

# Trabajo Fin de Máster

## CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA DE UNA MASA DE PINUS HALEPENSIS POST- INCENDIO: EFECTO DEL TRATAMIENTO SILVÍCOLA.

**Intensificación: ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN  
DE CUENCAS**

**Autor:**

**ADRIÁN PAÚL CEDILLO GALARZA**

**Tutor:**

**DR. ANTONIO DÁMASO DEL CAMPO GARCÍA**

**Cotutor:**

**FEBRERO, 2019**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihmma**



## RESUMEN DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Datos del proyecto
<b>Título del TFM en español:</b> CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA DE UNA MASA DE PINUS HALPENSIS POST-INCENDIO: EFECTO DEL TRATAMIENTO SILVICOLA.
<b>Título del TFM en inglés:</b> ECOHYDROLOGICAL CHARACTERIZATION IN A PINUS HALEPENSIS STAND: EFFECT OF SILVICULTURAL TREATMENT.
<b>Título del TFM en valenciano:</b> CARACTERITZACIÓ ECOHIDROLÓGICA D'UNA MASSA DE PINUS HALEPENSIS POST-INCENDI: EFECTE DEL TRACTAMENT SILVÍCOLA.
<b>Alumno:</b> ADRIÁN PAÚL CEDILLO GALARZA
<b>Tutor:</b> DR. ANTONIO DÁMASO DEL CAMPO GARCÍA
<b>Cotutor/es:</b>
<b>Fecha de Lectura:</b> FEBRERO, 2019

Resumen
<b>En español:</b>
<p>Los recursos hídricos en una escala de cuenca no son solo el resultado de condiciones climáticas y estructuras geomorfológicas, sino que también son el resultado de la evolución y sucesión ecológica, hecho que ha sido descuidado por mucho tiempo en la gestión de recursos hídricos. La falta de gestión forestal en masas de cabecera trae consigo consecuencias negativas como degradación de estructuras biológicas, incremento en el rango de eventos hidrológicos extremos, alteración de la capacidad de almacenamiento de la cuenca, variabilidad de la disponibilidad de agua disponible para los diferentes usos en la cuenca, etc. Por lo que se hace necesario la gestión forestal de base ecohidrológica en donde se sitúe al agua como el centro de planificación y gestión del bosque, siendo esto más importante en ecosistemas semiáridos como es el caso de las cuencas situadas en el Mediterráneo, ya que las mismas son muy sensibles a temporadas secas más largas y menor contenido de humedad de suelo (consecuencia del cambio climático); a causa de esto se ve afectado el objetivo principal de la gestión forestal de base ecohidrológica que es aumento de la precipitación neta.</p> <p>El objetivo del presente trabajo es la descripción cuantitativa de la ecohidrología de una masa forestal de pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i> Mill.) regenerada tras incendio con bajos valores de biomasa. Igualmente, se estudia el cambio observado en las distintas variables ecohidrológicas medidas tras la aplicación de un tratamiento selvícola de reducción de densidad.</p> <p>La metodología que se utilizó en el presente trabajo de final del máster es de base experimental, mediante la medición y seguimiento de variables hidrometeorológicas, ecohidrológicas, ecosistemáticas, vegetación y suelo realizadas en una parcela experimental</p>

ubicada en el parque natural "Sierra Calderona" en las que se encuentra una subparcela de control y una subparcela de tratamiento en donde se ha realizado una gestión forestal.

Los resultados más relevantes del presente estudio son: la precipitación bruta muestra que no hay un periodo seco ni húmedo definido en el sitio de estudio. Hay, un aumento de la trascolación en un 37.5% y una disminución de la escorrentía cortical e interceptación en un 83.6% y 33% aplicando el tratamiento con respecto al control. También aumenta la reposición de agua del suelo, el drenaje en profundidad y la escorrentía en un 30.7%, 8.5% y 46.2%, con excepción del año hidrológico 13-14 en que el drenaje disminuye en un 4.4%. Por otro lado las variables de evapotranspiración, como transpiración y evaporación del suelo, siguen la misma tendencia a lo largo del periodo de estudio, la primera disminuyendo en un 49.6% y la segunda aumentando en un 73.3% respecto al control.

Los resultados expuestos en el presente trabajo pretenden ayudar a cuantificar las distintas variables del ciclo hidrológico, así como en entender los efectos del tratamiento silvícola que tienen sobre los mismos.

#### **En valenciano:**

Els recursos hídrics en una escala de conca no són només el resultat de condicions climàtiques i estructures geomorfològiques, sinó que també són el resultat de l'evolució i successió ecològica, fet que ha sigut descuidat durant molt de temps en la gestió de recursos hídrics. La falta de gestió forestal en masses de capçalera comporta conseqüències negatives com la degradació d'estructures biològiques, increment en el rang d'esdeveniments hidrològics extrems, alteració de la capacitat d'emmagatzemament de la conca, variabilitat de la disponibilitat d'aigua disponible per als diferents usos en la conca, etc. Pel que es fa necessària la gestió forestal de base ecohidrològica on es situe a l'aigua al centre de planificació i gestió del bosc, sent açò més important en ecosistemes semiàridos com és el cas de les conques situades al Mediterrani, ja que aquestes són molt sensibles a temporades seques més llargues i amb menor contingut d'humitat de sòl (conseqüència del canvi climàtic) ; a causa d'açò es veu afectat l'objectiu principal de la gestió forestal de base ecohidrològica que és un augment de la precipitació neta."

