las hojas mantener la eficiencia del fotosistema II durante el verano (Morales *et al.*, 2002). Muchos estudios han trabajado sobre el significado ecológico de la pubescencia foliar y en especial sobre los efectos de las propiedades ópticas de las hojas (Johnson, 1975). Esta bien descrito en distintas especies vegetales que la absorbancia de la radiación solar se ve disminuida por la pubescencia, principalmente debido a un incremento en la reflexión foliar (Ehleringer y Forseth, 1989). En *Quercus ilex* subsp. *ballota* la presencia de tricomas en el haz de la hoja se considera un importante mecanismo de defensa contra el daño producido por la exceso de radiación luminosa en comparación con otras especies de *Quercus*. La pubescencia foliar preserva una alta eficiencia del PSII durante todo el verano, esto es especialmente importante en áreas como la mediterránea con elevados niveles de radiación. En las especies glabras como *Q. coccifera* existen otros mecanismos adaptativos frente al exceso de radiación, como los cambios en la pigmentación de la hojas crecidas en condiciones de estrés (Morales *et al.*, 2002).

Semejantes diferencias morfológicas podrían ir acompañadas por menores temperaturas y menores pérdidas de agua (Ehleringer *et al.*, 1981), y pueden reflejar la diversidad en la capacidad adaptativa a las condiciones de aridez ambiental (Billing and Morris, 1951).

Los tratamientos de riego produjeron distintos efectos en la eficiencia en el uso del agua (EUAi) de las salvias (Tabla 3.1.1 y 3.1.2). Los valores medios de EUAi en *S. officinalis* fueron más elevados en los tratamientos de déficit hídrico, con valores superiores a 2,5  $\mu\text{moles CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ . En *S. lavandulifolia* la EUAi tuvo un comportamiento muy similar en todos los tratamientos de riego, alcanzando valores similares a los que se observan en *S. officinalis* en regadío, siempre por debajo de 2,5  $\mu\text{moles CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ . Estos resultados en *S. officinalis*, en los que las condiciones de sequía producían un aumento de EUAi, se han registrado también en varias especies mediterráneas y serían parte de la respuesta adaptativa inicial en estos ambientes áridos (Medrano *et al.*, 2009)

En *S. officinalis*, el cierre estomático producido en situaciones de estrés hídrico no habría limitado la fijación de  $\text{CO}_2$  pero si producido una disminución importante de la pérdida de agua por transpiración, resultando en valores medios de eficiencia en el uso del agua más altos que en *S. officinalis*.

En *S. lavandulifolia* no se observaron niveles de EUAi tan elevados como en *S. officinalis*, pero es posible que haya sido como consecuencia de una mayor capacidad de absorción de agua aún en situaciones de estrés hídrico importante, permitiéndole mayor apertura estomática y el mantenimiento de mayor tasa transpiratoria.

El análisis de las relaciones  $E/g_s$  (sección 3.2) en ambas especies, como el de los contenidos hídricos foliares (Tabla 3.1.1 y 3.1.2), sugieren que en seco, el estrés hídrico afectó muy intensamente a *S. officinalis*. Es posible que las diferencias entre especies no estudiadas en este trabajo (morfología y área foliar, longitud de raíces, etc.) tuvieran importancia en la economía del agua resultando en distintas estrategias de utilización.

### **Efecto del déficit hídrico en las relaciones hídricas.**

Ambas especies se vieron afectadas por el déficit hídrico: los tratamientos más deficitarios produjeron un descenso en la disponibilidad de agua en el suelo que se vio reflejado en disminuciones del contenido hídrico foliar (CHF) y del potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_h$ ).

El descenso del potencial hídrico foliar con el déficit de agua es un comportamiento común a otras especies de uso aromático con mayor o menor tolerancia a la sequía, como *Cymbopogon martinii* (Fatima *et al.*, 1999) y *C. winterianus* Jowit (Farooki *et al.*, 1998) o en especies de nuestra flora autóctona como *Lavandula pedunculata*, *Thymus zygis*, *Genista hirsuta* y *Halimium viscosum* (Lansac *et al.*, 1994).

En *S. officinalis* en seco, el CHF descendió un 13% y el  $\Psi_h$  un 6.1% con respecto al 100% de ETo (Tablas 3.1.1 y 3.1.2). En *S. lavandulifolia*, el CHF descendió sólo un 6.1% y en esta especie los valores medios de  $\Psi_h$  no mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Como vimos el primer año de cultivo (2005), sí se observó un descenso de  $\Psi_h$  principalmente en seco (Figura 3.1.12). Esta disminución de  $\Psi_h$  sólo ocurrió el primer verano, en el que la planta se mostró más sensible al estrés hídrico. Durante el segundo y tercer año de cultivo, las diferencias disminuyeron.

En *Salvia officinalis* en seco, se alcanzaron valores muy bajos de  $\Psi_h$  a finales de julio-principio de agosto, con  $-3$  MPa en el primer verano. Estos datos de potencial son comparables con los obtenidos por Scholander *et al.* (1965) en *Salvia* creciendo en condiciones de aridez, valores que oscilaban entre  $-2,5$  y  $-3$  MPa en medidas efectuadas al mediodía. En ensayos realizados con salvia en Barcelona, los potenciales hídricos foliares en plantas sin riego alcanzaban los máximos registros durante el mes de julio, con valores de  $-2.06$  MPa (Munné-

Bosh y Alegre, 2001). Esta diferencia con los resultados presentados se puede explicar por las condiciones más suaves ( $T^a$  max : 31,3 °C, DPV 2,1 KPa) durante las medidas en comparación con las condiciones de secano severo de los experimentos presentados en esta memoria ( $T^a$  máx.: 35,3°C, DPV: 4,35 KPa).

En *S. lavandulifolia*, los descensos de  $\Psi_h$  fueron mucho menores que en *S. officinalis*. Durante el primer verano, se midieron -1.4 MPa en el tratamiento de secano a finales de agosto, que en septiembre se recuperaron hasta -1.2 MPa. Del mismo modo, en 2006 los valores de  $\Psi_h$  en los tratamientos de mayor déficit fueron similares (Fig. 3.1.12 y 3.1.14). Este comportamiento es habitual en las especies típicamente mediterráneas, en las que se producen recuperaciones significativas en el potencial hídrico de las plantas que han visto reducido el potencial hídrico durante el período seco del verano (Lansac *et al.* 1994). En *S. officinalis*, Munné-Bosch *et al.* (2001) también detectaron la recuperación del  $\Psi_h$  en septiembre, una vez pasado el período de mayores déficits hídricos.

En agosto, el potencial hídrico medio de *S. lavandulifolia* descendió hasta -1,3 MPa, y en septiembre se recuperó a -1,1 MPa (Tabla 3.1.2), siguiendo el comportamiento habitual en plantas aclimatadas a períodos secos.

### **Efecto del déficit hídrico en la producción del cultivo.**

La producción de biomasa resulto afectada por el déficit hídrico en las dos especies pero se detectaron diferencias importantes.

#### ***Salvia officinalis.***

A medida que disminuyó el aporte de agua al cultivo disminuyó la producción de hoja y de aceite esencial por hectárea (Tabla 3.2.1), esta disminución fue especialmente importante en las recolecciones de otoño y en los primeros años de cultivo. Cuando el cultivo alcanzó el máximo potencial de producción (tercer y cuarto año) las diferencias entre tratamientos disminuyeron. La media de producción anual en peso fresco fue superior en todos los tratamientos de riego a las referenciadas para este cultivo en nuestro país. Los valores estimados por Muñoz (1986) y Fernández-Pola (1996) sitúan el rendimiento en torno a 6 y 16 toneladas de peso fresco por hectárea en los años de mayor producción. En los ensayos de Burillo y García Vallejo (2003), las mayores producciones alcanzaron 9,7 toneladas por hectárea y año en condiciones de secano. En nuestras condiciones, los rendimientos alcanzaron

38 toneladas por hectárea. Los resultados obtenidos con esta especie fueron comparables a los señalados sólo en los dos primeros años de cultivo. Posteriormente, las producciones obtenidas fueron semejantes a las conseguidas por otros autores para variedades mejoradas (Dudai *et al.*, 1999). No hay que olvidar que en los ensayos se trabajó con material vegetal proveniente de plantas silvestres, probablemente naturalizadas de antiguos cultivos (Valdes *et al.*, 1987), con una elevada heterogeneidad y que no fueron objeto de ninguna mejora ni selección. Algunos autores (Dudai *et al.*, 1999) obtuvieron producciones similares a las registradas en los ensayos presentados empleando una variedad híbrida comercial (*S. officinalis* x *S. fruticosa* cultivar Newe Ya'ar No.4), con 32 t.ha<sup>-1</sup> de peso fresco durante los años de máxima producción. En cualquier caso, es más razonable la comparación de productividad en base a peso de biomasa seca obtenida, para evitar las variaciones en el contenido en humedad, que pueden ser importantes dependiendo de las condiciones climáticas en las que se realizó la cosecha. La producción en peso seco obtenida muestra un elevado rendimiento (10.4 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>) (Tabla 3.2.1), en comparación a la obtenida en Europa Central (5,5 y 5,8 t.ha<sup>-1</sup>), con dos variedades seleccionadas y mejoradas (Regula y Extracta) empleando densidad de plantación similar (4.8 plantas m<sup>-2</sup>) (Carron *et al.*, 2005).

Del mismo modo, la media de los rendimientos anuales en aceite esencial por hectárea en el presente estudio alcanzaron valores entre 65 y 110 l.ha<sup>-1</sup> (Tabla 3.2.7), significativamente más altos a los alcanzados con las variedades mejoradas citadas previamente (48- 82 l.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>) (Carron *et al.* 2005).

Los rendimientos en aceite esencial por hectárea que se obtuvieron en las dos primeras recolecciones fueron comparables a los indicados por otros autores quienes consiguieron rendimientos medios en torno a 21-34 kg.ha<sup>-1</sup> ( $\approx$  19-31 l.ha<sup>-1</sup>) (Muñoz, 1986; Fernández Pola, 1996). En experimentos con *S. officinalis* realizados en Aragón se obtuvieron unas producciones medias anuales muy bajas, 11-14 l.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, pero el cultivo estaba implantado en terrenos pedregosos, con muy baja capacidad de retención de agua (Burillo y García Vallejo 2003). La producción media anual obtenida en los distintos experimentos de la presente Memoria fue muy superior a los datos referidos. En el tratamiento de secano, donde se registraron los menores rendimientos, la producción de aceite esencial por hectárea de cultivo fue entre dos y seis veces mayor (Tablas 3.2.1 y 3.2.7) a las producciones citadas referidas a otras regiones productivas.

El rendimiento en aceite esencial no mostró diferencias significativas entre los distintos tratamientos de riego, situándose en torno a 8,4 y 9,9 ml. kg de biomasa seca<sup>-1</sup> (0,76 y 0,89%

respectivamente), rendimiento algo superior al 0,5% observado en cultivos convencionales por Fernández-Pola (1996) pero muy superior a la media de rendimiento en aceite obtenida por Burillo y García Vallejo (2003) en Aragón (0,35-0,25%).

Las condiciones de estrés abiótico afectan al rendimiento en aceite esencial en muchas especies y suelen existir dos tipos de comportamiento: especies en las que el estrés produce un aumento en el rendimiento, como el caso de *Thymus zygis* subsp. *gracilis*, donde se encontraron aumentos en el rendimiento por unidad de biomasa con la disminución del riego (Sotomayor *et al.*, 2004). En *Grindelia chilensis*, un arbusto perenne patagónico, la producción de resina (compuesto especialmente rico en terpenos como el aceite esencial de *Salvia*) aumentaba posiblemente para proteger a la planta de la radiación ultravioleta (Zabala y Ravetta, 2002).

En otras especies, sin embargo, no se producían alteraciones en la producción de aceite por unidad de biomasa, pero el estrés hídrico disminuía el crecimiento y la producción de peso seco, de manera que ocasionaba una disminución en el rendimiento de aceite esencial por hectárea en especies como *Mentha x piperita* L. (Alkire y Simon, 1992, 1993), *Cymbopogon flexuosus* (Chatterjee, 1995) y *C. winterianus* (Fatima *et al.*, 2000). En otras especies estudiadas, como es el caso de *Cymbopogon nardus* var *confertiflorus* y *C. pendulus*, la producción de aceite esencial por hectárea de cultivo se mantenía constante aún bajo condiciones de estrés elevado (Singh-Sanghwan *et al.*, 1994).

No se encontraron referencias a este respecto en especies del género *Salvia* a excepción de Burillo y García Vallejo (2003) cuyos resultados ya se ha reseñado previamente. Muñoz (1986) y Fernández-Pola (1996) señalaron la importancia de la climatología anual en los cultivos de secano, en los que las condiciones particulares de cada año, relacionadas con las precipitaciones principalmente, pueden ocasionar cambios considerables en la producción final.

Un factor importante del efecto del estrés hídrico en la producción de aceite esencial está relacionado con la edad del cultivo. En los estudios del presente trabajo no se encontró una relación directa entre el agua aportada al cultivo y el incremento de la producción de aceite (Tablas 3.2.1). Las mayores diferencias de producción de aceite relacionadas con los distintos aportes hídricos en todo el período estudiado se observaron en la etapa de máxima producción del cultivo, entre el tercer y cuarto año, probablemente relacionadas con el crecimiento de las plantas y por tanto su mayor capacidad productiva.

También existieron diferencias en el rendimiento de aceite dependiendo de la época de recolección, obteniéndose mayores rendimientos en primavera, probablemente relacionados con el estado fenológico de las plantas (floración). Es posible que este aumento del rendimiento

fuera consecuencia de la presencia de flores por el mayor contenido de aceite en éstas (Perry *et al.*, 1999).

En *S. officinalis*, el análisis de los rendimientos totales del cultivo durante los cinco años estudiados permitió observar un efecto claro del agua aportada al cultivo en la producción de hoja y aceite esencial por unidad de superficie. Los tratamientos con mayor volumen de riego no guardaron diferencias entre ellos (Fig. 3.2.1). En la producción de peso seco, un aporte hídrico de más del 50% de la ETo no produjo diferencias significativas con los de mayor riego (Fig. 3.2.1). En el caso del aceite esencial, no existieron diferencias significativas en producción de los mismos a partir de 75% de la ETo (Fig. 3.2.1).

Dependiendo de las condiciones de cultivo y del destino final de la producción (biomasa o aceite esencial), los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten sugerir el régimen de riego más apropiado para un uso más eficiente del agua disponible. Así, el rendimiento de hoja requiere menor dosis de riego (un 50% de la ETo) para alcanzar los niveles máximos de producción, mientras que para optimizar el rendimiento en aceite esencial es conveniente aumentar el riego al menos hasta el 75% de la ETo.

### ***S. lavandulifolia.***

El rendimiento de *S. lavandulifolia* no se vio afectado por los tratamientos de riego deficitario, ni en las recolecciones de otoño, ni las de primavera. En los tratamientos con mayor dosis de riego se observó un mayor crecimiento y mejor estado fisiológico (actividad fotosintética elevada, alta tasa transpiratoria) (Sección 3.1 y Anexo IV) pero se registró una tasa de mortalidad de plantas muy elevada, probablemente relacionada con el exceso de humedad en el suelo (Material y métodos, Fig. 2.2). De este modo, el aumento de marras en el cultivo con alto riego determinó que la producción en todos los tratamientos fuera semejante.

Las producciones medias de cada recolección estuvieron en torno a 15,4 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de peso fresco (5,6 t peso seco.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>). Estos datos de rendimiento fueron muy superiores a los publicados por Burillo y García Vallejo (2003), donde se obtuvo una media de 3 t peso fresco.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Si bien la densidad de plantación en el trabajo referido fue inferior, considerando las marras en los experimentos de esta memoria, la producción anual fue seis veces superior con sólo el doble de plantas. Estas producciones obtenidas con *S. lavandulifolia* son incluso comparables a las obtenidas con variedades mejoradas de *S. officinalis* que presentan homogeneidad en el crecimiento y la fenología (Carron *et al.* 2005).

El déficit hídrico no afectó el rendimiento de aceite esencial por unidad de biomasa y en todos los tratamientos se alcanzaron rendimientos muy elevados, cuyos valores promedios oscilaron entre 31-37 ml.kg<sup>-1</sup>.ms<sup>-1</sup> (2,8-3,3%), aunque existieron recolecciones con rendimientos considerablemente más altos, con 61 ml.kg<sup>-1</sup>.ms<sup>-1</sup> (5,5%). Esta producción conseguía superar el rendimiento mínimo establecido por la norma de calidad en hoja que exige un 1,05% (ISO3526:1991).

Los resultados obtenidos en el presente estudio fueron semejantes a los rendimientos obtenidos en poblaciones naturales de *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea* que oscilaban entre 1,4 y 4,7%, dependiendo de la zona donde se habían cosechado (Jordán *et al.* 2007). Los cultivos de *S. lavandulifolia* subsp. *lavandulifolia* seleccionados de ecotipos locales de Aragón nunca mostraron rendimientos superiores a 0,65% (Burillo y García Vallejo 2003).

En esta especie se observaron los mayores rendimientos de aceite esencial por unidad de biomasa en otoño, al contrario de lo que ocurría en *S. officinalis*, en la que los mayores rendimientos se obtenían en primavera, coincidiendo con la floración del cultivo. En este sentido, se debe tener en cuenta que la floración de *S. lavandulifolia* fue muy heterogénea y se alargó considerablemente en el tiempo, lo que complicó el establecimiento del momento óptimo para la recolección, por la dificultad para determinar el momento de plena floración.

El rendimiento en aceite esencial por hectárea fue muy elevado, con valores medios entre 70 y 112 L.ha<sup>-1</sup> en cada recolección, con incrementos importantes en primavera y otoño de 2007 con 149 L.ha<sup>-1</sup> y 114 L.ha<sup>-1</sup> respectivamente (Tabla 3.4.4).

Son escasas las referencias relacionadas con el cultivo de *S. lavandulifolia* y su rendimiento en aceite esencial. Burillo y García Vallejo (2003) obtuvieron 19 L.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> durante 10 años de su estudio y los rendimientos en aceite esencial de poblaciones silvestres publicados por Sotomayor (2007) mostraban rendimientos similares a los indicados en esta memoria.

Los datos del rendimiento en aceite esencial del cultivo de *S. lavandulifolia* con medias anuales de 185 L.ha<sup>-1</sup>, estarían por encima de las variedades comerciales *S. officinalis* con medias de 48- 82 l.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> (Carron *et al.*, 2005).

El análisis estadístico no desveló diferencias significativas entre tratamientos de riego en los rendimientos totales del cultivo (producción de peso fresco, seco y aceite esencial), a pesar de que se observó una leve tendencia creciente de la producción con el aumento del déficit hídrico. En el balance de producción total destacó el tratamiento de riego de 50% de ETo, por ser el tratamiento hídrico que alcanzó una alta producción de peso seco y aceite

esencial por hectárea (Tabla 3.4.3). Los altos coeficientes de variación consecuencia de la heterogeneidad del material procedente de poblaciones silvestres disminuyeron, en algunos casos, la significación estadística del efecto de los tratamientos sobre algunos parámetros determinados

El tratamiento con 50% de ETo fue el que alcanzó mayor producción total probablemente por un menor número de marras si lo comparamos con los de mayor riego (Material y métodos, Fig. 2.2), y el mayor crecimiento de las plantas en relación a los tratamientos con mayor déficit hídrico (Anexo IV). Los tratamientos que proporcionaban mayor aporte hídrico alcanzaron muy bajos niveles de producción. Claramente, el cultivo de *S. lavandulifolia* se vio afectado negativamente por el exceso de humedad, manifestándose en una alta tasa de marras (en torno al 60% en la última parte del estudio).