L'objectiu del present treball és la descripció quantitativa de l'ecohidrologia d'una massa forestal de pi blanc (*Pinus halepensis Mill.*) regenerada després d'incendis amb baixos valors de biomassa. Igualment, s'estudia el canvi observat en les distintes variables ecohidrològiques mesurades després de l'aplicació d'un tractament selvícola de reducció de densitat."

La metodologia que es va utilitzar en el present treball de final de màster és de base experimental per mitjà del mesurament i seguiment de variables hidrometeorològiques, ecohidrològiques, ecosistemàtiques, vegetació i sòl realitzades en una parcel·la experimental ubicada al parc natural "Serra Calderona" en les que es troba una subparcel·la de control i una subparcel·la de tractament on s'ha realitzat una gestió forestal."

Els resultats més rellevants del present estudi són: La precipitació bruta mostra que no hi ha un període sec ni humit definit en el lloc d'estudi. Hi ha, un augment de la trascolació en un 37.5% i una disminució de l'escolament cortical i intercepció en un 83.6% i 33% aplicant el tractament respecte al control. També augmenta la reposició d'aigua del sòl, el drenatge en profunditat i l'escolament en un 30.7%, 8.5% i 46.2%, amb excepció de l'any hidrològic 13-14 en què el drenatge disminueix en un 4.4%. D'altra banda les variables de evapotranspiració, com a transpiració i evaporació del sòl, segueixen la mateixa tendència al llarg del període d'estudi, la primera disminuint en un 49.6% i la segona augmentant en un 73.3% respecte al control.

Els resultats exposats en el present treball pretenen ajudar a quantificar les diferents variables del cicle hidrològic, així com a entendre els efectes del tractament silvícola que tenen sobre aquests.

### **En inglés:**

The water management at small-scale catchment is not only a result of weather conditions and morphological structures, but the evolution and ecological succession which has been omitted in water management in the last years. Moreover, the lack of headwater forest management produces effects such as: biological structures degradation, extreme hydrological events range increase, catchment storage capacity alteration, change in the amount of water available for different uses and so on. Thus, a model of forest management based on ecohydrology, which bases on planing and forest management is necessary. Furthermore, this model is considered important in semiarid ecosystems (e.g. Mediterranean region) characterized by an important sensibility towards larger drought periods and a decreased soil humidity consequence of global warming. Therefore, the net precipitation, the main goal of forest management based on ecohydrology, is affected.

The goal of the current research is to develop an ecohydrological quantitative description of a regenerated low mass forest pine (*Pinus halepensis* Mill.) after burning. Additionally, the change in several measured ecohydrological variables is studied after a silviculture treatment.

The scientific methodology consists on measuring and following of hydrometeorological, ecohydrological and ecosystemic variables measured in vegetation and soil. The experimental plot is located inside the "Sierra Calderona" natural park where there are paired sub plots with and without treatment.

The most relevant results of this study are explained: Gross rainfall explains the lack of a defined dry or wet period in the studied catchment. Moreover, the application of the treatment increases throughfall 37.5%, decreases stemflow 83.6%, interception decreases 33%, increases soil water reposition 30.7%, increases deep drainage 8.5%, and increases runoff 46.2% in comparison to control catchment except for hydrological year 13-14 where drainage decrease 4.4%. Furthermore, the evapotranspiration variables such as transpiration decreases 49.6% and soil evaporation increases 73.3% compared to control catchment.

The presented results intend to help in the quantification of several hydrological cycle variables as well as to understand the effects of silvicultural treatment.

**Palabras clave español:** ecohidrología, gestión forestal, *Pinus halepensis Mill*, bosque de baja biomasa

**Palabras clave valenciano:** ecohidrología, gestió forestal, *Pinus halepensis Mill*, bosc de baixa biomassa

**Palabras clave inglés:** ecohydrology, forest management, *Pinus halepensis Mill*, low biomass forest



Para mis padres, Lautaro y Patricia



**AGRADECIMIENTOS**

Al Doctor Antonio Dámaso del Campo García por su excelente dirección, apoyo, tiempo y motivación para la realización del presente trabajo de fin de máster. Al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. A los profesores del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, en especial a los de la intensificación de Gestión, Ordenación y Restauración de Cuencas por todos los conocimientos y dedicación brindada. A los proyectos HYDROSIL y SILWAMED, ya que sin su registro de datos la realización del presente trabajo hubiera sido imposible. A mi hermano Sebastián por todo el apoyo y ayuda en la realización de este máster. A Vero por toda su paciencia y apoyo. A todos mis amigos que de una u otra forma formaron parte de este proyecto.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
ECOHIDROLOGÍA UNA VISIÓN GENERAL.....	1
CARACTERIZACIÓN DE UN BOSQUE MEDITERRÁNEO DE PINOS .....	4
PINUS HALEPENSIS MILL .....	5
TRATAMIENTO DE SILVICULTURA .....	6
GESTIÓN FORESTAL DE BASE ECOHIDROLÓGICA.....	7
OBJETIVOS.....	10
OBJETIVO PRINCIPAL.....	10
OBJETIVOS SECUNDARIOS.....	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL.....	12
OBTENCIÓN DE DATOS.....	17
PARTICIÓN DE LLUVIA BRUTA: TRASCOLACIÓN, ESCORRENTÍA CORTICAL E INTERCEPTACIÓN .....	19
REDISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN NETA: REPOSICIÓN DE AGUA DEL SUELO, DRENAJE Y ESCORRENTÍA .....	23
TRANSPIRACIÓN DE LAS PLANTAS, EVAPORACIÓN DEL SUELO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN	27
ESTADÍSTICA APLICADA AL CASO DE ESTUDIO.....	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
LLUVIA BRUTA .....	29
PARTICIÓN DE LLUVIA BRUTA: TRASCOLACIÓN, ESCORRENTÍA CORTICAL E INTERCEPTACIÓN .....	31
REDISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN NETA: REPOSICIÓN DE AGUA DEL SUELO, DRENAJE Y ESCORRENTÍA .....	38
TRANSPIRACIÓN, EVAPORACIÓN DEL SUELO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	45
BALANCE DEL CICLO HIDROLÓGICO .....	51
CONCLUSIONES .....	52
REFERENCIAS.....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Ciclo hidrológico (MAASP).....	3
Figura 2.- Ciclo hidrológico de un cuerpo forestal. Fuente: Elaboración propia sobre imagen obtenida de García-Saúco (2014).....	4
Figura 3.- Bosque de Pinus halepensis .....	6
Figura 4.- Mapa del parque natural "Sierra calderona". Fuente: Google Maps .....	11
Figura 5.- Ortofoto de las parcelas de Control C y Tratamiento T .....	15
Figura 6.- Parcela antes de aplicar el clareo (Tratamiento) .....	15
Figura 7.- Tractor del servicio forestal de Valencia aplicando el clareo (Tratamiento) .....	16
Figura 8.- Parcela después de aplicar el clareo (Tratamiento).....	16
Figura 9.- Unidad central Data-logger (CAMPBELL, 2018b) .....	17
Figura 10.- Multiplexor AM16/32B (CAMPBELL, 2018a).....	18
Figura 11.- Modulo de expansión SDM-IO16 (CAMPBELL, 2018c).....	18
Figura 12.- Unidad central data-logger instalada en el lugar de estudio .....	19
Figura 13.- Pluviómetro (WEATHERSHOP, 2018) .....	20
Figura 14.- Canales utilizados para medir la trascolación en las parcelas .....	21
Figura 15.- Medición de escorrentía cortical .....	22
Figura 16.- Cubo basculante Pronamic 100.054 (PRONAMIC, 2018).....	22
Figura 17.- Sensor FDR EC-5 (ICT, 2018).....	24
Figura 18.- Modelo 428 BioBailer (Solinst, 2018).....	24
Figura 19.- PX40-15G5V (OMEGA, 2018) .....	25
Figura 20.- Contador de agua marca Diehl modelo ALTAIR V4.....	25
Figura 21.- Zanja para medición de escorrentía.....	26
Figura 22.- Franja de desviación de escorrentía ubicada en la parte superior de la parcela.....	27
Figura 23.- Lluvia bruta acumulada en cada año hidrológico .....	29
Figura 24.- Lluvia bruta diaria en el año hidrológico 2013-2014 .....	30
Figura 25.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2014-2015 .....	30
Figura 26.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2015-2016 .....	31
Figura 27.- Decadencia de Pinus halepensis y Quercus suber .....	31
Figura 28.- Trascolación en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico .	33
Figura 29.- Escorrentía cortical en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico.....	33
Figura 30.- Interceptación en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico	34
Figura 31.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2013-2014 .....	35
Figura 32.- Trascolación en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014.....	35
Figura 33.- Escorrentía cortical en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014 .....	36
Figura 34.- Interceptación en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014.....	36
Figura 35.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2014-2015 .....	37
Figura 36.- Trascolación en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015.....	37

Figura 37.- Escorrentía cortical en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015 .....	38
Figura 38.- Interceptación en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015.....	38
Figura 39.- Reposición de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico.....	40
Figura 40.- Drenaje en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico.....	40
Figura 41.- Escorrentía en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico ...	41
Figura 42.- Lluvia neta en el año hidrológico 2013-2014.....	42
Figura 43.- Reposición de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014 .....	42
Figura 44.-Drenaje en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014	43
Figura 45.-Escorrentía en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014.....	43
Figura 46.- Lluvia neta en el año hidrológico 2014-2015.....	44
Figura 47.- Reposición de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015 .....	44
Figura 48.-Drenaje de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015 .....	45
Figura 49.- Escorrentía de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015 .....	45
Figura 50.- Transpiración en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico	47
Figura 51.- Evaporación del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico.....	47
Figura 52.- Evapotranspiración del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico.....	48
Figura 53.- Transpiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014 .....	48
Figura 54.- Evaporación del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014 .....	49
Figura 55.- Evapotranspiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014 .....	49
Figura 56.- Transpiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015 .....	50
Figura 57.- Evaporación del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015 .....	50
Figura 58.- Evapotranspiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015 .....	51

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.- Cambio en características, afección a funciones y servicios del ecosistema .....	8
Tabla 2.- Características fisiográficas, climáticas y edáficas del sitio experimental y parcelas de Control C y Tratamiento T .....	13
Tabla 3.- Resumen de la estructura forestal en las parcelas de Control y Tratamiento .....	14
Tabla 4.- Año hidrológico, lluvia bruta, trascolación, escorrentía cortical e interceptación .....	32
Tabla 5.- Año hidrológico, lluvia neta, reposición de agua del suelo, drenaje y escorrentía.....	39
Tabla 6.- Año hidrológico, transpiración, evaporación del suelo y evapotranspiración.....	46