### **Eficiencia en el uso del agua de los cultivos.**

Desde un punto de vista productivo, el secano en *S. officinalis* fue claramente el tratamiento donde se obtuvo la mayor eficiencia en el uso de agua. En otoño, momento en el que los tratamientos con menor aporte hídrico aprovechaban de modo más eficiente cada unidad de agua suministrada para producir biomasa y aceites (Tabla 3.3.2). La eficiencia fue mayor en otoño que en primavera y varió significativamente en los distintos años de cultivo.

Si nos atenemos a la eficiencia del cultivo de *S. officinalis* en los totales, el tratamiento de secano fue en el que el agua se empleó con mayor eficiencia para la producción de aceite esencial (Fig. 3.3.2). En la producción de hoja también se aprecian elevados valores de EUAs en secano, pero las diferencias con los restantes tratamientos no fueron significativas estadísticamente.

La eficiencia en el uso del agua para la producción de hoja y aceite en *S. lavandulifolia* siempre resultó mayor en secano, a excepción de la primavera de 2006, posiblemente por la escasa precipitación durante el invierno de 2005 y por ser la primera recolección. En 2005 no se había realizado ninguna recolección para ayudar al establecimiento de la planta, que es algo más lento que el de *S. officinalis*.

Algunos autores cuestionan las diferencias de EUA entre especies calculadas en base a la producción por unidad de recurso empleada (Ludlow y Muchow, 1990). Otros no encuentran que la EUA se vea afectada por la sequía (Fisher y Turner, 1978; Walker, 1986). Sin embargo trabajos recientes encuentran diferencias a nivel de cultivo en condiciones de sequía haciendo las correcciones pertinentes (Hufstetler *et al.*, 2007 Johnson y Henderson, 2002).

La comparación de la eficiencia entre las dos especies resulta interesante por las diferencias que existen entre ambas, que podrían ser útiles de cara a la elección de una u otra especie para el cultivo. El cultivo de *S. lavandulifolia* tuvo una eficiencia en el uso del agua muy superior para la producción de aceite esencial (EUA AEp y EUA AEs) a la de *S. officinalis*, cuyos valores fueron en la mayoría de los casos un 90% inferiores (Tablas 3.3.2 y 3.3.8). Ahora bien, en producción de biomasa, el cultivo de *S. officinalis* tuvo mejores resultados (considerando EUApf y EUAs). Si se comparan las cosechas con rendimiento más altos en los dos cultivos (2006 para *S. lavandulifolia* y 2005 para *S. officinalis*), se obtiene valores de sólo 9,1 kg de peso seco por litro de agua aportada en *S. lavandulifolia* (Tabla 3.3.2) mientras que en *S. officinalis* se alcanzan los 65,7 kg de peso seco (Tabla 3.3.8).

Resulta evidente, conforme a estos resultados que la elección de la especie a cultivar, dependerá de las condiciones edafoclimáticas, de los recursos hídricos y el rendimiento esperado. Si nos interesa la producción de hoja, la especie más apropiada es *S. officinalis* por los mayores rendimientos de biomasa. Si se tiene la opción de destilar y canalizar la producción de aceite esencial, la mejor elección es claramente *S. lavandulifolia*.

### **Asociación entre parámetros fisiológicos y productivos.**

La relación entre los parámetros fisiológicos y productivos fue especialmente interesante. El análisis permitió encontrar una relación significativa entre estos parámetros, con coeficientes de correlación altamente significativos especialmente en *S. officinalis* (Tablas 3.4.1-5).

Estos análisis de la regresión tienen especial interés por varios motivos, entre otros, comprender el comportamiento fisiológico de la especie ante situaciones de estrés hídrico, como el sufrido durante el período veraniego, así como la relación que existe entre estos parámetros y la producción final del cultivo, de manera que puedan servir de indicadores para optimizar el riego del cultivo mejorando la eficiencia en el uso del agua o bien para emplearlos como caracteres de selección (Ludlow y Muchow, 1990; Araus *et al.*, 2002).

Con estos análisis se puede concluir que en *S. officinalis* tanto la apertura estomálica como la fotosíntesis estaban directamente relacionadas con la producción de peso seco y litros de aceite esencial por hectárea, aunque con el transcurso del tiempo la relación entre estos parámetros disminuía. Los parámetros relacionados con el estado hídrico de la planta ( $\Psi_h$ , CHF) mantuvieron una relación significativa aunque dejaron de estar relacionados con la producción a partir del tercer año de cultivo. Como se indicara anteriormente (Figs. 3.1.2, 3.1.4,

3.1.6, 3.1.8 y 3.1.10), los valores de contenido en agua y potencial hídrico foliar al igual que los de producción presentaban menores diferencias entre tratamientos con el paso de los años. Con el paso del tiempo, los procesos de aclimatación del cultivo de *S. officinalis* a condiciones de baja disponibilidad hídrica podrían haber disminuído la dependencia al agua suministrada en los riegos.

En *S. lavandulifolia*, sin embargo no se registró una relación lineal entre los parámetros fisiológicos y productivos que pudieran resultar útiles para ajustar la dosis de agua y evitar condiciones de estrés hídrico que pudieran penalizar la producción. Es posible que en esta especie, cantidad de marras (mortalidad) que sufrió el cultivo particularmente en los tratamientos con mayor aporte hídrico, desvirtuaran la relación al afectar al rendimiento por unidad de superficie. En efecto, como se ha descrito, el rendimiento no se vio afectada por el riego, pero la planta respondió de manera positiva al riego, incrementando su crecimiento y la producción por planta. Se encontró una relación lineal entre indicadores de la actividad fisiológica, especialmente  $A$ ,  $g_s$  y CHF y la acumulación de biomasa por planta (peso seco), con coeficientes de correlación estadísticamente significativos (Anexo V). Otras diferencias entre especies que deberían analizarse con mayor atención en un futuro, por su implicación en la productividad y su posible manipulación para el desarrollo de modelos son las observadas en las relaciones de parámetros como  $A/g_s$  y  $A/E$  (Sección 3.2) y aspectos morfológicos (área foliar, reflectancia, longitud y grosor radical, etc.) con importante repercusión en la economía hídrica de la planta.

La fotosíntesis es un parámetro muy estudiado por su relación con la producción de biomasa y el rendimiento final de los cultivos (Hay y Walter, 1989). Si bien se puede emplear la medida de la actividad fotosintética para mejorar la productividad del cultivo (Lambers, 1987; Austin, 1989), no siempre se ha podido establecer una relación directa entre fotosíntesis foliar y producción (Evans, 1975; Elmore, 1980). Los motivos de esta aparente contradicción están relacionados al peso de otras variables de importancia en la determinación del rendimiento, tales como el área foliar, la biomasa foliar o incluso aspectos relacionados con la eficiencia de transporte de los asimilados fotosintéticos y el tamaño de los destinos (sumideros) vegetativos y reproductivos (hojas y tallos, o flores y frutos) (Elmore, 1980; Hay y Walter, 1989). Como se observara en *S. officinalis*, se han comprobado estrechas relaciones entre fotosíntesis y producción en distintos cultivos como espárrago (Marty y Warwick, 1999), maíz (Crosbie y Pearce, 1982), *Vigna mungo* (Chandra Babu *et al.*, 1985), algodón del tipo Pima o Upland (Cornish *et al.*, 1991, Pettigrew y Meredith, 1994), y en distintas especies arbóreas (Muthuchelian, 1992).

Un estudio integrado considerando otros factores que afectan la actividad fisiológica del cultivo podría resultar interesante para modelizar la respuesta del rendimiento a los cambios en la disponibilidad de agua en el suelo. Posiblemente, al tener en cuenta los distintos cambios inducidos por el estrés hídrico, como los movimientos paraheliotrópicos, los cambios del área foliar y la estructura de la planta permitirían una aproximación más ajustada a la actividad fotosintética total y el potencial productivo del cultivo.

## **Efecto del déficit hídrico en la composición química y calidad del aceite esencial**

### ***Salvia officinalis***

El cultivo de *S. officinalis*, mostró interesantes diferencias en la composición química en las recolecciones de los años 2005, 2006 y 2007. Del mismo modo se produjeron importantes cambios de composición entre las recolecciones de primavera y otoño. Las diferencias en la composición química del aceite esencial entre los años de cultivo fueron menores que las debidas a otros factores, como el momento de la recolección o el déficit hídrico sufrido por el cultivo. El déficit hídrico produjo modificaciones en la composición química media de *S. officinalis*, con un aumento considerable en componentes como canfeno, limoneno, alcanfor y linalol, y un descenso en los niveles de 1,8-cineol y  $\alpha$ -tuyona. Otros componentes no se vieron afectados como fue el caso de  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -tuyona, acetato de bornilo y  $\alpha$ -humuleno.

No fue posible comparar los resultados obtenidos con otros estudios, ya que no se encontraron referencias específicas referidas a *S. officinalis* en condiciones de distinta disponibilidad hídrica. Sí se puede contrastar el comportamiento de algunos de los componentes del aceite esencial con resultados obtenidos en otras especies de la misma familia bajo situaciones de estrés hídrico. Así, compuestos como canfeno, limoneno y linalol del aceite esencial de *Thymus hyemalis*, un tomillo endémico del sudeste peninsular (Jordan *et al.*, 2003), tuvieron un comportamiento similar al registrado en salvia, aumentando su concentración relativa en condiciones de menor disponibilidad hídrica.

En *Thymus vulgaris*, el tomillo más común y extendido, se observó un mayor contenido relativo de linalol bajo condiciones de riego deficitario (Letchamo y Gosselin, 1995; Letchamo *et al.*, 1996). El linalol es un componente que también se ve afectado por la temperatura y la intensidad de la radiación lumínica que recibe la planta. En estudios realizados con albahaca, *Ocimum basilicum* (variedad Sweet Genovese) se observó un aumento de linalol al aumentar la

temperatura y la radiación (Chang *et al.*, 2007ab). En el presente trabajo, si bien *S. officinalis* no recibió tratamientos con distinta radiación o temperatura, por efecto del déficit hídrico en los tratamientos de riego más deficitarios, el aumento de la temperatura de la hoja por disminución de transpiración, así como el movimiento paraheliotrópico de las hojas modificando la radiación recibida, pudieron ser factores determinantes de los cambios de concentración relativas de estos compuestos.

Los resultados obtenidos (Sección 3.5) no muestran que el estrés hídrico afecte de una manera especial a los componentes por su peso molecular, tipología y familia. En otras especies, como *Thymus zygis* subsp. *gracilis*, el riego favorece la producción de un aceite esencial rico en compuestos de bajo peso molecular (Sotomayor *et al.*, 2004). En *S. officinalis*, sólo se apreció un incremento medio de alcoholes y cetonas (linalol y alcanfor) durante el período vegetativo (Tabla 3.5.1), tal como se ha descrito en *Thymus hyemalis* (Jordán *et al.*, 2006).

También se observaron variaciones considerables en el perfil del aceite de *S. officinalis* dependiendo de la estación en la que se obtuvo. Estas variaciones se deberían, con mucha probabilidad, al diferente estadio fenológico en el que se encontraba el cultivo en el momento de la recolección. La presencia de flores determina cambios muy importantes en el aceite esencial, como se registró en la primavera de 2005, en la que la floración fue muy abundante (Tabla 3.5.1). La composición química varía según el órgano de la planta en el que se acumule, y el aceite esencial de las flores es diferente en muchos casos al de las hojas (Bruneton 2001). El contenido del aceite en *Salvia* varía por efecto de varios factores, entre los más estudiados la fenología (período vegetativo, floración, fructificación, etc.), la parte de la planta (hoja, tallo, flores), la variabilidad genética, la altitud, la estación del año, etc. (Perry *et al.*, 1999; Santos y Fernández, 2001; Maric *et al.*, 2006; Mirjalili *et al.*, 2006).

En el análisis de cada uno de los componentes por separado destaca  $\alpha$ -tuyona, el principal componente del aceite esencial en *S. officinalis*, que si bien no presentó diferencias significativas entre las recolecciones de otoño y primavera, si se apreció una tendencia a la disminución (Tabla 3.4.1) en la primavera de 2005, año en el que se produjo la mayor floración. Esta variación se podría explicar por el menor contenido en tuyonas de las flores según señalan los resultados de varios autores (Perry *et al.*, 1999; Santos-Gomes y Fernández Ferreira, 2001; Maric *et al.*, 2006; Mirjalili *et al.*, 2006).

Los datos del contenido de tuyonas en flores varían según los autores por la gran variabilidad en esta especie, pero todos coinciden, en líneas generales, en la menor

concentración del compuesto en este órgano. Zawislak y Dyduch (2006) llegaron a encontrar hasta un 50% menos de  $\alpha$ -tuyona en flores en comparación a hojas. Santos-Gomes y Fernandes-Ferreira (2001) observaron una variación de 25,5% de tuyona en hoja y 17,7% en flor y Mirjalili (2006) un 12,8% de tuyona en la recolección realizada en el período vegetativo y un 9.1% en la recolección efectuada en floración.

En todas las recolecciones, a excepción de la primavera de 2005, los valores de  $\alpha$ -tuyonas obtenidos fueron muy elevados, en la mayoría de los casos por encima de 43% (Tabla 3.4.2). Se debe tener en cuenta que estos resultados proceden en la mayoría de las ocasiones del análisis del aceite obtenido por destilación de hoja, incluidos los tallos, en los que la tuyona suele ser más alta (Santos-Gómez y Fernández-Ferreira, 2001).

Los valores medios obtenidos en los experimentos fueron comparables a los alcanzados en Portugal con 55 y 56% de  $\alpha$ -tuyona (Santos-Gómez y Fernández-Ferreira, 2001) o a los indicados por Pitaveric *et al.* (1984) que encontraron contenidos en  $\alpha$ - y  $\beta$ -tuyonas que oscilaban entre 48 y 58% en poblaciones silvestres de *Salvia*.

Otro de los componentes que varió con las recolecciones fue el canfeno, que presentó valores más bajos en primavera en las tres recolecciones (en promedio, 1,7% en primavera y 2,5% en otoño). Este comportamiento fue similar en Nueva Zelanda donde se observó un descenso importante en canfeno durante la floración (Perry *et al.*, 1999). En cultivos de *Salvia* en Bosnia-Herzegovina se observaron fuertes descensos en canfeno con la floración: mientras en período vegetativo los niveles de canfeno se situaron entorno a 3-4%, en floración estos alcanzaban 1-2% (Maric *et al.* 2006). Sin embargo, otros autores (Santos-Gomes y Fernandes-Ferreira 2001) encontraron contenidos de canfeno de 4,9% en flores y de 2,6% en hoja en cultivos procedentes de dos zonas del noreste de Portugal.

El limoneno es otro de los componentes del aceite esencial que descendió en primavera, porque su contenido en flores suele ser más bajo, como lo muestran los resultados de Santos-Gomes y Fernandes-Ferreira (2001) quienes registraron 0,14% de limoneno en flores y 1,6% en hojas. En nuestro caso, se observaron los valores más bajos de limoneno en junio de 2005 (todos los tratamientos presentaban niveles semejantes de limoneno, en torno a 0,5%), coincidiendo con una floración importante del cultivo. A pesar de que los datos promedio muestran niveles más altos en primavera (1% de limoneno), posiblemente muy influenciados por los altos contenidos de limoneno en las primaveras de 2006 y 2007, en las que la floración fue mucho más escasa.

Del mismo modo, los resultados de los análisis mostraron niveles más elevados de alcanfor en las recolecciones de otoño y en junio de 2005 durante la floración descendieron notoriamente. En los órganos florales el alcanfor disminuye sustancialmente. El alcanfor es un repelente cuya presencia disuadiría a los insectos polinizadores aproximarse a las flores de salvia con las consiguientes desventajas sobre la especie. Santos-Gomes y Fernandes-Ferreira (2001) midieron concentraciones relativas de 19,5% de alcanfor en hojas y 3,5% en flores. Algo menor fue la diferencia observada en plantas de salvia en Iran, en las que se que registró un contenido en alcanfor de un 7,1% en hojas y 1,6% en flores (Mijarlili *et al.*, 2006).

Como pusieron de manifiesto los análisis efectuados, los componentes cuya concentración aumentó en el aceite esencial de primavera fueron  $\alpha$ -pineno, 1,8-cineol,  $\beta$ -tuyona, acetato de bornilo y  $\alpha$ -humuleno.

El cineol aumentó significativamente la concentración relativa en el aceite esencial de salvia en la época de floración, alcanzando 7,8%, lo que supuso un aumento de un 12,5% respecto al otoño. Este componente fue estudiado en diferentes zonas de Europa y en distintas variedades de *S. officinalis* (Perry *et al.*, 1999; Maric *et al.*, 2006), detectándose un aumento de 1,8-cineol en la floración, que alcanzaba concentraciones de 16%, y donde la concentración en las flores llegaba a un 12,7%, un 63% más que en las hojas.

En el perfil promedio de los componentes del aceite estudiado en este trabajo se observó un aumento de  $\beta$ -tuyona en la época de floración, es decir en las recolecciones de primavera (5%), al contrario de lo que sucedía con  $\alpha$ -tuyona. Varios autores señalaron mayores niveles de  $\beta$ -tuyona en las flores que en las hojas de salvia (Perry *et al.*, 1999; Mirjalili *et al.*, 2006) con valores que oscilaban entre 0,9-1,1% en hojas y 2,1-3,99% en flores.

El contenido relativo en acetato de bornilo y  $\alpha$ -humuleno mostró una variación estacional similar. Ambos compuestos mostraron niveles mayores en primavera (1,9% y 3,5% respectivamente), mientras en otoño presentaban un descenso significativo (0,7% y 2,1%). Este hecho podría estar relacionado con la mayor concentración relativa de ambos componentes en el aceite esencial de las flores de *S. officinalis*, como han indicado Santos Gomes y Fernández Ferreira (2001). Estos autores mostraron valores en floración de 1,65% de acetato de bornilo y 11,6% de  $\alpha$ -humuleno, mientras durante el período vegetativo, los valores sólo eran de 1,15% y 5% respectivamente. En los trabajos realizados por Maric *et al.* (2006) la variación de los contenidos de acetato de bornilo y  $\alpha$ -humuleno osciló de 1,7% y 10% respectivamente en floración a 0,4% y 5,5% en el período vegetativo.

Bajo condiciones de déficit hídrico, el perfil promedio del aceite esencial de *S. officinalis* alcanzó un mayor grado de calidad. El aceite producido en los diferentes tratamientos de riego, a lo largo de los 5 años estudiados, en ningún caso cumplió con todos los criterios de calidad que se exige al aceite esencial en las normas internacionales actuales para su uso en farmacopea (ISO9909:1997), aunque los tratamientos de secano fueron los que se acercaban más al óptimo.

El contenido en  $\alpha$ -tuyona fue muy alto en la inmensa mayoría de las muestras analizadas. Salvo en la recolección de junio de 2005, en todos los casos el contenido en  $\alpha$ -tuyona superó el 43%, que es el máximo permitido en la actual norma de calidad del aceite esencial de *S. officinalis* (ISO 9909:1997).

Por los contenidos tan elevados en  $\alpha$ -tuyona, este aceite esencial no podría ser empleado para uso alimentario y fitoterapéutico, aunque el mercado de aceites esenciales podría aceptarlo para su uso en perfumería y droguería. De hecho la industria perfumera valora especialmente las variedades con aceite esencial rico en tuyonas (Carron *et al.*, 2005). Es muy habitual encontrar niveles elevados de  $\alpha$ - y  $\beta$ -tuyonas, y una amplia variación entre individuos, habiéndose descrito plantas de *Salvia officinalis* cuyo aceite alcanza niveles de  $\alpha$ -tuyona en floración de 54% en Nueva Zelanda, 44% en Italia o 42% en Alemania y Canadá (Perry *et al.*, 1999).

La normativa de calidad ha permitido niveles de  $\alpha$ -tuyona mucho más elevados durante años, considerándose de buena calidad el aceite esencial de *S. officinalis* con concentraciones de tuyonas superiores al 50% y de alcanfor menores al 20% (Putievsky *et al.*, 1992). Otros autores sin embargo aceptan valores de  $\alpha$ -tuyonas superiores al 60% (Raal *et al.*, 2007; Dudai, 1999).

Las hojas secas sí tendrían calidad suficiente para herboristería y uso en condimentación por contener niveles de  $\alpha$ - y  $\beta$ -tuyonas relativamente bajos en valor absoluto, ya que los rendimientos en aceite esencial en nuestro cultivo fueron bajos. El nivel máximo de tuyona que permite la norma (ISO9909:1997) es de 5,80 mg.kg<sup>-1</sup> de peso seco. En nuestras condiciones, la mayor parte de las muestras estaban por debajo de esos niveles y no alcanzaban en ningún caso los límites, por lo que podría emplearse como saborizante o condimento (Tisserand y Balacs, 1995).

La calidad del aceite esencial, en términos de concentración de tuyonas, era inferior lo que pudo deberse a que la recolección no se produjo en el momento más adecuado desde el punto de vista de la calidad del aceite. La variabilidad en los contenidos de tuyonas es muy

elevada en esta especie (Perry *et al.*, 1999), oscilando entre un 9 y un 44% de contenido total, y depende, entre otros motivos, tanto del material vegetal, como de factores como estacionalidad, procedencia del cultivo, etc. Sería necesario un estudio detallado de la composición química de la planta y su variación estacional para establecer el momento óptimo de recolección. Algunos estudios señalan variaciones importantes en pequeños lapsos de tiempo (Maric *et al.* 2006) y podría tener interés en nuestras condiciones realizar estudios de los cambios de los componentes en el tiempo para mejorar la calidad del aceite esencial.

Del mismo modo sería muy importante realizar un trabajo de selección de plantas, en busca de los quimiotipos más interesantes para su propagación y estudio, con el objeto de disminuir la heterogeneidad en la composición. Al tratarse de un cultivo obtenido a partir de poblaciones silvestres, en todo el estudio se observó alto grado de heterogeneidad en la composición del aceite esencial.

### ***Salvia lavandulifolia***

Los tratamientos de riego tuvieron un bajo impacto en la composición química del aceite esencial de *S. lavandulifolia*, y sólo se vieron afectados dos componentes de la calidad del aceite. Los análisis efectuados sí mostraron interesantes diferencias entre primavera y otoño, que afectaron de manera acusada la calidad del aceite esencial de *S. lavandulifolia*. Las diferencias entre las dos recolecciones se apreciaron en siete componentes del aceite: en las de primavera, canfeno, alcanfor, 1,8-cineol y acetato de linalilo disminuyeron sus contenidos relativos mientras que aumentaban los de sabineno y terpinoleno.

Aparecieron diferencias entre los dos años estudiados, pero estas tuvieron menor importancia desde el punto de vista de la calidad. Estas diferencias fueron mayores que en *S. officinalis*, especie en la que el perfil se mantuvo más estable con el tiempo.

El déficit hídrico no pareció afectar de manera diferenciada a los compuestos encontrados en el aceite esencial por sus características moleculares, como ya se registrara en *S. officinalis*, no habiéndose detectado diferencias ni en el peso molecular ni en la tipología de los compuestos. En las recolecciones de otoño de hojas procedentes de plantas en estado vegetativo se registraron variaciones del contenido relativo en alcanfor y acetato de linalilo (cetona y éster respectivamente) (Sección 3.5, Tabla 3.5.3). La presencia de estos compuestos aumentó, como ya había sido indicado en otras especies mediterráneas como *Thymus hyemalis* en período vegetativo, cuando aumentan sus compuestos cetónicos, alcohólicos y ésteres (Jordán, 2006).

En nuestro caso, los componentes alcohólicos (terpinoleno, linalol, terminen-4-ol y borneol) mostraron comportamientos dispares en los cambios de concentración.

El alcanfor fue el componente mayoritario de las muestras analizadas de *S. lavandulifolia*. Este compuesto mostró diferencias significativas entre los tratamientos de riego en las dos primeras recolecciones, con mayores niveles en los tratamientos de riego de 50, 75 y 100% de ETo. En primavera, los niveles de alcanfor apenas superaron el 30% de contenido relativo. Pero en las recolecciones de otoño, los valores de alcanfor aumentaron significativamente en todos los tratamientos, alcanzando en muchos casos valores superiores al 36%, límite máximo establecido en la norma de calidad para farmacopea (ISO 3526:1991).

Todas las referencias sobre la composición del aceite esencial de *S. lavandulifolia* subsp. *vellerea* sitúan al contenido en alcanfor como alto, rozando el límite de la norma con valores cercanos al 30% (Jordan *et al.*, 2007) alcanzando incluso en algunos casos contenidos de un 37% (Marcos *et al.*, 1988). Estos datos contrastan con otros estudios que encuentran niveles mucho más bajos de alcanfor, entre un 9% y 20-25% (Marcos *et al.*, 1988; Burillo y García Vallejo, 2003).

No existieron diferencias importantes en el contenido en alcanfor entre los dos años estudiados, manteniéndose aproximadamente los mismos valores, siendo este comportamiento común a otros estudios con salvia (Burillo y García Vallejo, 2003).

Otro compuesto afectado por el déficit hídrico en los valores promedio fue el 1,8-cineol. Los mayores valores de 1,8-cineol se observaron en otoño en los tratamientos de 25% de ETo y los más bajos en el tratamiento de 100% de ETo y en seco. El 1,8-cineol, al igual que otros compuestos como sabineno, terpinoleno, acetato de linalilo y borneol, cambiaron con el transcurso del tiempo de cultivo, aumentando considerablemente, hasta un 14%. Estas variaciones son similares a las encontradas por Burillo y García Vallejo (2003) en cultivos de *S. lavandulifolia* en distintas zonas de Aragón, quienes han llegado a medir aumentos de cineol de un 50% después de 5 y 6 años de cultivo. En este estudio (Burillo y García Vallejo, 2003) no se apreciaron cambios tan importantes a lo largo de los años en otros componentes. Cabe recordar la gran variabilidad del aceite esencial de esta especie, por la multitud de quimiotipos descritos en la península ibérica. Es difícil, por lo tanto, comparar los perfiles de los aceites procedentes los experimentos sin tener en cuenta el aspecto genético de las poblaciones utilizadas.

El contenido en canfeno se vio afectado por los tratamientos de riego en la recolección realizada en otoño de 2007, cuando se alcanzaron los mayores valores de este componente en seco y en 100% de ETo. En los tratamientos intermedios se observaron valores de canfeno

más bajos, que fueron mínimos en el tratamiento de 75% de ETo. Este comportamiento sólo ocurrió en la segunda recolección de verano del cultivo, ya que en el primer otoño (2006) no aparecieron diferencias significativas debidas a los tratamientos. El comportamiento del canfeno en las distintas recolecciones de *S. lavandulifolia* fue similar al de *Salvia officinalis*, siendo más elevado en el aceite de otoño pero tuvo niveles más importantes en *S. lavandulifolia*, con contenidos medios de 9,9%.

El aceite de *S. lavandulifolia* también mostró valores muy elevados de sabineno. En cualquier caso todos los valores de sabineno fueron especialmente altos si consideramos la norma ISO3526:1991 y los datos de otros autores (Burillo y García Vallejo 2003, Jordán *et al.* 2007, Pérez Galindo 2005).

Entre otros componentes, el contenido en el aceite esencial de limoneno alcanzó valores altos pero dentro de los límites de la norma (5%), y llaman la atención por ser elevados comparados con las referencias disponibles (Jordán *et al.*, 2007).

Los niveles alcanzados en  $\alpha$ -pineno en todos los aceites analizados de *S. lavandulifolia* fueron medio-bajos (6-7%). Este componente aparece en muchos perfiles descritos fuera de la norma, en algunos casos con niveles muy bajos como los descritos por Jordán *et al.* (2007) en poblaciones silvestres del sudeste español, oscilando entre 2,8-4,8%. En otros casos son habituales valores de  $\alpha$ -pineno algo más elevados, por encima del 11% (Burillo y García Vallejo, 2003).

El aceite obtenido de *S. lavandulifolia* fue de buena calidad, especialmente rico en sabineno, limoneno y alcanfor, a diferencia de los descritos por otros autores citados (Burillo y García Vallejo, 2003; Pérez Galindo, 2005; Jordán *et al.*, 2007) quienes indican valores moderados en estos componentes.

El exceso de sabineno y limoneno fue generalizado en todos los tratamientos de riego, recolecciones y años estudiados. En cualquier caso no supondría un problema de toxicidad, y la riqueza en estos componentes podría tener interés por ser un atractivo para su uso en perfumería o en la industria agroalimentaria.

El alcanfor apareció en altos niveles en todos los tratamientos de riego en las recolecciones de otoño, aunque fue algo más elevado en los tratamientos con mayor dosis de riego. Fue un inconveniente relativamente menor, porque superaba el límite por una pequeña cantidad. El alcanfor es un componente tóxico, por lo que es importante su control ya que siendo un neurotóxico medio, niveles por encima de los 5g.kg<sup>-1</sup> pueden ser peligrosos (Tisserand y Balacs, 1995).

A tenor de estos resultados podríamos considerar que los tratamientos de riego pueden ser útiles para optimizar la calidad del aceite de *S. lavandulifolia*. A pesar que el déficit hídrico solo afectó a dos compuestos que determinan la calidad del aceite esencial, lo hizo de manera significativa, aumentando la calidad en las recolecciones provenientes de plantas cultivadas con bajo aporte hídrico. En consecuencia, sería interesante continuar profundizando en el estudio de la técnica de riego deficitario, conjugada con otros factores, para consolidar estos resultados y afinar las técnicas de cultivo más adecuadas desde el punto de vista de la mejora de la calidad del aceite esencial de *S. lavandulifolia*.



# CONCLUSIONES





1. En *Salvia officinalis* todos los parámetros fisiológicos determinados se afectaron negativamente por el estrés hídrico sufrido durante la época estival, y se correlacionaron con la disminución de producción en esta estación.
2. La producción de hoja y aceite esencial por hectárea de *Salvia officinalis* en otoño se vio reducida por el estrés hídrico. Cuando el cultivo alcanzó su madurez con el paso de los años, el efecto negativo del estrés sobre la producción era menor.
3. En primavera, los componentes del rendimiento de *Salvia officinalis* no mostraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos de riego, lo que sugiere una recuperación del cultivo durante el período invernal.
4. En esta especie, riegos con el 50% de la ETo permiten alcanzar la mayor producción. Sin embargo, para optimizar el rendimiento en aceite esencial, se debe alcanzar al menos el 75% de la ETo .
5. En *Salvia lavandulifolia*, fotosíntesis, transpiración y contenido hídrico foliar disminuyeron por el estrés hídrico. Los parámetros fisiológicos no se correlacionaron con la producción al final del verano.
6. El déficit hídrico afectó de manera negativa al crecimiento de *S. lavandulifolia* pero no a su capacidad productiva por unidad de superficie. La mayor mortalidad de plantas en parcelas bien regadas compensaba la menor producción de biomasa de las parcelas con riego deficitario.
7. *Salvia lavandulifolia* tiene una mayor capacidad de adaptación ante situaciones de estrés, siendo menos sensible que *S. officinalis* al déficit hídrico. Sin embargo, no tolera condiciones de elevada humedad en el suelo.
8. En situaciones de riego deficitario ambas especies alcanzaron distinta eficiencia en el uso del agua para la producción de biomasa y aceite esencial.
  - a. *S. lavandulifolia* mostró mayor eficiencia en el uso del agua para la producción de aceite esencial.
  - b. *S. officinalis* alcanzó mayor eficiencia en el uso del agua en la producción de biomasa.
9. El rendimiento de aceite esencial por unidad de biomasa no se vio afectado por el déficit hídrico en ninguna de especies, pero sí su composición química. Bajo condiciones de déficit hídrico los aceites esenciales alcanzaron una mayor calidad.

- a. En *Salvia officinalis*, el riego deficitario produjo un aumento considerable en canfeno, limoneno, alcanfor y linalol y un descenso de los niveles de 1,8-cineol y  $\alpha$ -tuyona.
  - b. El déficit hídrico afectó de modo leve la composición química del aceite en *Salvia lavandulifolia*, modificando sólo los niveles de 1,8-cineol y alcanfor.
10. El aceite esencial que se obtuvo de la recolección primaveral, coincidiendo con la floración del cultivo, fue de mayor calidad.
- a. En *S. officinalis* aumentaron  $\alpha$ -pineno, 1,8-cineol,  $\beta$ -tuyona, acetato de bornilo y  $\alpha$ -humuleno y disminuyeron canfeno, limoneno,  $\alpha$ -tuyona y alcanfor.
  - b. En *S. lavandulifolia* disminuyeron los contenidos relativos de canfeno, alcanfor, 1,8-cineol y acetato de linalilo mientras que aumentaron los de sabineno y terpinoleno en las recolecciones de primavera.
11. Ambas especies mostraron gran heterogeneidad en su crecimiento y desarrollo y en la composición de los aceites, por lo que sería recomendable hacer una selección masal en condiciones de riego deficitario para uniformar las poblaciones y facilitar su manejo agronómico.
- a. En *Salvia officinalis* sería importante seleccionar individuos por sus cualidades productivas en condiciones de riego deficitario, atendiendo especialmente a la composición química del aceite esencial.
  - b. En el caso de *Salvia lavandulifolia* sería conveniente
    - i. la selección de material vegetal de poblaciones homogéneas para poder centrar los estudios por variedades y a ser posible al igual que para *S. officinalis* continuar con la selección de individuos concretos a partir de materiales vegetales homogéneos.
    - ii. un estudio a más largo plazo para optimizar las necesidades hídricas y determinar las causas de la mortalidad de plantas por exceso de agua del suelo.

# BIBLIOGRAFÍA





- Alkire B.H., Simon J.E., Palevitch D., Putievsky E., 1992. Use of infrared thermometry to monitor water status in peppermint (*Mentha X piperita* L.), XXIII International Horticultural Congress, Florence, Italy, 27 Aug. 1 Sep., 1990. *Acta Hort.* 306: 385-396.
- Alkire B.H., Simon JE, Palevitch D, Putievsky E, 1993. Water management for midwestern peppermint (*Mentha piperita* L.) growing in highly organic soils, Indiana, USA. *Acta Hort.* 344: 544-556.
- Araus J.L., Slafer G.A., Reynolds M.P., Royo C. 2002. Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for? *Ann.Bot.* 89: 925-940.
- Arteche A. 1998. *Fitoterapia, Vademecum de prescripción. Plantas medicinales.* Masson S.A. Barcelona.
- Austin, R.B. 1989. Genetic variation in photosynthesis. *J. Agric. Sci.* 112: 287-294.
- Azcon Bieto J., Talón M., 2000. *Fundamentos de fisiología vegetal.* McGraw Hill Interamericana, Ediciones Universitat de Barcelona. 45-64.
- Azcón-Bieto J., Pardo A., Gómez-Casanovas N., Irigoyen J.J., Sánchez-Díaz M. 2004. Respuestas de la fotosíntesis y la respiración en un medio ambiente variable. Capítulo 28, pag 873-900. En: Reigosa M.J., Pedrol N., Sanchez-Moreiras A. (eds), *La Ecofisiología Vegetal: Una ciencia de Síntesis*, Paraninfo S.A.
- Blum A. 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Aust. J.Agric. Res.* 56: 1159-1168.
- Billings, W. D., R. J. Morris. 1951. Reflection of visible and infrared radiation from leaves of different ecological groups. *Amer. J Bot.* 38: 372-331.
- Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218: 443-448.
- Bruneton, J. 2001. *Farmacognosia (Fitoquímica, Plantas medicinales)*, Ed. Acribia S.A. Zaragoza.
- Burillo J., Prado A. 1990. El cultivo de plantas aromáticas y medicinales. *Surcos de Aragón* 22:32-36.
- Burillo J., García Vallejo M.C. 2003. *Investigación y experimentación de plantas aromáticas y medicinales en Aragón (cultivo, transformación y analítica)*. Ed. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Cabot P., Busquets M. 2002. Estudio de la capacidad germinativa de *Lavandula angustifolia* Mill., *L.latifolia* Medic., *Mentha pulegium* L., *Salvia lavandulifolia*, *S. officinalis* y *S. sclarea* L. *I Jornadas Ibéricas de Plantas Ornamentales*, pp. 147-151.
- Cabot P., Busquets M., Fanlo M. 2003. Influencia de luz y temperatura en la germinación de: *Foeniculum vulgare* Mill., *Lavandula angustifolia* Mill., *Lavandula latifolia* Medic., *Mentha pulegium* L., *Salvia officinalis* L., *Salvia sclarea* L., *Valeriana officinalis* L., y *Satureja montana* L. *IX Congreso nacional de Ciencias Hortícolas*. Pontevedra.

- Cameron R.W.F., Harrison Murray R.S., Scott M.A. 1999. The use of controlled water stress to manipulate growth of container grown. *J. Hort. Sci. Biotech.* 74: 161-169.
- Carlen C., Carron C., Previdoli S., Barofio C. 2006. Sauge officinale: effets de la fréquence des récoltes, de la hauteur et de la dernière coupe avant l'hiver sur la productivité et la qualité. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 38: 315-320.
- Carrubba A., Torre R., Piccaglia R., Marotti R. 2002. Characterization of an Italian biotype of clary sage (*Salvia sclarea* L.) grown in a semi arid Mediterranean environment. *Flavour Fragrance J.* 17: 191-194.
- Carron C., Previdoli S., Cottagnoud A., Rey C., Carlen C. 2005. Sauge officinale : productivité et qualité de la nouvelle variété Regula. *Rev.Suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 37: 235-239.
- Cermeño P., Belda J., Corell M., Calero I., García M.C. 2002. Adaptación de dos especies autóctonas de Andalucía Occidental del genero *Calendula* a distintas condiciones de cultivo. *I Jornadas Ibéricas de Plantas Ornamentales*, pp. 75-80.
- Cermeño P., Corell M., Garcia M.C., Olave G., Guzman M., Sanchez A. 2006. Effect of temperature, light and GA<sub>3</sub> on application of germination *Salvia lavandulifolia* Vahl. *4th International and 8th National Symposium on Seed, Transplant and Stand Establishment of Horticultural Crops*, Texas – USA.
- Chandra Babu R., Srinivasan P., Natarajaratnam N., Rangasamy S. 1985. Relationship between leaf photosynthetic rate and yield in blackgram (*Vigna mungo* L. Hepper) genotypes. *Photosynthetica* 19: 159–163.
- Chang X., Alderson P.G., Hollowood T., Hewson L., Wright C.J. 2007a. Flavour and aroma of fresh basil are affected by temperature. *J. Sci. Food. Agric.* 87:1381-1385.
- Chang X. Alderson PG, Wright CJ. 2007b. Solar irradiance levels alters the grown of basil (*Ocimum basilicum* L.) and its content of volatile oil. *Environ. Exp. Bot.* 63: 216-223.
- Chatterjee S.K. 1995. Water stress effect on growth and yield of *Cymbopogon* sp and its alleviation by n-triacontanol. *Acta Hortic.* 390: 19-24.
- Chimonidou Pavlidou D., Morisot A. and Ricci P. 1996. Effect of water stress at different stages of rose development. *Second international symposium on roses*, Antibes, France, pp. 20-24.
- Condon A.G., Richards R. A., Rebetzke G. J., Farquhar G.D. 2004. Breeding for high water-use efficiency. *J. Exp. Bot.* 55: 2447–2460.
- Consejo Federal de Inversiones Argentino. 2003. [www.cfired.org.ar](http://www.cfired.org.ar)
- Consejería de Agricultura y Pesca. 1999. *Anuario de estadísticas Agrarias y pesqueras de Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.