## CAPÍTULO 1:

# INTRODUCCIÓN

### ECOHIDROLOGÍA UNA VISIÓN GENERAL

La ecohidrología es una ciencia que estudia conjuntamente la hidrología con la ecología y los diferentes procesos que se dan entre las mismas. Estos procesos se dan generalmente en sistemas acuáticos, ya sea en aguas subterráneas o en aguas superficiales (ríos, lagos, etc.), pero también se pueden dar estos procesos en la vegetación y en el suelo. Esta ciencia busca entender como los procesos hidrológicos regulan e interactúan con los procesos ecológicos y viceversa.

El punto de partida para el desarrollo de la ecohidrología es la disminución de la disponibilidad del agua mundial partiendo de dos realidades: primero la evidencia de la debilidad de los enfoques tradicionales de la gestión del agua basados en un enfoque mecánico del funcionamiento de los ecosistemas. Las soluciones desde este enfoque no han dado sido sostenibles ya que los problemas del agua son el resultado de múltiples causas y efectos. En segundo lugar, las soluciones aplicadas en países desarrollados basadas principalmente en la ingeniería civil son insostenibles debido a limitaciones financieras y energéticas. Los recursos hídricos a escala de cuenca no son solo el resultado de condiciones climáticas y estructuras geomorfológicas, sino que también son el resultado de la evolución y sucesión ecológica, lo mismo que ha sido mucho tiempo descuidado en la ciencia y en la gestión de recursos hídricos. Una de las consecuencias negativas de la degradación de las estructuras biológicas ha sido el incremento en el rango de eventos hidrológicos extremos. Esto conlleva a la ampliación de procesos físicos que modifican la geoquímica y crean una retroalimentación negativa en las estructuras biológicas y dinámicas del ecosistema; otras consecuencias son la variabilidad de factores físicos, reducción de la capacidad de almacenamiento de la cuenca, impacto en los nutrientes y sedimentos (Zalewski, 2002).

El ciclo del agua es un factor importante en el funcionamiento de los ecosistemas forestales especialmente en zonas que se ven afectadas por déficit hídrico como es la zona mediterránea de España (80% de la superficie) (Santa-Regina et al., 1989), por lo que los diversos componentes del ciclo hidrológico detallados a continuación y que se pueden observar en la *Figura 1* y *Figura 2* son muy importantes para el estudio ecohidrológico.

**Evaporación E.-** es el proceso en el cual el agua líquida pasa a un estado gaseoso. Para que se dé este proceso la humedad de la atmósfera debe ser menor que la superficie de evaporación. Se puede decir, que el ciclo hidrológico comienza con la evaporación del agua de los océanos, el vapor de agua es transportado por masas de aire en movimiento hacia los continentes y bajo condiciones meteorológicas adecuadas el vapor de agua se condensa para formar nubes las cuales dan origen a la precipitación (Campos, 1998).

**Precipitación P.-** está definida por toda agua meteórica que cae en superficie ya sea en forma líquida o sólida y constituye la entrada principal al sistema hidrológico. Existen diferentes tipos de precipitación: convectiva, orográfica y frontales.

**Infiltración I.-** se define como el proceso en el cual el agua que llega a la superficie entra en el suelo, por lo que mide la capacidad del suelo para absorber la precipitación. La cantidad infiltrada depende de muchos factores como la textura del suelo, la cantidad de precipitación, etc. Parte del agua que se infiltra puede permanecer en capas superficiales del suelo y volver al curso de agua ya que escurre hasta éste, otra parte se infiltra profundamente recargando al acuífero, otra se evapora directamente o a través de las plantas.

**Condensación C.-** se define por el cambio de estado de vapor a líquido causado por el enfriamiento. En meteorología cuando se habla de la formación de agua líquida en vapor, este proceso libera calor. Este proceso es importante porque forma las nubes, las mismas que producen precipitación que es la principal forma en que el agua regresa a la tierra. Este componente también produce la niebla.

**Transpiración T.-** es el proceso de evaporación que se da a través de las hojas. En este proceso el agua regresa a la atmósfera; se estima que alrededor de un 10% de la humedad de la atmósfera proviene de la transpiración de las plantas (USGS, 2018), y es influenciado por muchos factores como: temperatura, humedad relativa, el viento, movimiento de aire y tipos de plantas. Este componente junto con la evaporación forma un componente llamado evapotranspiración.

**Escorrentía Superficial Es.** - es la parte de la precipitación que no se infiltra, ni intercepta o evapora y fluye por la superficie del suelo. La relación entre precipitación y escorrentía superficial varía de acuerdo con el tiempo y a la localización geográfica. La escorrentía superficial se ve afectada por factores meteorológicos, geología física y la topografía. Solo un tercio de la precipitación que cae se convierte en escorrentía que tiene como punto final los océanos, la diferencia se evapora o es absorbida por el suelo pasando a ser parte de los componentes subterráneos del ciclo hidrológico (USGS, 2018).

**Escorrentía Subsuperficial Ess.** - este término se refiere al agua que ha sido infiltrada pero no alcanza a llegar a ser parte del almacenamiento subterráneo o recarga del acuífero por lo que se considera parte de la escorrentía.