- Consejería de Agricultura y Pesca. 2004. *Anuario de estadísticas Agrarias y pesqueras de Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.
- Consejería de Agricultura y Pesca. 2005. *Anuario de estadísticas Agrarias y pesqueras de Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.
- Cornish K., Radin J.W., Turcotte E.L., Lu Z., Zeiger E. 1991. Enhanced photosynthesis and stomatal conductance of pima cotton (*Gossypium barbadense* L.) bred for increased yield. *Plant Physiol.* 97: 484-489.
- Cristobal R., Fanlo M., Melero R. 2004. El cultivo de plantas aromáticas y medicinales en Cataluña, una alternativa de futuro. *Rural Forest*, 2. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.
- Crosbie, T.M., Pearce R.B. 1982. Effects of recurrent phenotypic selection for high and low photosynthesis on agronomic traits in two maize populations. *Crop Sci.* 22:809–813.
- Dudai N., Lewinsohn E., Larkov O., Katzir I., Ravid U., Chaimovitch D., Saadi D., Putievsky E. 1999. Dynamics of yield components and essential oil production in a commercial hybrid sage (*Salvia officinalis* x *Salvia fruticosa* cv. Newe Ya'ar No. 4). *J. Agric. Food Chem.* 47: 4341-4345.
- Ehleringer J. and Forseth I.N. 1989. Diurnal leaf movements and productivity in canopies. En: *Plant canopies: their growth, form and function*. (G. Russell, B. Marshall, P.G. Jarvis, eds.) pp. 129-142. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ehleringer J., Mooney H., Gulmon S.L., Rundel P.W. 1981. Paralele evolution of leaf pubescence in *Encelia* in coastal deserts of north and south america. *Oecologia* 49:38-41.
- Elmore C.D. 1980. The paradox of no correlation between leaf photosynthetic rates and crop yields. En: *Predicting Photosynthesis for Ecosystem Models*, vol. 2 (J.D. Hesketh, J.W. Jones, eds.) pp. 155-167. CRC Press Inc., Boca Ratón, Florida, USA.
- Eurostat. 2009. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/agriculture/data/database>.
- Evans L.T. 1975. The physiological basis of crop yield. En: *Crop Physiology* (Evans, L.T., ed.). Cambridge University Press, United Kingdom.
- Fatima S., Farooqi A.H.A., Ansari A.H., Sharma S. 1999. Effect of water stress on growth and essential oil metabolism in *Cymbopogon martinii* (Palmarosa) cultivars. *J. Essent. Oil Res.* 11: 491-496.
- Fatima S., Farooqi A.H.A., Sharma S. 2000. Effect of drought stress and plant density oil metabolism in citronella java (*Cymbopogon winterianus*) cultivars. *J. Medic. Arom. Plant Sci.* 22: 536 567.
- Farooqi A.H.A., Ansari S.R., Kumar R., Sharma S., Fatima S. 1998. Response of different genotypes of Citronella Java (*Cymbopogon winterianus* Jowitt) to water stress. *Plant Physiol. Biochem. New Delhi* 25:172-175.

- Fernández Pola J. 2001. *Cultivo de plantas medicinales, aromáticas y condimentarias*. Edic. Omega S.A. Barcelona.
- Ferrández T., Rubio S., Torrecillas A., Alarcón J.J., Sánchez Blanco M.J. 2003. Crecimiento, floración y relaciones hídricas de plantas de romero bajo distintas condiciones de riego. *I Jornadas Ibéricas de Plantas Ornamentales*, Sevilla. 51-60.
- Ferreira E., Selles G., Peralta J., Burgos L., Valenzuela J. 2001. Effect of water stress applied at different development periods on Cabernet Sauvignon grapevine on production and wine quality. *III Encuentro de las aguas*, Santiago de Chile.
- Fisher R.A., Turner N.C. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 29: 288-317.
- Font Quer P. 1990. *Plantas medicinales, El Dioscórides renovado*. Ed. Labor, S.A. Barcelona.
- González M. 2003. *Planificación y puesta en riego de una finca de melocotón*. Proyecto fin de carrera. Ingeniería Técnica Agrícola, EUITA Cortijo de Cuarto, Sevilla.
- Hanson A.D., Hitz W.D. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 33: 163-203.
- Hay R.K.M., Walker A.J. 1989. *An introduction to the physiology of crop yield*. Longman Scientific & Technical, United Kingdom.
- Hornok L. 1992. *Cultivation and proceeding of medicinal plants*. Ed. L. Hornok.
- Hufstetler E.V., Boerma H.R., Carter Jr. T.E., Earl H.J. 2007. Genotypic variation for three physiological traits affecting drought tolerance in soybean. *Crop Sci.* 47:25-35.
- Informe de Medio Ambiente en Andalucía. 1996. *Evolución de ecosistemas y estrés hídrico de la vegetación*. Junta de Andalucía.
- ISO3526-1991. Oil of sage (*Salvia lavandulifolia*). International Standard, 1991.
- ISO9909-1997. Oil of Dalmatian sage (*Salvia officinalis* L). International Standard, 1997.
- Johnson H.B. 1975. Plant pubescence: an ecological perspective. *Bot. Rev.* 41: 233-258.
- Johnson B.L., Henderson T.L. 2002. Water use patterns of grain amaranth in the Northern Great Plains. *Agron. J.* 94: 1437-1443.
- Jordán M., Martínez R., Cases M., Sotomayor J. 2003. Watering level effect on *Thymus hyemalis* Lange essential oil yield and composition. *J. Agric. Food Chem.* 51: 5420-5427.
- Jordán M.J., Martínez C., Moñino M.I., Lax V., Quilez M., Sotomayor J.A. 2007. Chemical Characterization of *Salvia lavandulifolia* subsp. *vellerea* in the southeaster Spain. *International Medicinal and Aromatic Plants Conference*, Antalya – Turkey.

- Lambers H. 1987. Does variation in photosynthetic rate explain variation in growth rate and yield? *Neth. J. Agric. Sci.* 35: 505-519.
- Lansac A.R., Zaballos J.P., Martin A. 1994. Seasonal water potential changes and proline accumulation in mediterranean shrubland species. *Vegetatio* 113: 141-154.
- Lauriano J.A., Ramalho J.C., Lidon F.C., Matos M.C. (2004) Peanut photosynthesis under drought and re-watering. *Photosynthetica* 42: 37-41.
- Lawlor D.W., Cornic G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ.* 25: 275-294.
- Letchamo W., Gosselin A. 1995. Effects of HPS supplemental lighting and soil water levels on growth, essential oil content and composition of two thyme (*Thymus vulgaris* L.) clonal selections. *Can. J. Plant Sci.* 75: 231-238.
- Letchamo W., Xu H.L., Gosselin A. 1995. Photosynthetic potential of *Thymus vulgaris* selections under two light regimes and three soil water levels. *Scientia Hort.* 62:89-101.
- Lichtenthaler H.K., 1996. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *J. Plant Physiol.* 148: 4-14.
- Little T.M., Jackson Hills F. 1987. *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura*. Editorial Trillas, pp. 113-122.
- Lu Y.R., Foo L.Y. 2001. Antioxidant activities of polyphenols from sage (*Salvia officinalis*). *Food Chem.* 75: 197-202.
- Ludlow M.M., Muchow R.C. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.* 43: 107-153.
- M.A.P.A. 2008. Anuario de estadística agroalimentaria 2007. Ed. Ministerio de medio ambiente medio rural y marino. Madrid.
- Marcos Sanz M.E., Garcia Vallejo M.C., Muñoz Lopez-Bustamante F. 1986. Aceites esenciales de *Salvia lavandulifolia* Vahl. Memoria de las Jornadas nacionales de Plantas medicinales, aromáticas y condimentaría Vol II. Junta de Castilla y León.
- Marcos Sanz M.E., Garcia Vallejo M.C., Muñoz Lopez-Bustamante F., Polo Diez L.M. 1988. Essential oils of *Salvia lavandulaefolia* Vahl. *Dev. Food Sci.* 18 (Flavors Fragrances), 147-160.
- Maric S., Maksimovic M., Milos M. 2006. The impact of the locality altitudes and stages of development on the volatile constituents of *Salvia officinalis* L. from Bosnia and Herzegovina. *J.Essential Oil Res.* 18: 178-180.
- Marty J., Warwick B. 1999. Photosynthetic characteristics of the three asparagus cultivars differing in yield. *Crop Sci.* 39 :1070-1077.

- Medrano H., Escalona J.M., Bota J., Gulías J., Flexas J. 2002. Regulation of photosynthesis in C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Ann. Bot.* 89: 895-905.
- Medrano H., Flexas J., Galmés J. 2009. Variability in water use efficiency at the leaf level among Mediterranean plants with different growth forms. *Plant Soil* 317: 17-29.
- Milbau A., Scheerlinck L., Reheul D., De Cauwer B., Nijs I. 2005 Ecophysiological and morphological parameters related to survival in grass species exposed to an extreme climatic event. *Physiologia plantarum*. 124, 12:500-512.
- Mirjalilli M.H., Salehi P., Sonboli A., Vala M.M. 2006. Essential oil variation of *Salvia officinalis* aerial parts during its phenological cycle. *Chem . Nat. Comp.* 42: 19-23.
- Misra A., Srivastava N.K. 2000. Influence of water stress on Japanese mint. *J. Herbs Spices Medic. Plants.* 7: 51-58.
- Miura K., Kikuzaki H., Nakatani N. 2002. Antioxidant activity of chemical components from sage (*Salvia officinalis* L.) and thyme (*Thymus vulgaris* L.) measured by the oil stability index method. *J.Agric. Food Chem.* 50: 1845-1851.
- Mohr H., Schopfer P. 1995. Plant Physiology. Ed. Springer Verlag, Berlin.
- Morales F., Abadia A., Abadia A., Montserrat G., Gil-Pelegrín E. 2002. Trichomes and photosynthetic pigments composition changes: responses of *Quercus Ilex* subsp. *ballota* (Desf) Samp and *Quercus coccifera* L. to Mediterranean stress conditions. *Trees* 16: 504-510.
- Moré E., Colom A. 2002 Distribución comercial de plantas aromáticas y medicinales en Cataluña. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 17: 43-66.
- Morgan J.M. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 35: 299-319.
- Mori B., Serra G., Tognoni F. 1995 Growth response to different water regimes of container grown woody ornamentals, *Agric. Med.* 125: 368-374.
- Mugnai S., Pardossi A., Serra G., Tognoni F. 1995. Leaf water relations and gas exchange in container grown plants of two genotypes of *Nerium oleander* L. as affected by water deficiency. *Adv. Hort. Sci.* 9: 27-32.
- Munné Bosch S., Alegre L. 1999. Role of dew on the recovery of water stressed *Melissa officinalis* L. Plants. *J. Plant Physiol.* 154: 759-766.
- Munné Bosch S., Alegre L. 2000. The Xanthophyll cycle is induced by light irrespective of water status in field-grown lavender (*Lavandula stoechas*) plants. *Physiol. Plant.* 108:147-151.
- Munné Bosch S., Jubany Marí T., Alegre L. 2001. Drought induced senescence in characterized by a loss off antioxidant defences in cloroplasts. *Plant Cell Environ.* 24: 1319-1327.

- Munné Bosch S., Mueller M., Schwarz K., Alegre L. 2001. Diterpenes and antioxidative protection in drought stressed *Salvia officinalis* plants. *J. Plant Physiol.* 158: 1431-1437.
- Muñoz F. 1987. *Plantas Medicinales y Aromáticas* (estudio, cultivo y procesado), Ed. MundiPrensa, Madrid.
- Muthuchelian K. 1992. Biomass productivity relative to net photosynthetic rate, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase activity, soluble protein and nitrogen content in ten tree species. *Photosynthetica* 26:333--339.
- Nowak J.S. 2002. Effect of different soil water potential on leaf transpiration and on stomatal conductance in poinsettia. *Acta Agrobot.* 56: 27-36.
- ONIPPAM 2006. *Les herbes de Provence*. Fichas técnicas Office national interprofessionnel des plantes à parfum, aromatiques et médicinales.
- Pagés J.M. 2000. *Las Plantas en Xerojardinería: Avances en xerojardinería*, (Ediciones de Horticultura S.A.) Consejería de Agricultura y Pesca. 83-87.
- Palevitch D. 1987. Recent advances in the cultivation of medicinal plants. *Acta Hort.* 208: 29-35.
- Parra R.A., Rodríguez J.L., González A.G. 1999. Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico. *Terra*, 17:2.
- Pérez Galindo P. 2005. *Salvia lavandulifolia Vahl. ssp. Oxydon: Evaluación de su aceite esencial e incidencia en el medio ambiente según intensidad de recolección*, Universidad de Granada. Tesis doctoral.
- Peroy M.C. 2003. *El cluster del sector de les plantes aromàtiques i medicinals a Espanya*. Proyecto final de carrera. Técnica Superior d'Enginyeria Agraria. Universitat de Lleida.
- Perry N.B., Anderson R.E., Brennan N.J., Douglas M.H. Heaney A.J., McGimpsey J.A., Smallfield B.M. 1999. Essential oils from Dalmatian sage (*Salvia officinalis* L.): Variations among individuals, plant parts, seasons, and sites. *J. Agric.Food Chem.* 47: 2048-2054.
- Perry N.B., Baxter A.J., Brennan N.J., van Klink J.W. 1996. Dalmatian sage. Part 1. Differing oil yields and compositions from flowering and non flowering accessions *Flavour Fragrances J.* 11: 231-238.
- Perry N., Houghtton P., Jenner P., Keith A., Perry E. 2002. *Salvia lavandulifolia* essential oil inhibits cholinesterase in vivo. *Phytomedicine* 9: 48-51.
- Perry N., Houghtton P., Sampson J., Theobald E., Hart S., Lis-Balchin M., Hoult R., Evans P., Jenner P., Milligan S., Perry E. 2001. *In vitro* activity of *S. lavandulifolia* (Spanish sage) relevant to treatment of Alzheimer's disease. *J. Pharm. Pharmacol.* 53: 1347-1356.

- Pettigrew W.T. 2004. Physiological consequences of moisture deficit stress in cotton. *Crop Sci.* 44:1265–1272.
- Pettigrew W, Meredith JW. 1994. Leaf gas exchange parameters vary among cotton genotypes. *Crop Science* 34: 700–705.
- Prevete K.J., Fernandez R.T., Miller W.B. 2000. Drought response of three ornamental herbaceous perennials. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 125: 310-317.
- Putievsky E., Ravid U., Sanderovich D., 1992. Morphological observations and essential oils of sage (*Salvia officinalis* L.) under cultivation. *J. Essential Oil Res.* 4: 291-293.
- Raal A., Orav A., Arak E. 2007. Composition of the essential oil of *Salvia officinalis* L. from varios European countries. *Natural products research* 21, 5: 406-411.
- Reglamento (CEE) N° 2092/91 del Consejo de 24 de junio de 1991 sobre la producción ecológica y su indicación en los productos agrarios y alimenticios (DO L 198 de 22.7.1991).
- Rosúa J.L., Blanca G. 1986. Revisión del género *Salvia* L. (*Lamiaceae*) en el Mediterráneo Occidental: la sección *Salvia*. *Acta Bot. Malacitana* 11: 227-272.
- Royo A., Gil J., Pardos J.A. 2001. Effect of water stress conditioning on morfology, physiology and field performance of *Pinus halepensis* Mill. seedlings. *New Forest.* 21: 127-140.
- Salisbury F., Ross C. 1991. *Plant Physiology*, Four edition. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.
- Savelev S., Okello E., Perry E. 2004. Butyl- and avetyl-cholinesterase inhibitory activities in essential oils of salvia species and their constituents. *Phytoth. Res.* 18: 315-324.
- Schulze E.D. 1986. Whole plant responses to drought. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 127-141.
- Sheppard-Hanger S. 1994. *The Aromatherapy Practitioner Reference Manual*. A Complete Reference Book of Over 350 Aromatic Plant Extracts, Index of Biologically Active Phytochemicals, Clinical Index and Taxonomical Index. Tampa, Florida.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemmingsen E.A., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148: 339-346.
- Singh Sangwan N., Farooqi A.H.A., Sangwan R.S. 1994. Effect of drought stress on growth and essential oil metabolism in lemongrasses. *New Phytol.* 128 : 173-179.
- Santos Gómez P.C., Fernandes Ferreira M. 2001. Organ and season dependent variation in the essential oil composition of *Salvia officinalis* L. cultivated at two different sites. *J. Agric. Food Chem.* 49: 2908-2916.

- Sotomayor J.A., Martínez R.M., García A.J., Jordán M.J. 2004. *Thymus zygis* subsp. *gracilis*: watering level effect on phytomass production and essential oil quality. *J. Agric. Food Chem.* 52: 5418-5424.
- Subrahmanyam D., Subabash N., Haris A. and Sikka A.K. 2006. Influence of water stress on leaf photosynthetic characteristics in wheat cultivars differing in their susceptibility to drought. *Photosynthetica* 44, 1: 125-129.
- Tainter D., Greinis A. 1993. *Especies y aromatizantes alimentarios*, Editorial Acribia, S.A. Zaragoza.
- Taylor H.M., Jordan W.R., Sinclair T.R. 1983. Limitations to efficient water use in crop production. *American Society of Agronomy*, Madison, Wisconsin.
- Tezara W., Driscoll S., Lawlor D.W. 2008. Partitioning of photosynthetic electron flow between CO<sub>2</sub> assimilation and O<sub>2</sub> reduction in sunflower plants under water deficit. *Photosynthetica* 46: 127-134.
- Tisserand R. , Balacs T. 1995. *Essential oil safety: A guide for health professionals*. Edinburgh: Churchill Livingstone.
- Torke B.M. 2000. A revision of *Salvia* sect. *Ekmania* (*Lamiaceae*). *Brittonia* 52: 265-302.
- Turner N.C. 1986. Crop water deficits: A decade of progress. *Adv. Agron.* 39: 1-51.
- Turner N.C. 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *J. Exp. Bot.* 55: 2413–2425.
- Turner N.C., Jones M.M. 1980. Turgor maintenance by osmotic adjustment: A review and evaluation. In: Turner N.C. & P.J. Kramer. eds. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. John Wiley & Sons, New York, USA. pp. 87-103.
- Valdés B., Talavera S., Fernández Galiano E. 1987. *Flora Vascular de Andalucía Occidental*. Ketres Editora S.A. Barcelona.
- Walker G.K. 1986. Transpiration efficiency of field-grown maize. *Field Crops Res.* 14: 29-38.
- Wassner D.F., Ravetta D.A. 2005. Temperature effects on leaf properties, resin content, and composition in *Grindelia chiloensis* (Asteraceae). *Ind. Crops Prod.* 21: 155-163.
- Zawislak G., Dyduch J. 2006. The analysis of the content and chemical composition of essential oil in the leaves of sage (*Salvia officinalis* L.) cv 'Bona' in the second year of cultivation. *J. Essential Oil Res.* 18: 402-404.
- Zavala J., Ravetta D.A. 2002. The effect of solar U-V radiation on biomass partition, growth and resin production on *Grindelia chiloensis*. *Plant Ecol.* 16:185-191.