**Interceptación It.-** la interceptación es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico (Whelan & Anderson, 1996), porque influye de manera decisiva en la cantidad de agua que alcanza el suelo. La interceptación se encuentra definida como la fracción de precipitación que no llega a la superficie del suelo ni por trascolación ni por escorrentía cortical. La interceptación incluye la escorrentía cortical que no ha llegado al suelo, el agua que se evapora desde la cubierta durante la precipitación y la que sirve para saturar las copas de los árboles evaporándose después de la precipitación o que se absorbe por la propia vegetación (González et al., 1993).

**Escorrentía cortical Ec.-** se define como la cantidad de agua que fluye a través de las hojas, ramas, ramillas que desemboca en el tronco principal del árbol y llega posteriormente a la superficie del suelo. Este tipo de escorrentía cuando llega al suelo se concentra alrededor del tronco, por lo que todo el volumen de escorrentía cortical se concentra en un área muy pequeña (pocas decenas de cm<sup>2</sup>).

**Trascolación Tr.** - está definida por la cantidad de agua que llega al suelo a través de los espacios que existen en la cubierta de copa o por goteo de que se puede dar en las ramas, ramillas, hojas, etc. La dispersión de este flujo no es homogénea, sino que existen variaciones bajo la misma cubierta ya que se ve afectado por cambios de velocidad, dirección del viento, cambios fenológicos del árbol a lo largo del tiempo y modificaciones por efecto de sequías y estrés hídrico (Belmonte & Romero, 1999). Éste componente junto con la escorrentía cortical son los que transportan los nutrientes que se originan fuera del sistema junto con los nutrientes de las plantas (Pallardy, 2008), y los mismos son los que forman la precipitación neta, que es la parte de la precipitación que alcanza el suelo bajo la cubierta vegetal.

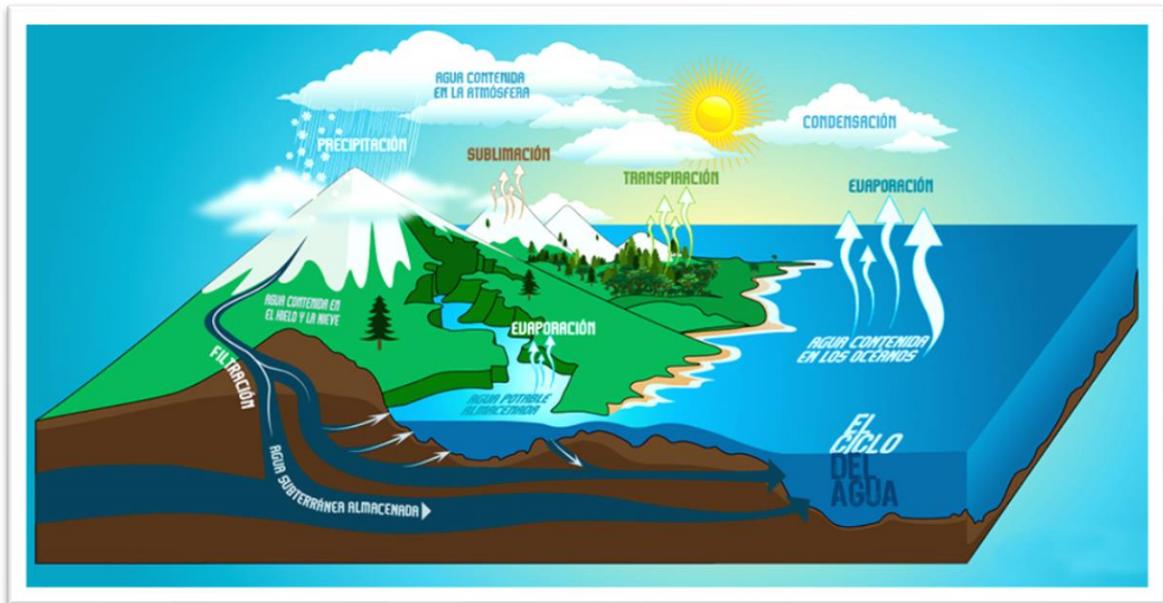


Figura 1.- Ciclo hidrológico (MAASP)

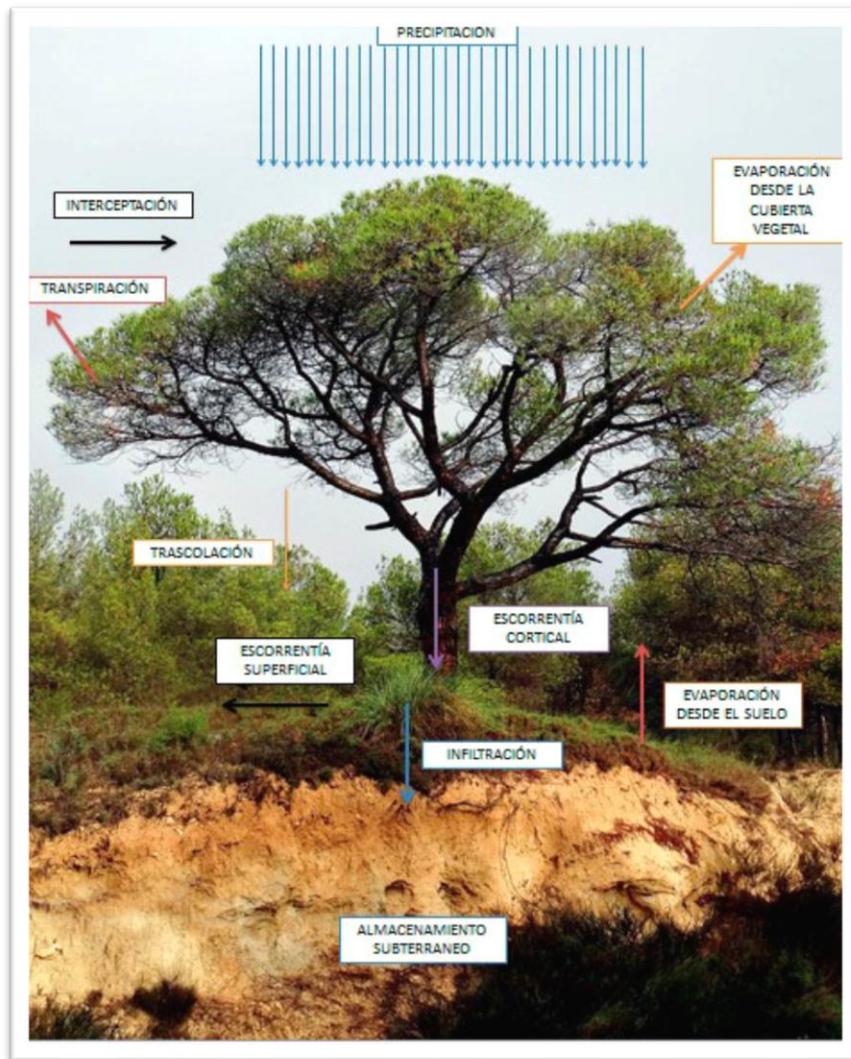


Figura 2.- Ciclo hidrológico de un cuerpo forestal. Fuente: Elaboración propia sobre imagen obtenida de García-Sáuco (2014)

### CARACTERIZACIÓN DE UN BOSQUE MEDITERRÁNEO DE PINOS

El bosque mediterráneo es un tipo de vegetación que se desarrolla en regiones con climas mediterráneos, que son caracterizadas por inviernos templados, veranos secos, otoños y primaveras con abundantes precipitaciones. Además, presentan frecuentes incendios forestales. El suelo dominante es el rojo mediterráneo, el pardo, y la terra rossa relicta. La vegetación de estos bosques es xerófila, siendo la especie climática la encina (*Quercus ilex*), mientras que la vegetación formada por matas y arbustos que crecen bajo los árboles del bosque se caracteriza por ser leñosa, espinosa y aromática (romero, madroño, enebro, espinos, etc.). En el cortejo florístico existen otras especies arbóreas muy importantes como pino carrasco, pino piñonero, pino rodeno, etc. Las mismas que forman masas boscosas y dominantes cuando las condiciones ecológicas se hacen más limitantes para las frondosas. Uno de los principales problemas de los bosques mediterráneos es que son muy propensos al fenómeno de la desertificación.

Los pinares son los bosques de coníferas más extensamente repartidos por el área circunmediterránea. El género *Pinus* está conformado por ocho especies en el mediterráneo: *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*, mientras que las especies conformadas por *Pinus brutia*, *Pinus heldreichii* y *Pinus leucodermis* se encuentran en la parte oriental de la región. Resulta difícil saber la distribución natural de los pinares ya que han sufrido modificaciones ya sea en su extensión por el cultivo de especies a conveniencia y por el talado para el uso de la madera. A partir de diversos estudios se concluyó que las especies actuales de *Pinus* se encuentran en la Península Ibérica desde finales de la última era glaciaria. Los pinos mediterráneos se consideran especies frugales lo que quiere decir que viven bien en condiciones limitantes. Los factores que influyen en la distribución de *Pinus* en la región mediterránea son principalmente edáficos, litológicos, geomorfológicos y climáticos. Las coníferas están muy bien adaptadas a dos tipos de perturbaciones para el desarrollo: la primera es el intenso déficit hídrico y la segunda las bajas temperaturas invernales y los problemas hídricos que causan las heladas en los sistemas de conducción (Castro et al., 2001).

En zonas semiáridas de la cuenca mediterránea las actividades de restauración durante el siglo XX han sido basadas principalmente en plantaciones de *Pinus halepensis* siendo esta una de las principales especies en la región que ahora cubren miles de hectáreas (Maestre & Cortina, 2004).

#### **PINUS HALEPENSIS MILL**

El pino carrasco (*Pinus halepensis*) (Figura 3) presenta una altura mediana y una forma tortuosa llegando a sobrepasar los 20 metros de altura en condiciones óptimas de desarrollo. Esta especie de pino se diferencia de los demás existentes en la Península Ibérica porque en su corteza, en la parte superior del tronco y en las ramas puede presentar un color blanquecino, ceniciento o plateado. Por otro lado, su copa cuando llega a un estado adulto se vuelve irregularmente globosa. Las piñas de esta especie de pino permanecen en el árbol más tiempo que sus hojas que permanecen un promedio de dos años sobre las ramas. La vida media por lo general está entre los doscientos y doscientos cincuenta años y el actual uso que se da a esta especie es de protector hidrológico, así como también para la obtención de leña y de resina ya que por su forma tortuosa no se emplea para la construcción.