# ANEXOS





**Anexo I**  
Contenido en Humedad del suelo

---



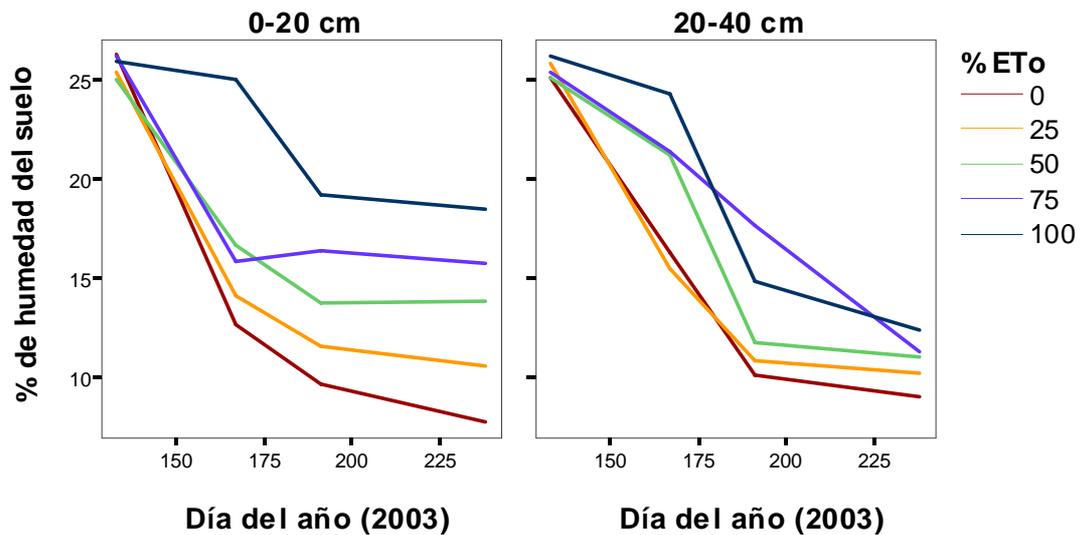


Figura II.1.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 0-20 y 20-40 cm de profundidad a lo largo del verano de 2003.

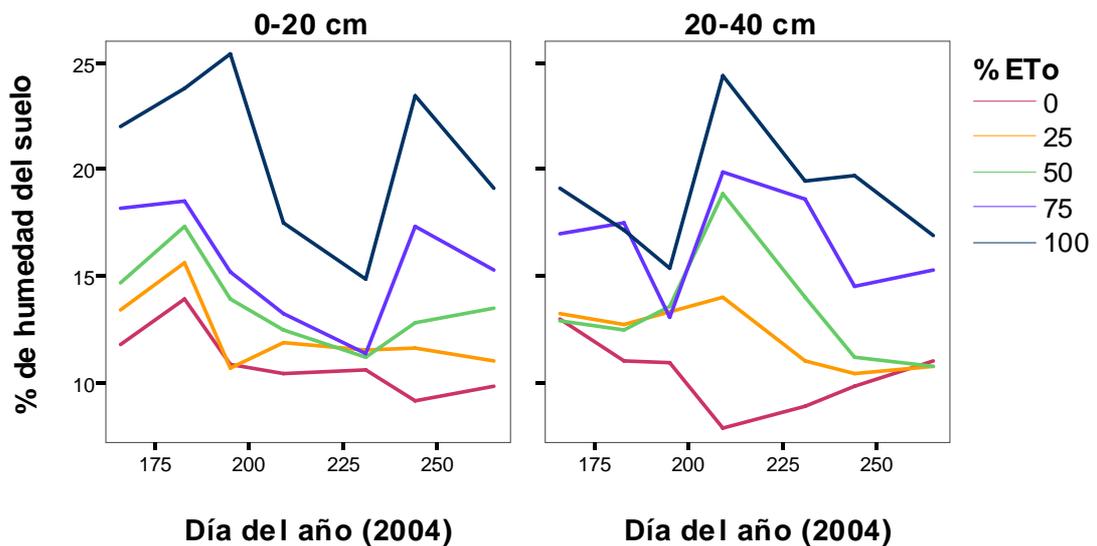


Figura II.2.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 0-20 y 20-40 cm de profundidad a lo largo del verano de 2004.

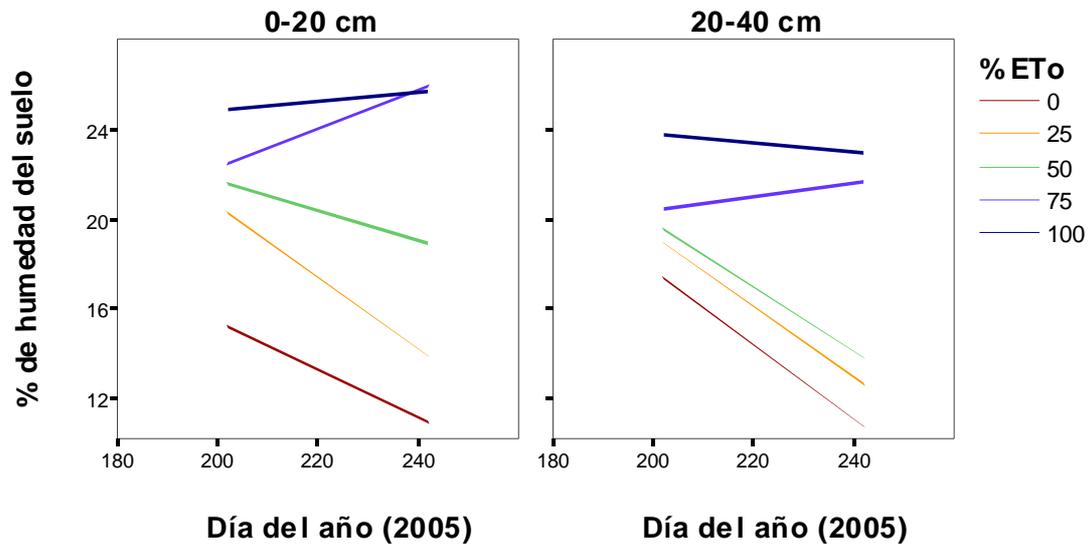


Figura II.3.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 0-20 y 20-40 cm de profundidad a lo largo del verano de 2005.

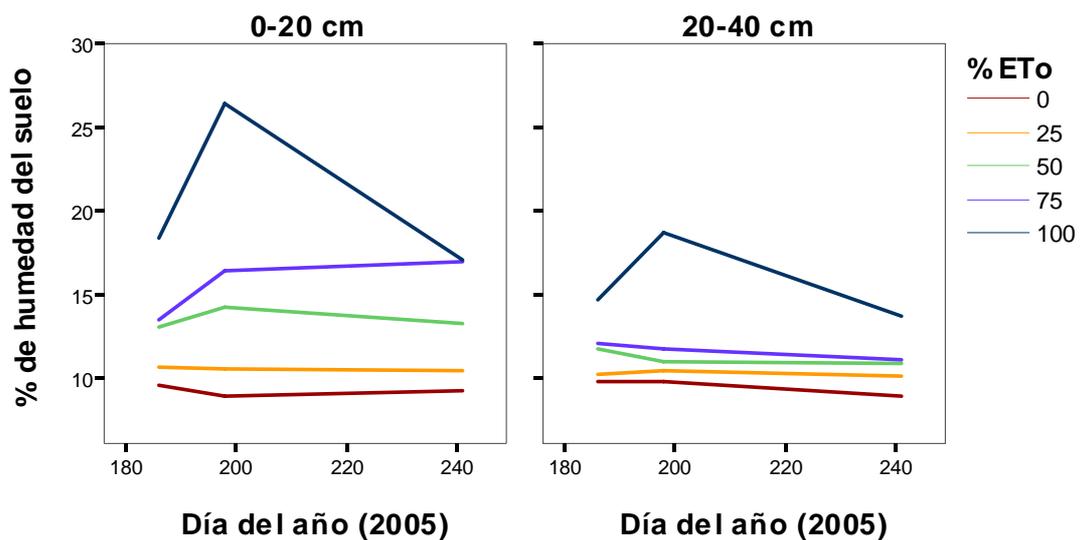


Figura II.4.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 0-20 y 20-40 cm de profundidad a lo largo del verano de 2005.

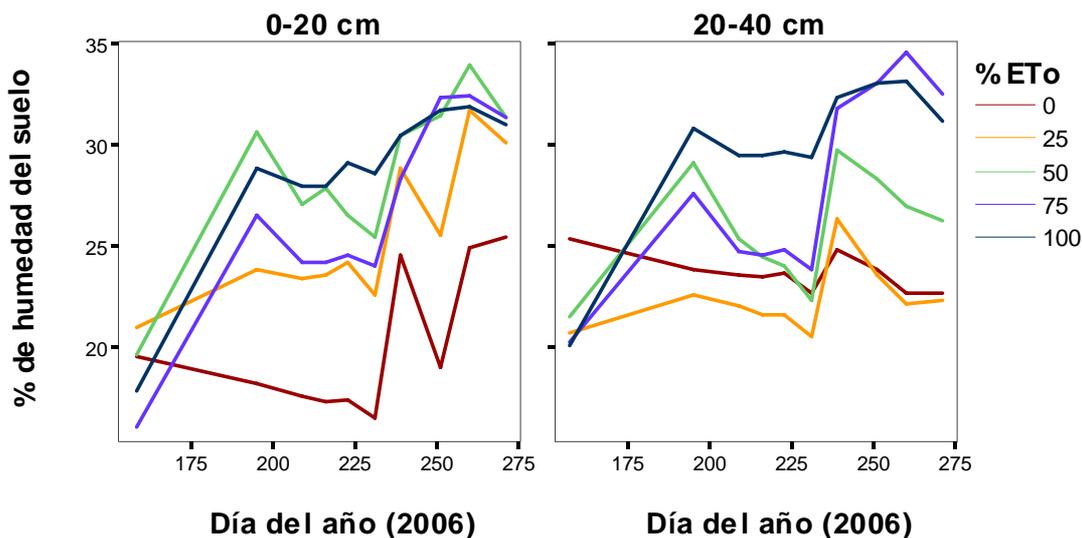


Figura II.5.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 0-20 y 20-40 cm de profundidad a lo largo del verano de 2006.

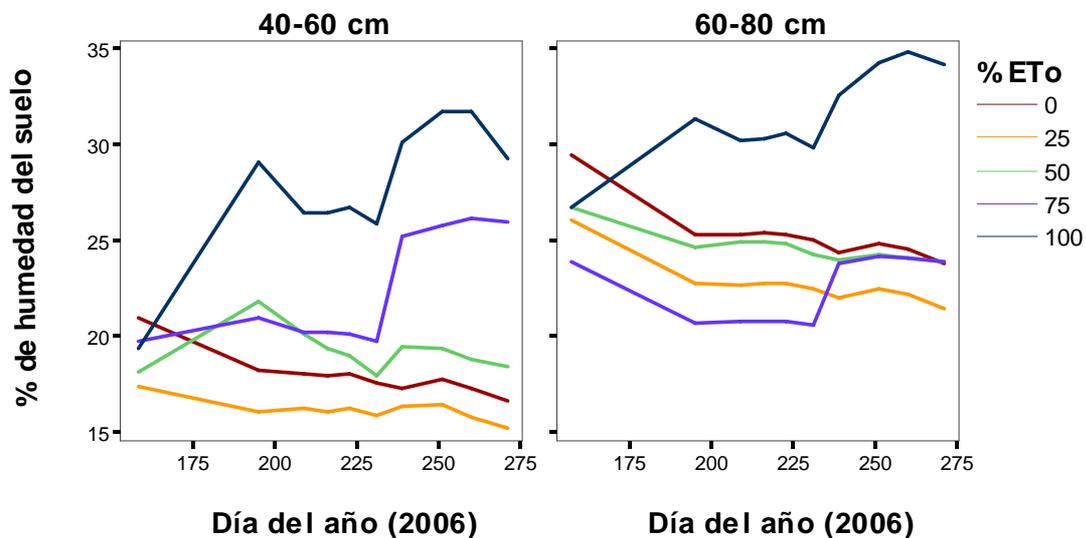


Figura II.6.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 40-60 y 60-80 cm de profundidad a lo largo del verano de 2006.

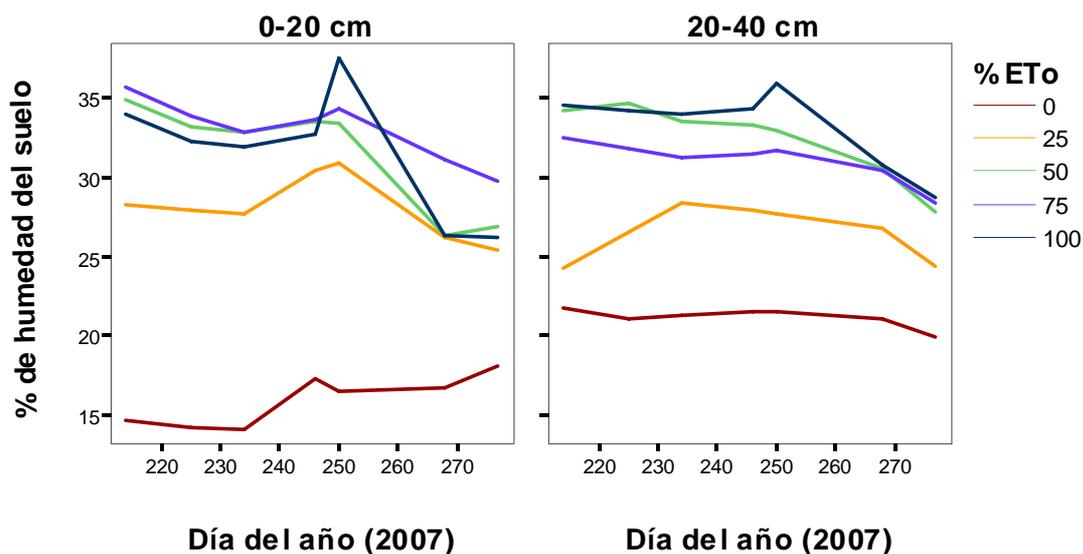


Figura II.7.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 0-20 y 20-40 cm de profundidad a lo largo del verano de 2007.

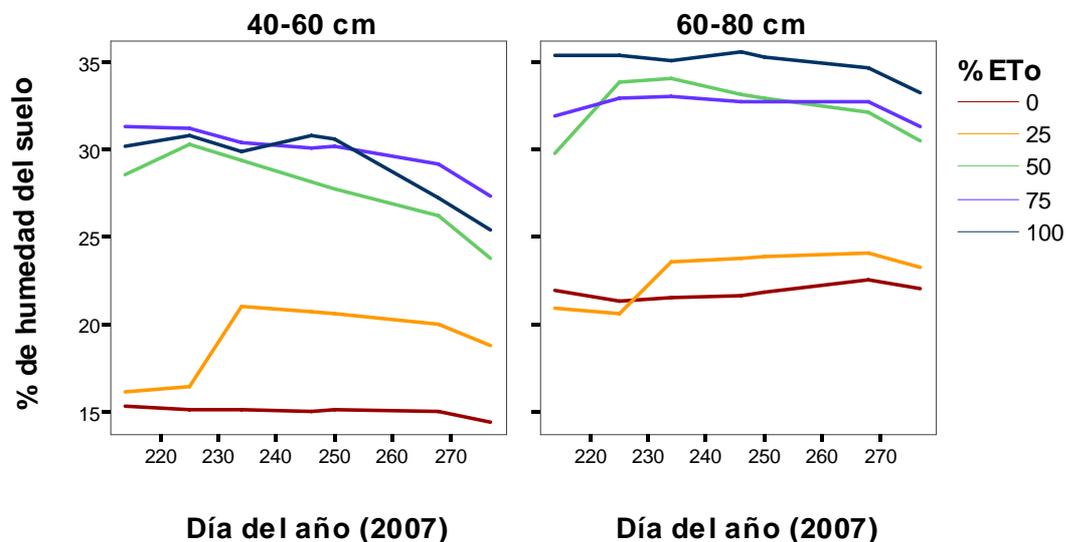


Figura II.8.- Contenido en humedad del suelo en los distintos tratamientos de riego aplicados (%Hd, mm<sup>3</sup>:mm<sup>3</sup>). Entre los 40-60 y 60-80 cm de profundidad a lo largo del verano de 2007.

**Anexo II**  
Condiciones climáticas  
durante el periodo de estudio

---



En las figuras que siguen se muestran algunos datos climáticos del intervalo de tiempo durante el que ha transcurrido el ensayo. Así como los datos de ETo que han servido de referencia para el cálculo de la dosis de riego. Estos datos han sido obtenidos en la estación meteorológica de la Rinconada, dependiente de la Consejería de agricultura y pesca de la Junta de Andalucía. Esta es la estación meteorológica más cercana, situada en La Rinconada (municipio colindante a Alcalá del Río). Se encuentra a 5 km de distancia de nuestra parcela de cultivo, aproximadamente. Por lo que no hemos considerado necesario tener en cuenta datos de otras estaciones.

**Tabla AII.1.- Precipitación mensual (mm).**

	<b>Media<sup>1</sup></b>	<b>Media<sup>2</sup></b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Enero	48,9	83,7	51,8	9,8	0,4	38,0	30,4
Febrero	47,7	72,4	61,6	103,2	19,6	52,8	59,6
Marzo	51,5	54,8	45,6	46,4	19,2	63,6	12,4
Abril	56,0	59,8	109,4	28,2	29,2	35,2	38,0
Mayo	37,1	30,1	11,4	70,4	34,8	21,2	73,2
Junio	2,7	20,1	0,6	0,0	1,0	10,2	4,6
Julio	0,7	2,14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	8,9	6,73	0,0	11,4	0,0	51,2	8,4
Septiembre	39,3	21,1	26,8	0,0	0,0	37,0	42,8
Octubre	105,8	62,1	233,4	100,8	119,2	197,8	22,6
Noviembre	72,8	101,7	90,2	11,0	25,2	120,6	91,4
Diciembre	61,0	92,2	165,2	24,6	29,0	43,4	15,0
<b>TOTAL</b>	<b>532,3</b>	<b>606,9</b>	<b>796,0</b>	<b>405,8</b>	<b>277,6</b>	<b>671,0</b>	<b>398,4</b>

<sup>1</sup> de los últimos 8 años en la Rinconada

<sup>2</sup> de los últimos 30 años.

**Tabla AII.2.- ETo mensual (mm).**

	<b>Media<sup>3</sup></b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Enero	44,0	45,2	40,1	57,5	37,8	44,1
Febrero	59,8	51,5	59,6	62,4	51,3	51,0
Marzo	100,7	106,0	92,6	117,1	88,1	114,8
Abril	133,8	120,0	138,6	270,4	125,3	113,7
Mayo	164,6	178,9	153,1	169,0	176,6	158,4
Junio	188,2	177,4	203,5	171,9	197,1	167,2
Julio	197,6	182,1	205,0	181,4	219,6	205,2
Agosto	170,2	179,5	174,6	172,9	192,1	172,7
Septiembre	134,5	164,9	140,9	155,0	140,9	132,0
Octubre	88,8	77,5	87,5	84,9	90,7	110,1
Noviembre	55,7	47,6	58,3	55,1	48,4	77,8
Diciembre	43,5	38,2	46,9	50,0	41,5	42,4
<b>TOTAL</b>	<b>1381,2</b>	<b>1368,7</b>	<b>1400,7</b>	<b>1547,6</b>	<b>1409,3</b>	<b>1389,4</b>

**Tabla AII.3.- DPV acumulada (KPa).**

	<b>Media<sup>4</sup></b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Enero	44,0	24,0	26,1	37,0	21,6	31,0
Febrero	59,8	25,3	29,6	36,6	24,3	23,6
Marzo	100,7	48,4	42,4	64,0	40,9	54,5
Abril	133,8	47,7	58,4	138,3	56,1	49,1
Mayo	164,6	95,7	66,4	90,9	93,9	76,0
Junio	188,2	103,4	128,2	116,6	105,6	89,1
Julio	197,6	135,0	141,3	126,2	152,5	153,6
Agosto	170,2	158,3	118,0	143,7	128,6	128,8
Septiembre	134,5	112,7	108,8	108,1	109,9	89,3
Octubre	88,8	44,3	68,0	59,3	61,4	71,4
Noviembre	55,7	28,5	39,6	35,4	29,3	26,1
Diciembre	43,5	21,3	28,2	27,5	26,0	28,0
<b>TOTAL</b>	<b>1381,2</b>	<b>844,5</b>	<b>854,7</b>	<b>983,7</b>	<b>850,2</b>	<b>820,5</b>

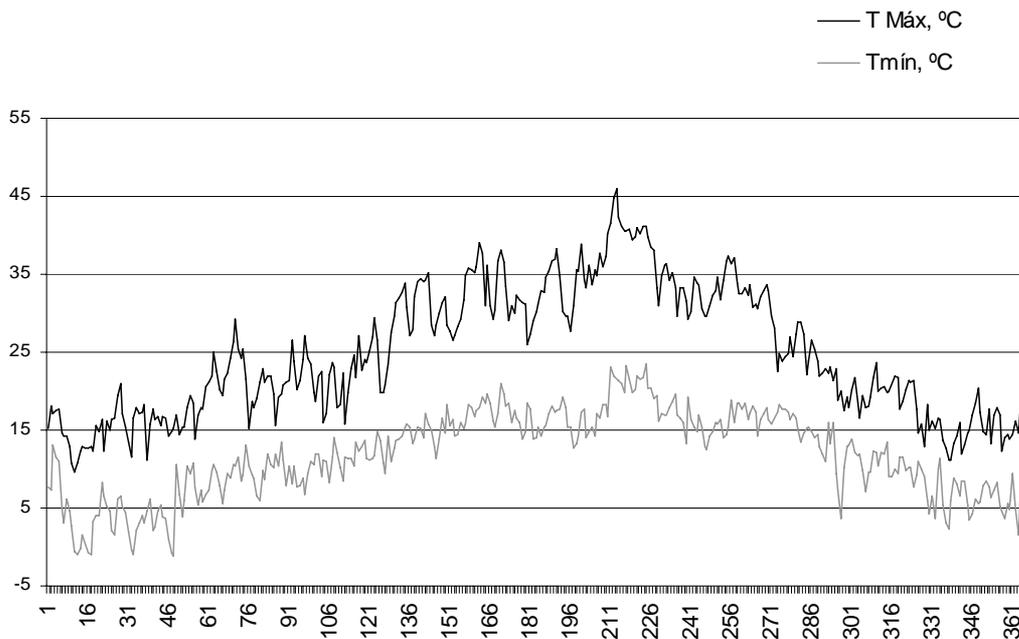
<sup>3</sup> de los últimos 8 años.<sup>4</sup> de los últimos 8 años.

**Tabla AII.4.- Temperatura Media (°C).**

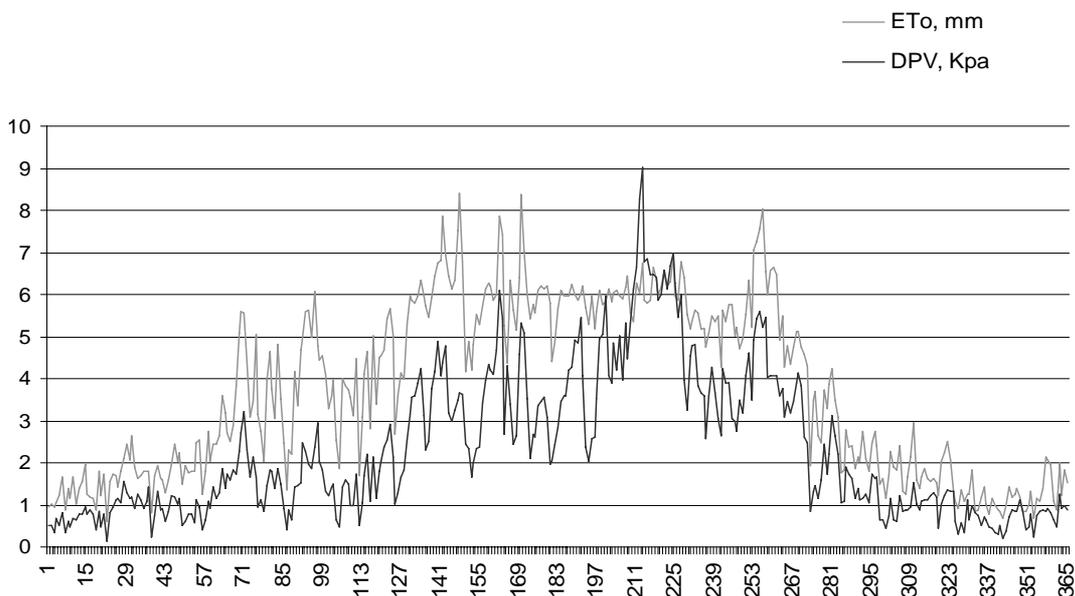
	<b>Media</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Enero	10.6	9,2	10,6	7,6	7,2	8,2
Febrero	12.2	10,2	11,7	8,5	9,1	11,8
Marzo	14.7	15,0	13,2	14,1	13,8	13,4
Abril	16.4	15,9	15,6	17,2	17,0	15,3
Mayo	19.7	21,6	18,2	20,8	22,0	19,0
Junio	23.9	24,6	26,3	24,7	23,9	22,2
Julio	27.4	25,4	26,8	25,3	27,2	26,5
Agosto	27.2	27,5	25,5	25,7	26,0	25,1
Septiembre	24.5	24,0	23,2	22,4	23,7	23,0
Octubre	19.6	17,9	18,2	17,7	19,6	18,8
Noviembre	14.8	13,9	12,1	11,6	14,3	13,1
Diciembre	11.8	10,2	9,3	9,7	8,9	9,5
<b>ANUAL</b>	<b>18,6</b>	<b>17,9</b>	<b>17,6</b>	<b>17,1</b>	<b>17,7</b>	<b>17,1</b>

**Tabla AII.5.- Temperatura Máxima (°C).**

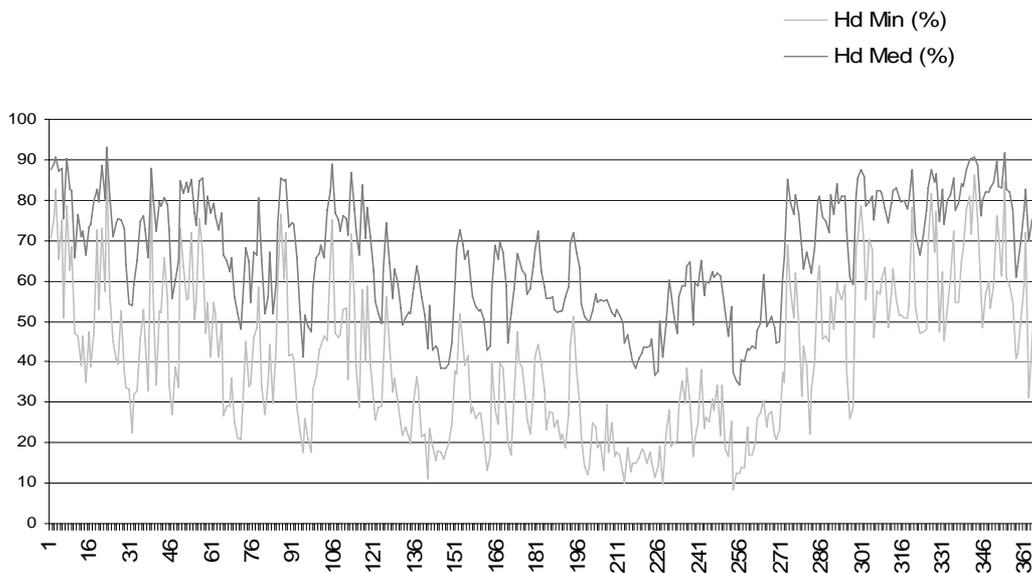
	<b>Media</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Enero	15,9	14,8	16,3	15,9	13,1	16,0
Febrero	17,9	16,2	17,5	16,2	15,3	17,1
Marzo	21,2	21,5	19,6	20,0	19,9	20,5
Abril	22,7	21,9	22,1	24,6	23,8	21,5
Mayo	26,4	29,1	24,6	28,2	29,3	26,3
Junio	31,0	32,3	34,4	33,1	31,7	29,6
Julio	35,3	34,7	35,3	34,2	36,1	36,1
Agosto	35,0	36,8	33,7	35,4	34,3	34,0
Septiembre	31,6	32,4	31,8	31,2	32,0	30,4
Octubre	2,6	22,9	25,3	24,6	25,6	26,1
Noviembre	20,1	18,7	19,3	17,7	19,6	20,4
Diciembre	16,6	15,1	15,6	15,5	15,3	15,9
<b>ANUAL</b>	<b>23,0</b>	<b>24,7</b>	<b>24,6</b>	<b>24,7</b>	<b>24,7</b>	<b>24,5</b>



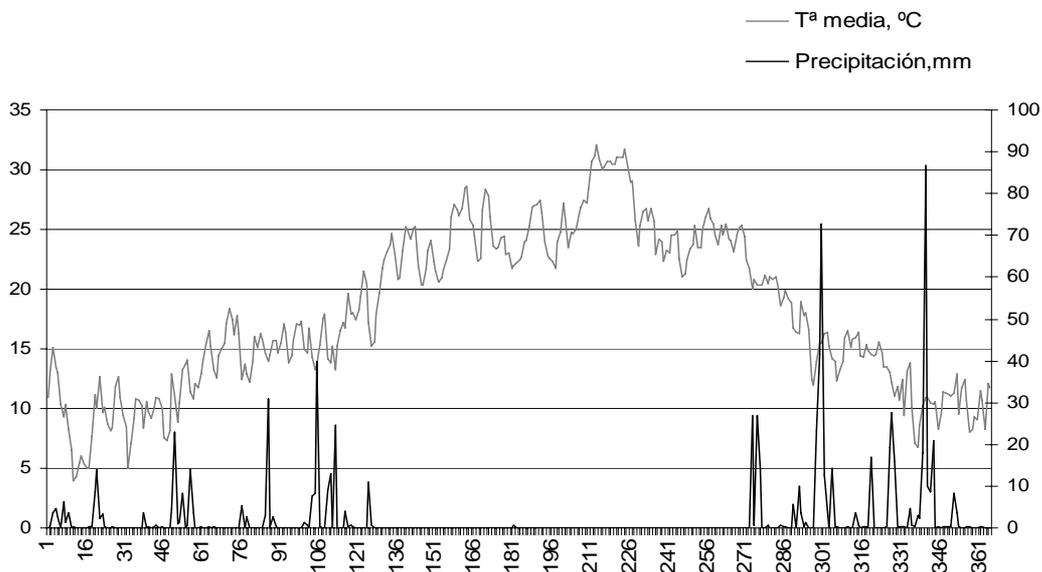
**Figura AI.1.- Temperaturas máximas y mínimas (°C) ocurridas durante el año 2003.**



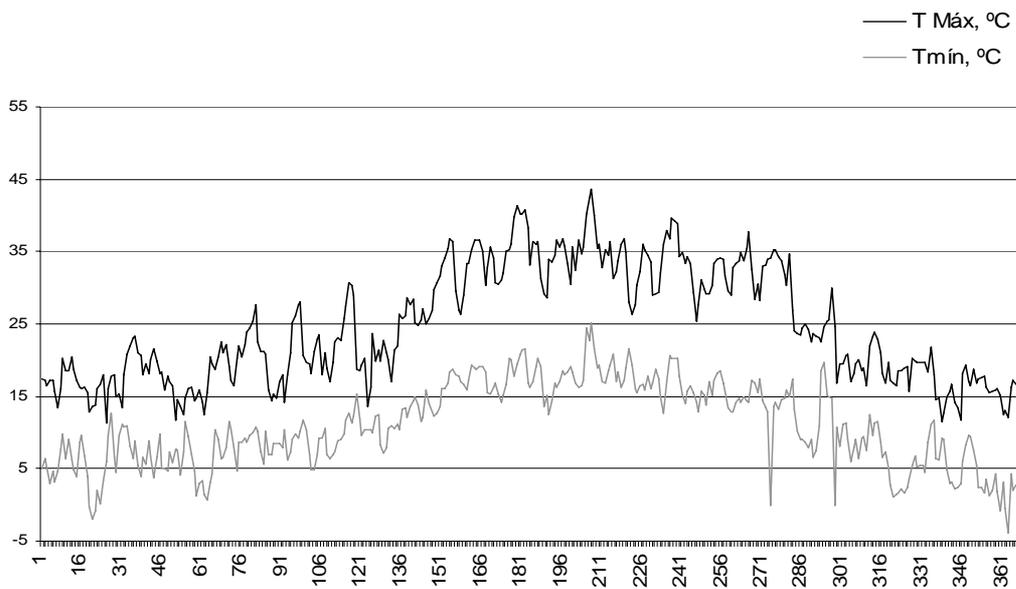
**Figura AII.2.- Evapotranspiración de referencia (ETo, mm) y Déficit de presión de vapor medio diario (DPV, Kpa) durante el año 2003.**



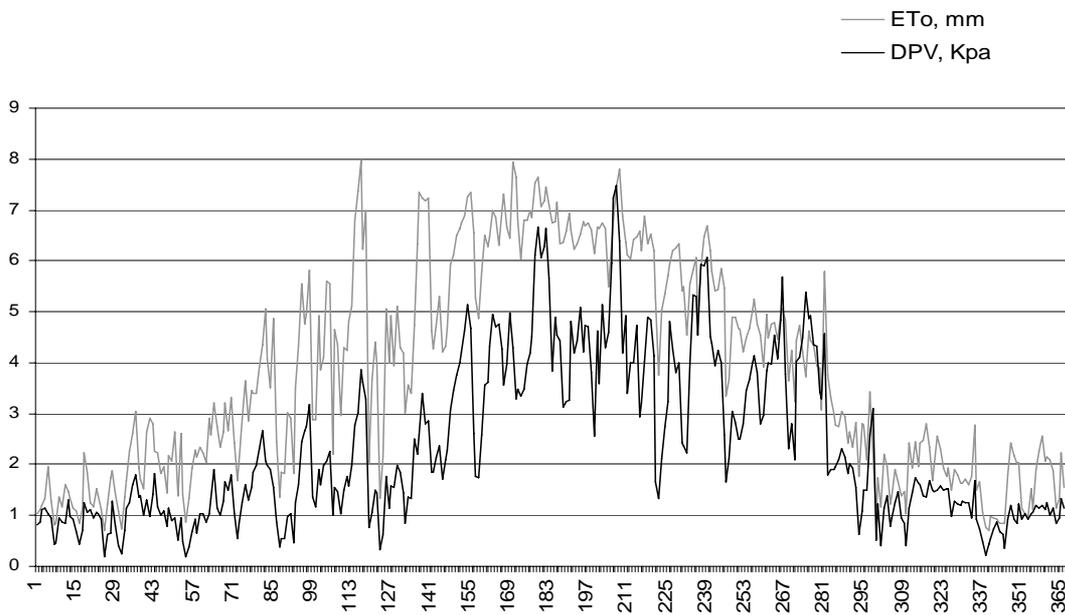
**Figura AII.3.-Humedad relativa del aire media y mínima diaria (% Hd) durante el año 2003.**



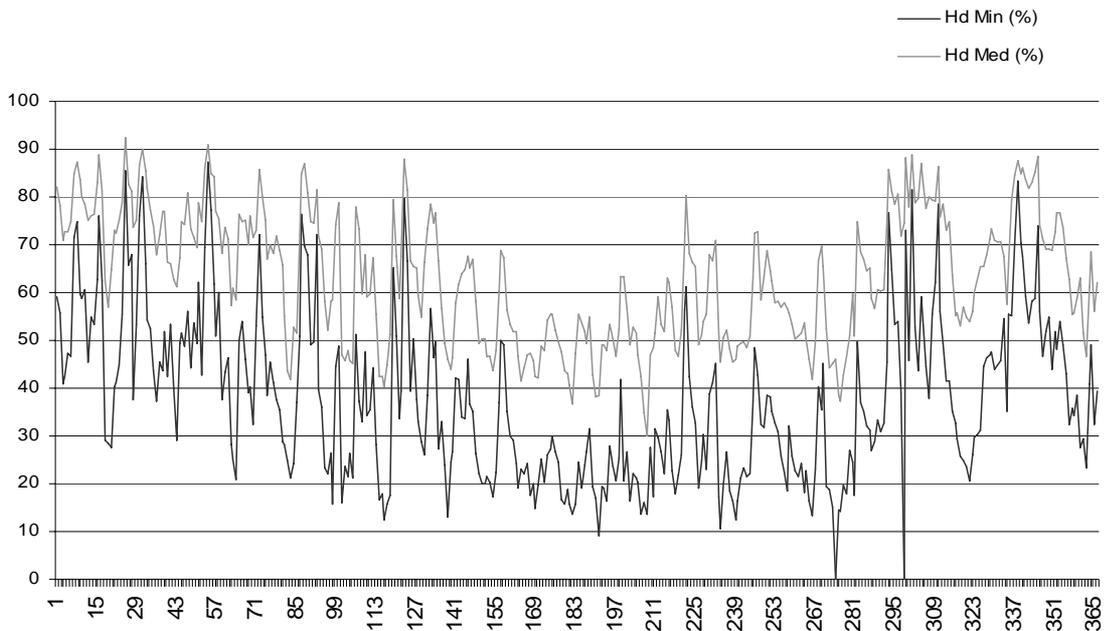
**Figura AII.4.- Precipitación (mm) y Tª media (°C) durante el año 2003.**



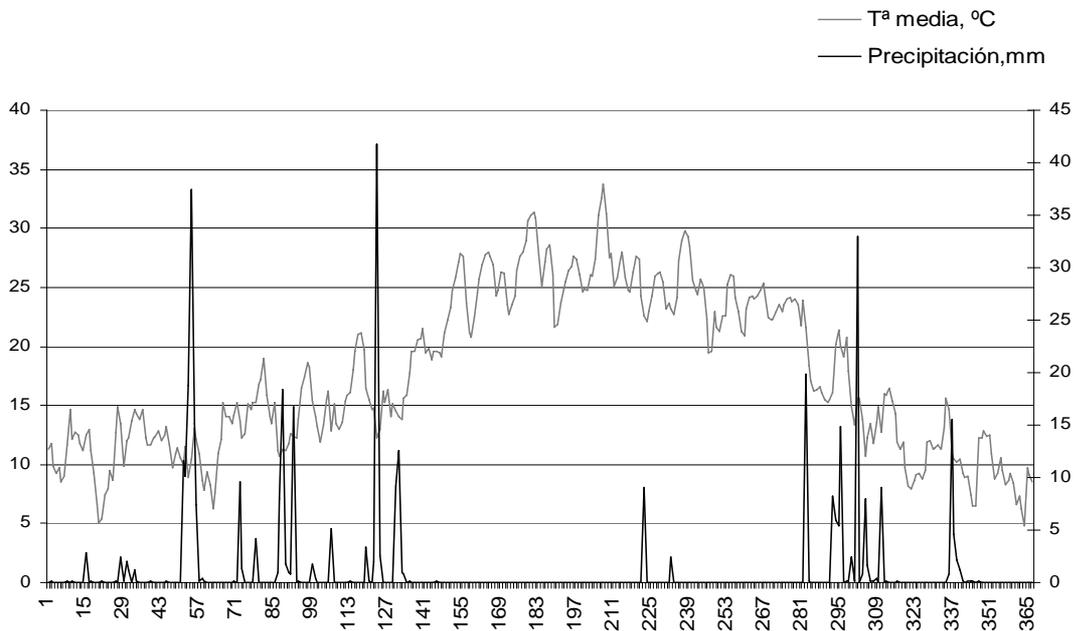
**Figura AII.5.- Temperaturas máximas y mínimas (°C) ocurridas durante el año 2004.**