En la Comunidad Valenciana el *Pinus halepensis* puede considerarse como la especie más importante, más abundante y que cubre la mayor superficie, ya que la misma predomina en el 72% de la superficie arbolada (la superficie arbolada ocupa más de un 54% de la superficie forestal). Gracias a su potencialidad fitoclimática puede llegar a desarrollarse en más de la mitad de la superficie autonómica (Colomé et al., 2018). Por ello, estudiar su efecto sobre el ciclo hidrológico en sus diversas componentes es de mucha importancia en esta región.



*Figura 3.- Bosque de Pinus halepensis*

### **TRATAMIENTO DE SILVICULTURA**

La silvicultura se define como la formación y cultivo de bosques. Es una ciencia hermana de la agricultura, pero se diferencia de esta en la escala temporal, ya que para la cosecha en la agricultura se tienen que esperar meses, por otro lado, en la silvicultura para poder observar los resultados se tienen que esperar decenas de años. Los productos que se esperan de los bosques son diversos y son mucho más que madera, por lo que se tiene que distinguir dos espacios de producción:

- Producción directa: esta producción se refiere a la obtención de materiales como la madera, resina, etc. y productos como los frutos y derivados de la caza.
- Producción indirecta: esta producción se refiere a los beneficios que se derivan del bosque como la reducción del CO<sub>2</sub>, regulación del ciclo hidrológico, biodiversidad incluyendo el turismo que se da en estas zonas.

En la silvicultura los tratamientos se desarrollan enfocándose en los objetivos que se desean en cada caso, centrándose en que cada masa forestal responde de manera diferente a circunstancias y necesidades específicas, por lo que las acciones tienen que ser adaptadas de manera individual. Uno de los grandes problemas en la silvicultura es que los dueños y la sociedad tienen que definir los objetivos de manejo (Smith et al., 1997). Las técnicas de silvicultura se basan en que la vegetación de cualquier sitio tiende a extenderse por sí misma agresivamente para ocupar el espacio necesario para crecer. Este espacio está limitado por algunos factores como la disponibilidad de agua, luz y nutrientes inorgánicos. En la aplicación de tratamientos de silvicultura se manipulan varios escalones del ecosistema simultáneamente. Por una parte, está el escalón de los ciclos del carbono, oxígeno y agua; otro escalón es el micro ecosistema alrededor de la sombra de plantación de pino y entre los ciclos de nutrientes minerales y la combinación de diferentes clases de diferentes tipos de bosques en una ladera.

Algunos tratamientos de silvicultura son:

Clareo. - se define por el aprovechamiento parcial de algunos árboles con el fin de mejorar la distribución de los árboles en el sitio, disminuir la competencia y redistribuir el incremento en los mejores individuos, así como también disminuir el consumo de recursos de estos.

Poda. - está definida por la remoción de las ramas de árboles casi siempre con el fin de producir madera limpia, libre de nudos que es de mejor calidad, también esta técnica se puede utilizar para reducir la interceptación y la evapotranspiración.

Herbicidas. - el uso de estos puede ser para liberación o limpieza siendo el objetivo dar al árbol más espacio y más recursos para su desarrollo.

Smith et al. (1997) plantea que los objetivos estándar de la silvicultura a considerar en la gestión del agua son el control de la erosión y la reducción del rango entre extremos de flujo. Algunas veces el propósito es el incremento del agua disponible para diferentes usos o mejorar la calidad de la misma.

### **GESTIÓN FORESTAL DE BASE ECOHIDROLÓGICA**

Los bosques producen un sin número de beneficios para los ciudadanos de todos los países del mundo, siendo la industria productora de madera una de las más importantes, pero otros servicios forestales de gran importancia no son tomados en cuenta con la importancia que deberían. Los bosques juegan un papel fundamental en la regulación hídrica desde niveles locales a regionales. Los mismos son cruciales para la preservación de la biodiversidad, ya que muchas especies terrestres dependen de especies forestales para su supervivencia. La habilidad de los bosques para retener y mitigar carbono es crucial para la mitigación del cambio climático y forman parte importante del paisaje, del legado cultural y son un valor recreacional muy importante (Bartczak et al., 2014).

Según FAO (2018), la gestión forestal se define como el proceso de planificación y de ejecución de prácticas para la administración, el manejo y el uso de los bosques y otras tierras boscosas con miras al cumplimiento de objetivos ambientales, económicos, sociales y culturales específicos, siendo la planificación de la gestión forestal un componente fundamental de la gestión forestal sostenible y debe ser necesario ser llevado a término a varias escalas.

Entre las funciones hidrológicas que tienen los bosques está la habilidad de interceptar lluvia y nieve, mejorando las estructuras del suelo, en consecuencia, reduciendo la escorrentía. Esto representa un importante servicio en cuencas donde la erosión, crecidas o avalanchas representan un costo, como el riesgo de deslizamientos o avalanchas causan daño en la infraestructura pública y en la propiedad privada. El costo asociado a las inundaciones se ve reflejado en el deterioro de la salud humana y ambiental, traduciéndose en que la sedimentación de lagos y ríos reducen la calidad y el valor de los cuerpos de agua utilizados para varios propósitos.

Como se observa en la *Tabla 1*, para evaluar la capacidad en la provisión de agua relacionado al ecosistema forestal, es necesario vincular las acciones en el manejo forestal (cambio en características) con la afección a funciones y servicios del ecosistema.