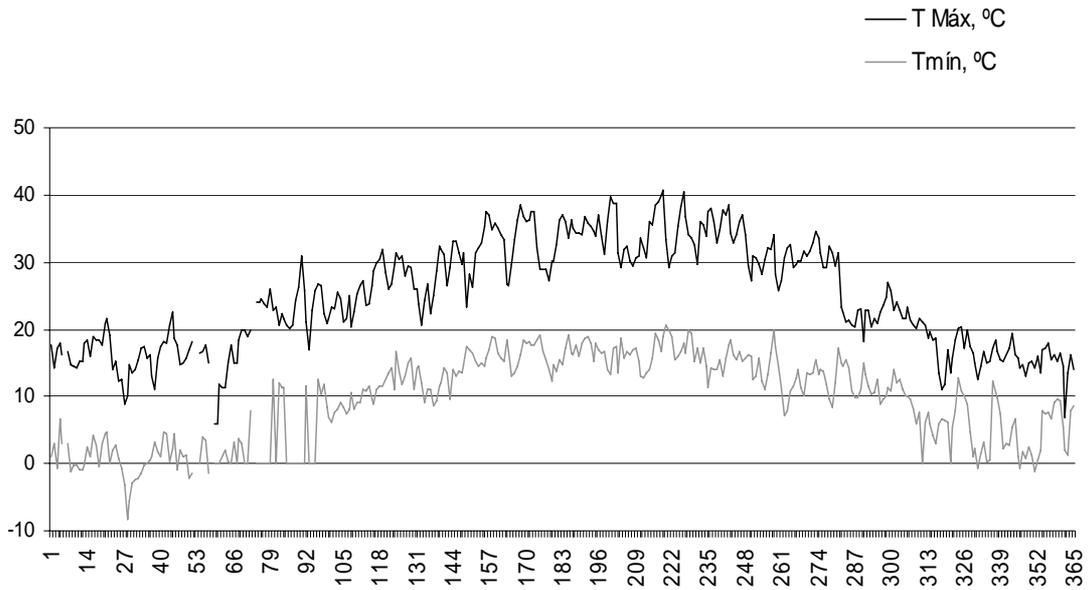
**Figura AII.6.- Evapotranspiración de referencia (ETo, mm) y Déficit de presión de vapor medio diario (DPV, Kpa) durante el año 2004.**



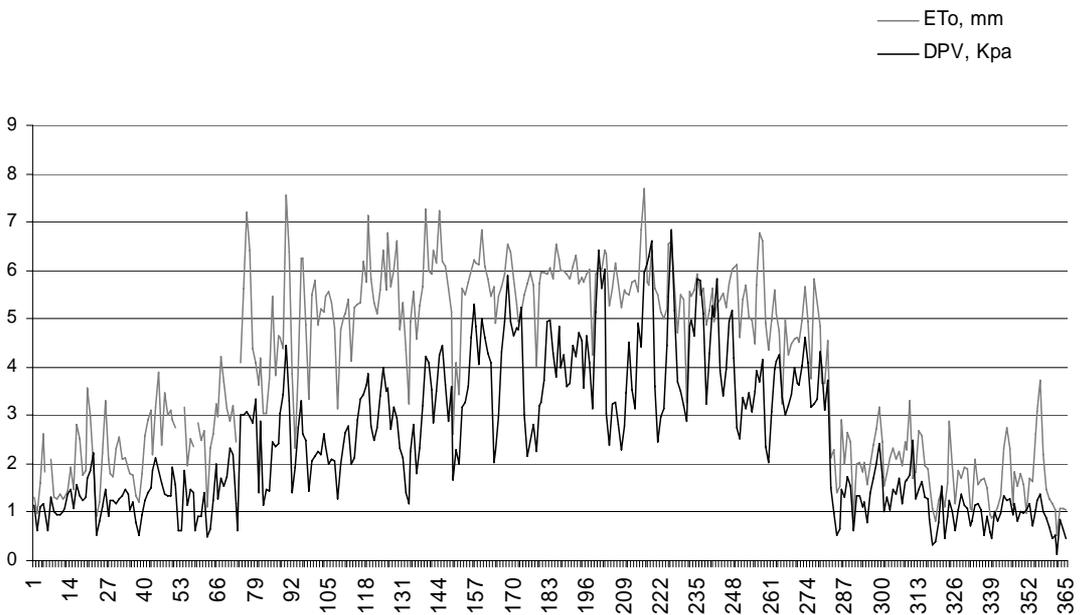
**Figura AII.7.-Humedad relativa del aire media y mínima diaria (% Hd) durante el año 2004.**



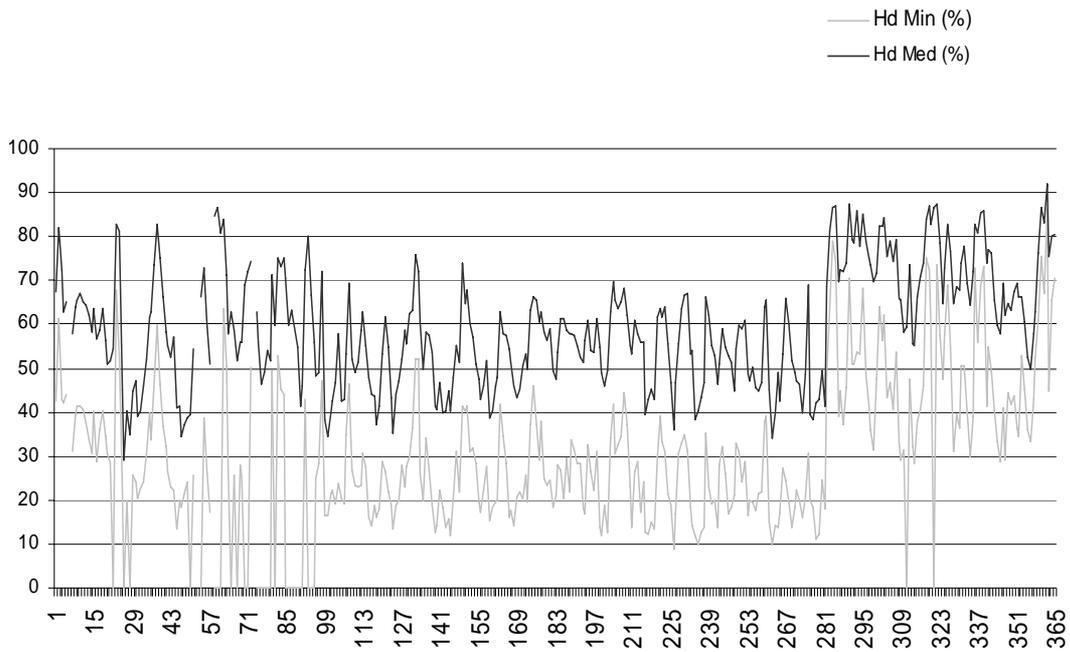
**Figura AII.8.- Precipitación (mm) y Tª media (°C) durante el año 2004.**



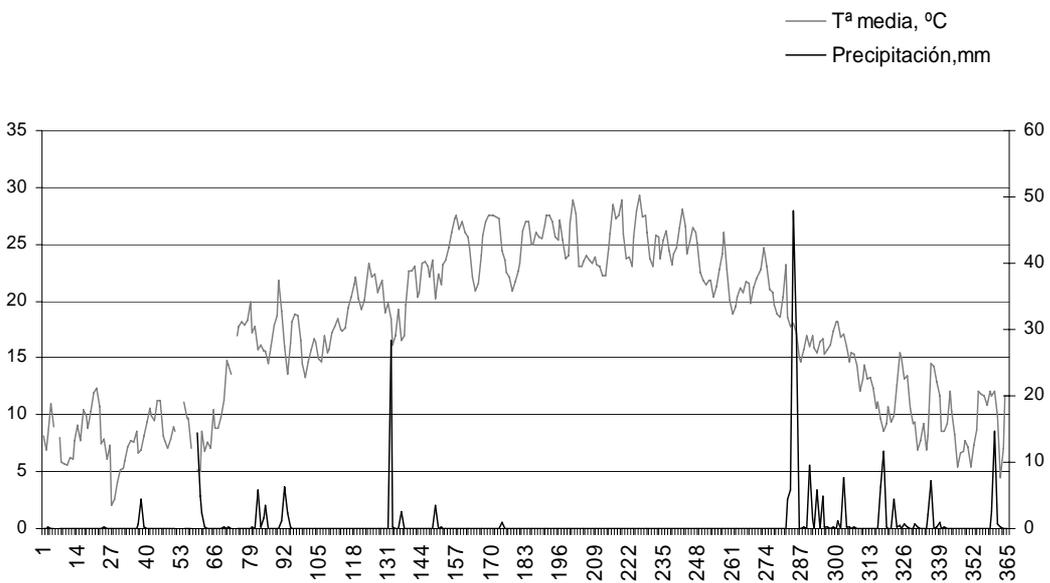
**Figura AII.9.- Temperaturas máximas y mínimas (°C) ocurridas durante el año 2005.**



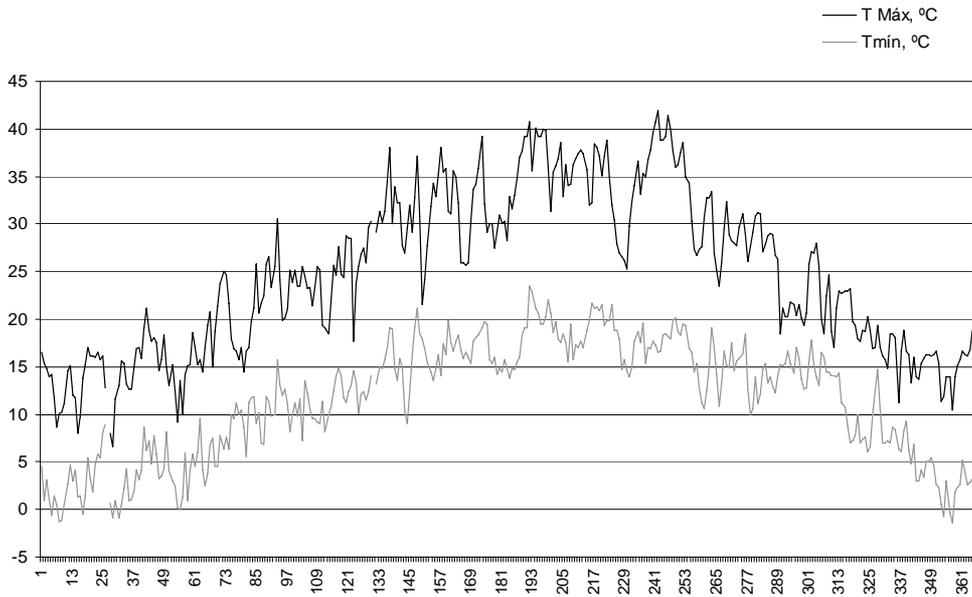
**Figura AII.10.- Evapotranspiración de referencia (ETo, mm) y déficit de presión de vapor medio diario (DPV, Kpa) durante el año 2005.**



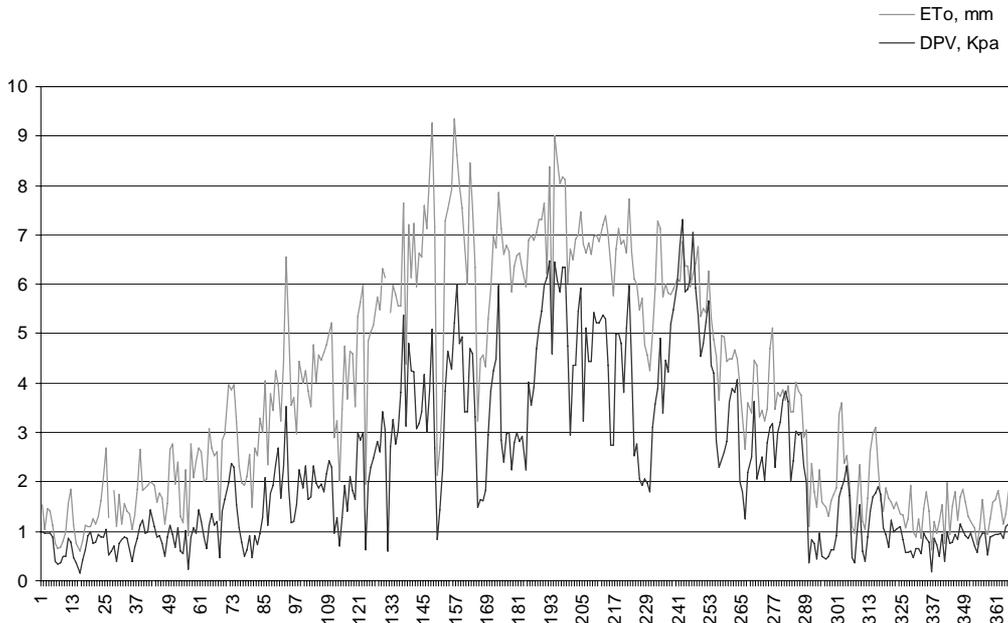
**Figura AII.11.-Humedad relativa del aire media y mínima diaria (% Hd) durante el año 2005.**



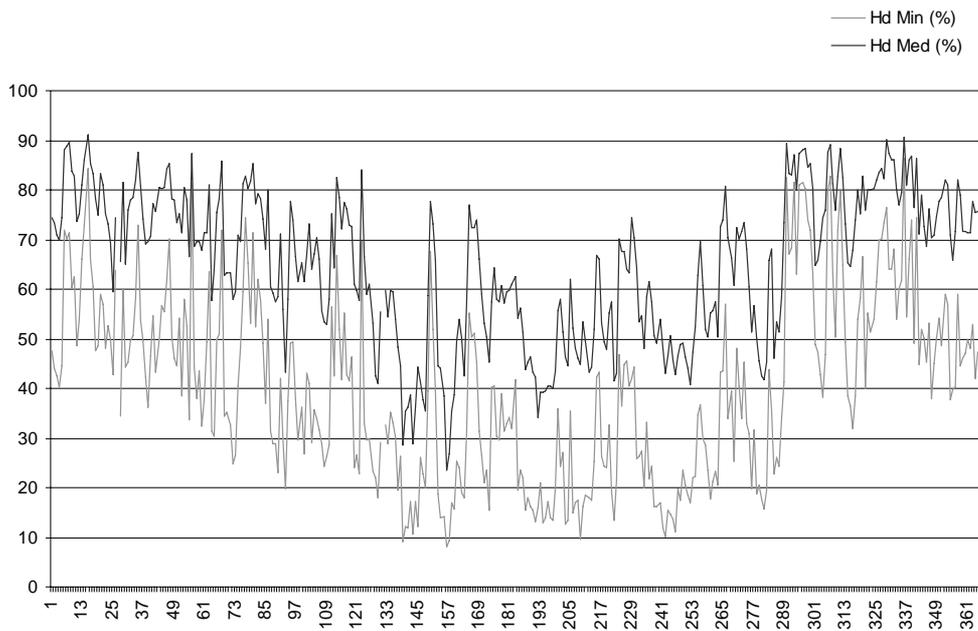
**Figura AII.12.- Precipitación (mm) y Tª media (°C) durante el año 2005.**



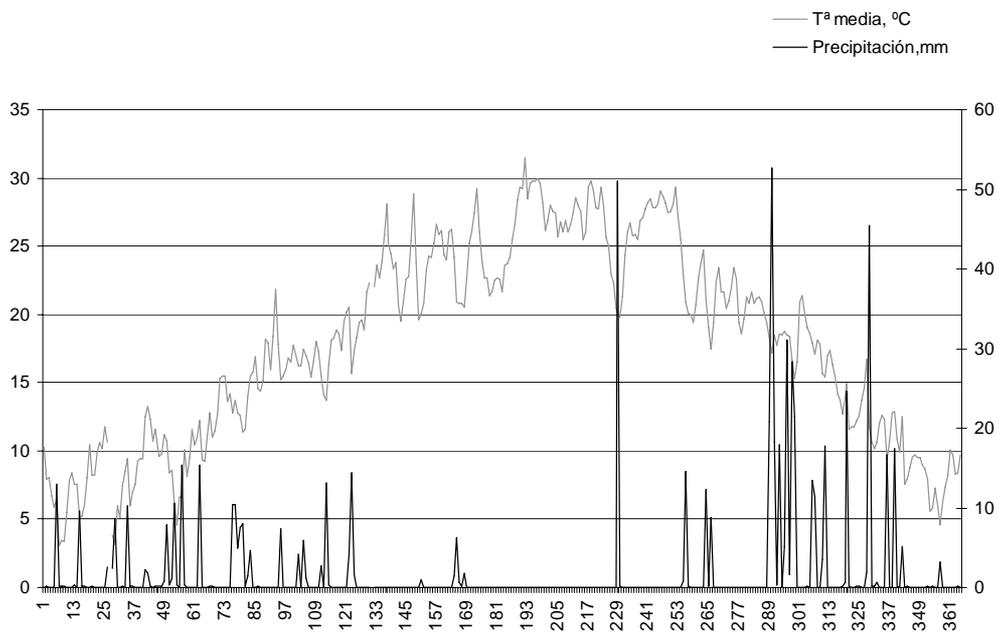
**Figura AI.13.- Temperaturas máximas y mínimas (°C) ocurridas durante el año 2006.**



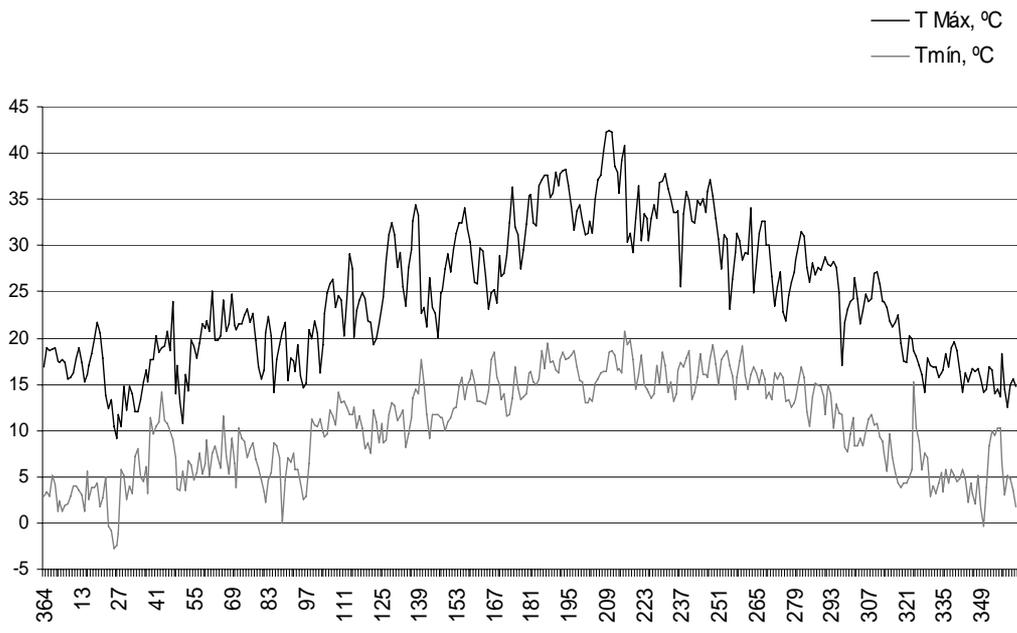
**Figura AI.14.- Evapotranspiración de referencia (ETo, mm) y Déficit de presión de vapor medio diario (DPV, Kpa) durante el año 2006.**



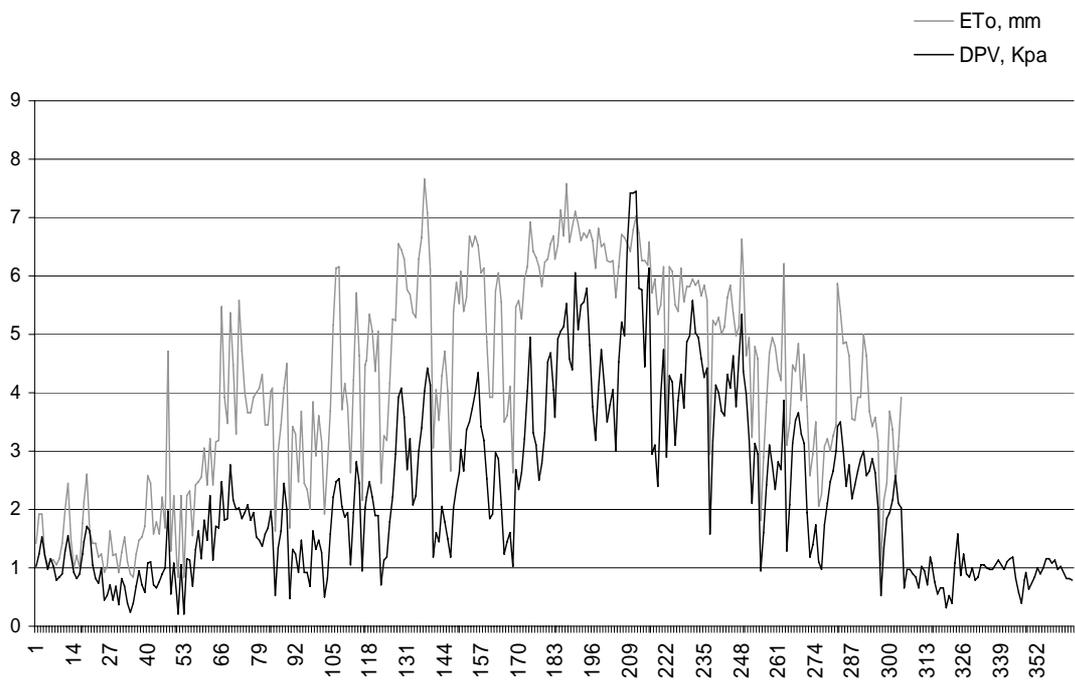
**Figura AI.15.-Humedad relativa del aire media y mínima diaria (% Hd) durante el año 2006.**



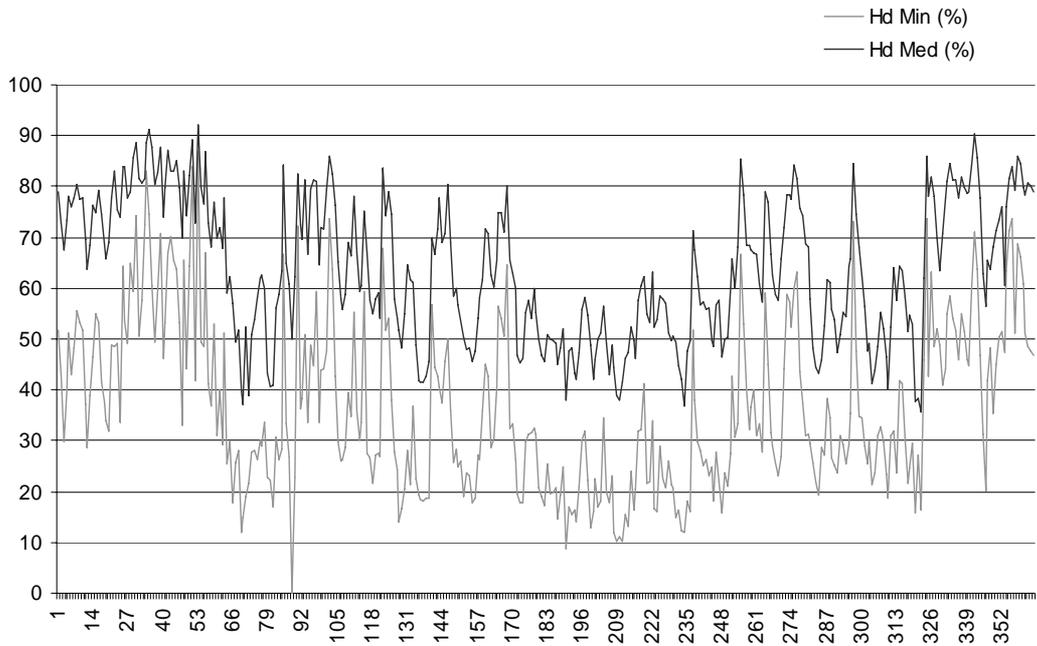
**Figura AII.16.- Precipitación (mm) y Tª media (°C) durante el año 2006.**



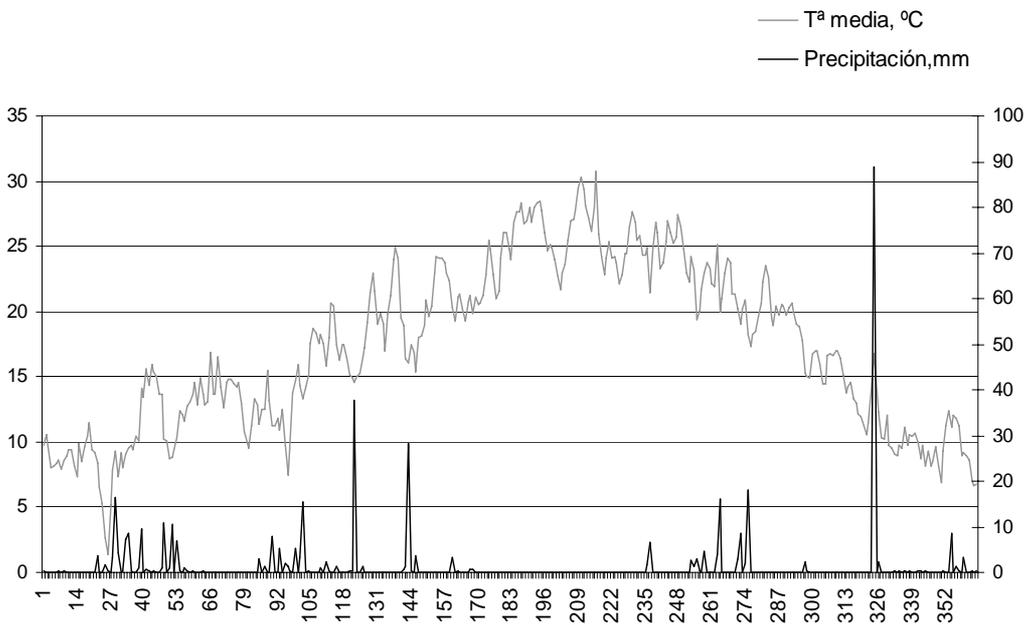
**Figura AII.17.- Temperaturas máximas y mínimas (°C) ocurridas durante la aplicación de los tratamientos de riego deficitario del verano 2007.**



**Figura AII.18.- Evapotranspiración de referencia (ETo, mm) y Déficit de presión de vapor medio diario (DPV, Kpa) durante el verano 2007.**



**Figura AII.19.-Humedad relativa del aire media y mínima diaria (% Hd) durante la aplicación de los tratamientos de riego deficitario del verano 2007.**



**Figura AII.20.- Precipitación (mm) y Tª media (°C) durante el año 2007.**



**Anexo III**  
Asociaciones entre parámetros fisiológicos  
en máximo déficit y la producción del cultivo

---



### III.1.- *Salvia officinalis*.

Se analiza a continuación la correlación lineal entre los parámetros fisiológicos de la medida realizada en agosto y los de producción de otoño, mediante los coeficientes de Pearson.

**Tabla III.1.1.- Coeficiente de correlación lineal en *S. officinalis* con la media de agosto, 2003 y 2004 .**

<b>2003</b>		<b>PF</b>	<b>MS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,793**	0,838**	-0,002	0,782**
	Sig.	0,000	0,000	0,993	0,000
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,842**	0,867**	0,280	0,856**
	Sig.	0,000	0,000	0,231	0,000
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,861**	0,890**	0,133	0,860**
	Sig.	0,000	0,000	0,576	0,000
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	-0,687**	-0,749**	-0,039	-0,697**
	Sig.	0,001	0,000	0,871	0,001
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,859**	0,889**	0,128	0,850**
	Sig.	0,000	0,000	0,590	0,000
	N	20	20	20	20
<b>2004</b>		<b>PF</b>	<b>MS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,720**	0,754**	-0,550*	0,679**
	Sig.	0,000	0,000	0,012	0,001
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,702**	0,744**	-0,505*	0,684**
	Sig.	0,001	0,000	0,023	0,001
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,694**	0,727**	-0,473*	0,671**
	Sig.	0,001	0,000	0,035	0,001
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	-0,570**	-0,605**	0,423	-0,591**
	Sig.	0,009	0,005	0,063	0,006
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,588**	0,626**	-0,645**	0,502*
	Sig.	0,006	0,003	0,002	0,024
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\* : P ≤ 0,01; \* : P ≤ 0,05

**Tabla III.1.3.- Coeficiente de correlación lineal en *S. officinalis* con la media de agosto, 2005 y 2006.**

<b>2005</b>		<b>PF</b>	<b>MS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,755**	0,767**	0,496*	0,728**
	Sig.	0,000	0,000	0,026	0,000
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,636**	0,618**	0,262	0,510*
	Sig.	0,003	0,004	0,264	0,022
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,714**	0,706**	0,253	0,583**
	Sig.	0,000	0,001	0,282	0,007
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	-0,300	-0,294	-0,245	-0,263
	Sig.	0,199	0,209	0,299	0,263
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,496*	0,486*	0,481*	0,464*
	Sig.	0,026	0,030	0,032	0,039
	N	20	20	20	20
<b>2006</b>		<b>PF</b>	<b>MS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,614**	0,583**	-0,032	0,457*
	Sig.	0,004	0,007	0,892	0,043
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,758**	0,762**	0,042	0,614**
	Sig.	0,000	0,000	0,861	0,004
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,547*	0,540*	0,119	0,497*
	Sig.	0,013	0,014	0,617	0,026
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	-0,202	-0,095	0,042	-0,115
	Sig.	0,393	0,690	0,861	0,629
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,678**	0,604**	-0,042	0,467*
	Sig.	0,001	0,005	0,859	0,038
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\* : P ≤ 0,01; \* : P ≤ 0,05

**Tabla III.1.5.- Coeficiente de correlación lineal en *S. officinalis* con la media de agosto, 2007.**

		<b>PF</b>	<b>MS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,485*	0,409	0,413	0,485*
	Sig.	0,030	0,073	0,070	0,030
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	0,567**	0,523*	0,441	0,574**
	Sig.	0,009	0,018	0,051	0,008
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,622**	0,556*	0,590**	0,670**
	Sig.	0,003	0,011	0,006	0,001
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	-0,608**	-0,604**	-0,306	-0,604**
	Sig.	0,004	0,005	0,190	0,005
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,521*	0,467*	0,454*	0,565**
	Sig.	0,018	0,038	0,044	0,009
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\* : P ≤ 0,01; \* : P ≤ 0,05

### III.2.- *Salvia lavandulifolia*

**Tabla III.2.1.- Coeficiente de correlación lineal en *S. lavandulifolia* con la media de agosto, 2006.**

		<b>PF</b>	<b>MS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	0,054	0,075	0,088	0,160
	Sig.	0,821	0,752	0,711	0,501
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	-0,024	-0,062	0,115	0,010
	Sig.	0,920	0,795	0,630	0,965
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	0,041	0,008	0,103	0,108
	Sig.	0,862	0,973	0,666	0,650
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	-0,077	-0,009	0,261	0,246
	Sig.	0,748	0,971	0,265	0,296
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,057	-0,044	0,146	0,068
	Sig.	0,813	0,855	0,540	0,777
	N	20	20	20	20
		<b>PF</b>	<b>MS</b>	<b>RAEp</b>	<b>RAEs</b>
<b>A</b>	r	-0,016	-0,271	-0,118	-0,329
	Sig.	0,945	0,248	0,619	0,156
	N	20	20	20	20
<b>E</b>	r	-0,468*	-0,561**	-0,119	-0,579**
	Sig.	0,038	0,010	0,617	0,007
	N	20	20	20	20
<b>g<sub>s</sub></b>	r	-0,060	-0,283	-0,180	-0,328
	Sig.	0,802	0,226	0,448	0,157
	N	20	20	20	20
<b>Ψ<sub>h</sub></b>	r	0,299	0,194	-0,014	0,162
	Sig.	0,201	0,412	0,954	0,495
	N	20	20	20	20
<b>CHF</b>	r	0,032	-0,105	-0,035	-0,138
	Sig.	0,893	0,661	0,885	0,561
	N	20	20	20	20

A: Fotosíntesis neta, g<sub>s</sub>: Conductancia estomática, E: Transpiración, Ψ<sub>h</sub>: Potencial hídrico foliar, CHF: Contenido hídrico foliar, PF: peso fresco, MS: peso seco, RAEp: aceite esencial por unidad de peso seco y RAEs: rendimiento de aceite esencial por unidad de superficie.

\*\* : P ≤ 0,01; \* : P ≤ 0,05

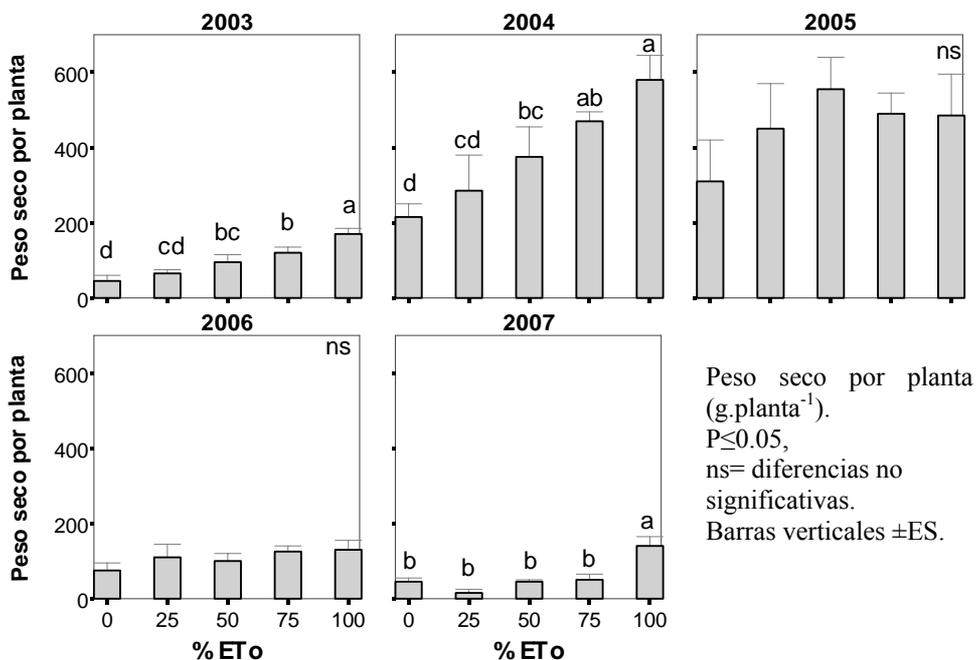
## **Anexo IV**

### **Efecto del déficit hídrico en el crecimiento por planta**

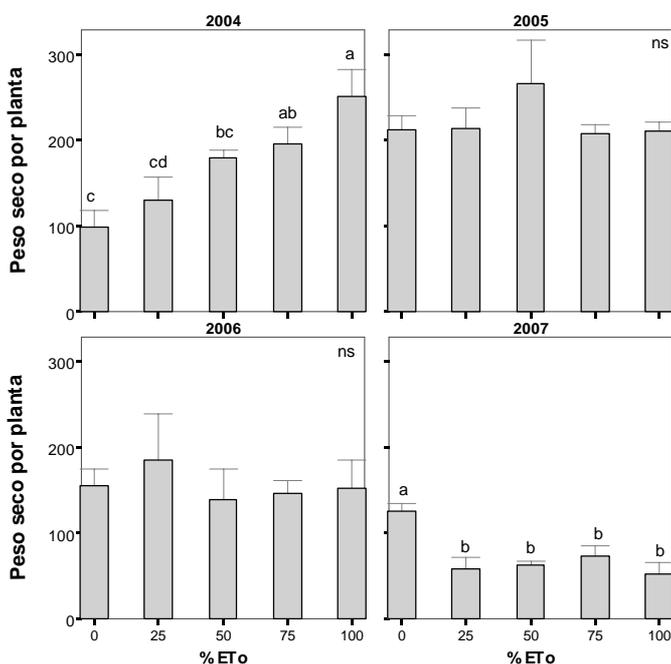
---



**Figura AIV.1.- Efecto del déficit hídrico en la biomasa por planta de *S. officinalis* en otoño.**

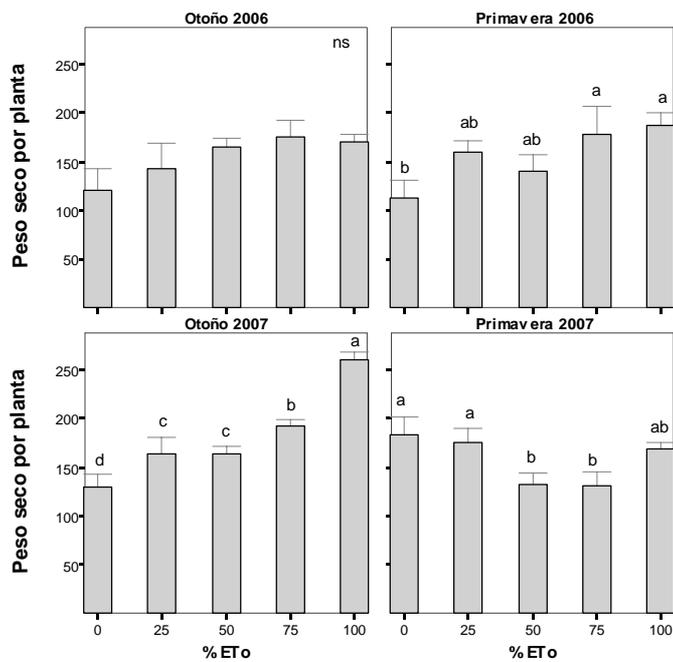


Peso seco por planta (g.planta<sup>-1</sup>).  
 $P \leq 0.05$ ,  
 ns= diferencias no significativas.  
 Barras verticales  $\pm$ ES.



**Figura AIV.2.- Efecto del déficit hídrico en la biomasa por planta de *S. officinalis* en primavera**

Peso seco por planta (g.planta<sup>-1</sup>).  
 $P \leq 0.05$ ,  
 ns= diferencias no significativas.  
 Barras verticales  $\pm$ ES.



**Figura AIV.3.- Efecto del déficit hídrico en la biomasa por planta en *S. lavandulifolia***

Peso seco por planta (g.planta<sup>-1</sup>).  
 $P \leq 0.05$ ,  
 ns= diferencias no significativas.  
 Barras verticales  $\pm$ ES.

**Anexo V**  
Relación lineal entre parámetros fisiológicos  
y de crecimiento en *S. lavandulifolia*

---



**Tabla A.V.1. Coeficiente de correlación lineal entre la biomasa por planta y los parámetros fisiológicos en *S. lavandulifolia*, con la media de tres medidas veraniegas.**

		<i>A</i>	<i>g<sub>s</sub></i>	<i>E</i>	CHF	$\Psi_h$
<b>2006-07</b>	<b>r</b>	0,624**	0,411**	0,194	0,490**	-0,207
	Sig.	0,000	0,008	0,230	0,001	0,199
	N	40	40	40	40	40
<b>2006</b>	<b>r</b>	0,503*	0,568**	0,511*	0,255	-0,065
	Sig.	0,024	0,009	0,021	0,278	0,787
	N	20	20	20	20	20
<b>2007</b>	<b>r</b>	0,720**	0,590**	0,429	0,577**	0,134
	Sig.	0,000	0,006	0,059	0,008	0,572
	N	20	20	20	20	20

*A*: Fotosíntesis neta ( $\mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), *g<sub>s</sub>*: Conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{moles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), *E*: Transpiración ( $\text{mmoles H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $\Psi_h$ : Potencial hídrico foliar (MPa), CHF: Contenido hídrico foliar (%), Biomasa por planta: peso seco ( $\text{g.planta}^{-1}$ ).  
 \*\*= $P \leq 0.01$ , \*= $P \leq 0.05$