*Tabla 1.- Cambio en características, afección a funciones y servicios del ecosistema*

<b>Cambio en características</b>	<b>Afección a funciones del ecosistema</b>	<b>Afección a servicios ecosistema</b>
Cambio en la cobertura forestal	Erosión y control de escorrentía	Sedimentación de riachuelos, lagos y embalses
		Riesgos de inundación y avalanchas
Cambio en la cobertura forestal	Agua capturada desde el aire	Abastecimiento de agua urbano y uso industrial
		Agua disponible para otros ecosistemas
Cambio en especies forestales	Evapotranspiración y recarga de acuíferos	Agua subterránea disponible para la sociedad
Cambio en el régimen de cosecha	Pérdida de nutrientes con filtración	Agua subterránea y calidad de la escorrentía

Esto es muy importante en bosques mediterráneos porque los mismos juegan un papel fundamental en la erosión, degradación del suelo y estabilización del ciclo hidrológico. Desde los años sesenta se ha producido un abandono de actividades rurales lo que ha provocado la expansión y densificación de bosques y matorrales, lo que resulta en una disminución de caudal de cuencas altas debido a combinaciones de baja precipitación y altas tasas de evapotranspiración lo que puede provocar una disminución en el suministro de agua de las ciudades (15% en España) (del\_Campo et al., 2017).

La gestión forestal de base ecohidrológica sitúa al agua en el centro de planificación y gestión del bosque y persigue manipular y optimizar las interacciones entre los bosques y el agua mediante un enfoque de base ecosistémica. Lo que quiere decir que distintas variables del ecosistema como el crecimiento de los árboles, la sensibilidad de los árboles al clima y la disminución del riesgo de incendios forestales deben ser considerados explícitamente y cuantificados de acuerdo a los objetivos de gestión (García et al., 2018).

En ecosistemas semiáridos el objetivo de la silvicultura debe ser ecohidrológicamente orientado al agua. Ya que este elemento conecta la mayoría de los factores estresantes en el ecosistema (incremento de riesgo de incendio, deterioro de la relación agua verde/azul, sensibilidad del árbol al clima, estrés por sequía y mortalidad). El principal objetivo de la gestión forestal orientada al agua en bosques semiáridos es el aumento de la precipitación neta (del\_Campo et al., 2018). Esto, en conjunto con los efectos del cambio climático en los ecosistemas forestales (temporadas secas más largas y menor contenido de humedad en el suelo), a los que son muy sensibles, hace que el rol de la gestión se vuelva muy importante para la provisión de bienes y servicios del bosque.

## CAPÍTULO 2:

### OBJETIVOS

---

#### OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal del presente trabajo de fin de máster es ser un documento que presente y describa cuantitativamente los distintos flujos de agua que se dan en un ecosistema forestal típico de la zona prelitoral mediterránea española. Para ello, se parte de información experimental que ha sido parcialmente publicada en diversas revistas científicas especializadas y que aquí se integra, se sintetiza de una manera más directa y didáctica, a fin de compendiar los principales resultados en un formato más orientado a personal técnico u otros interesados no doctos en la temática. La referida investigación se ha focalizado sobre las diferentes variables ecohidrológicas en subparcelas experimentales ubicadas en el parque natural “Sierra Calderona”. Los trabajos publicados se encuentran citados en la sección de referencias como: del Campo et al. (2017, 2018, 2019) y González-Sanchis et al. (2019). Estos trabajos abarcan los temas de partición de la lluvia bruta, redistribución de la lluvia neta y evapotranspiración.

#### OBJETIVOS SECUNDARIOS

Los objetivos derivados del anterior son los siguientes:

- La descripción cuantitativa de los componentes ecohidrológicos de una masa forestal de pino carrasco (*Pinus halepensis Mill*) regenerada tras incendio: trascolación, escorrentía cortical, interceptación, recarga de la humedad del suelo, escorrentía, drenaje profundo, transpiración y evapotranspiración total.
- Estudiar el cambio observado en las citadas variables ecohidrológicas medidas de forma experimental tras la aplicación de un tratamiento silvícola consistente en la reducción de la densidad.

## CAPÍTULO 3:

# MATERIALES Y MÉTODOS

### DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El lugar de estudio se encuentra situado en la Sierra Calderona (*Figura 4*), declarado parque natural y se encuentra entre las provincias de Castellón y Valencia (España), en la Comunidad Valenciana. Tiene un área de 17,772 hectáreas y posee unas características físicas naturales que le dan un gran interés ecológico y también de paisaje. Ocupa los términos municipales de las poblaciones de Albalat de Tarongers, Alcublas, Algimia de Alfara, Estiella, Gátova, Gilet, Liria, Marines, Náquera, Olocau, El Puig, Puzol, Sagunto, Serra, Torres Torres, Segart, la Villa de Altura y Segorbe. Esta sierra se encuentra mayoritariamente por debajo de los 1000 metros de altitud, con excepción del Montemayor que tiene una altura de 1015 m.s.n.m. El parque natural está caracterizado por tener un clima típico mediterráneo, con una temperatura media anual de 17 grados centígrados, y con un rango de precipitaciones entre 350 y 600 mm, que se caracterizan por tener un carácter torrencial y también teniendo sequía estival. Esta zona presenta un gran riesgo de incendio. La red hidrográfica que compone este parque natural corresponde a tres cuencas principales: el río Palancia al norte, el barranco de Carraixet y el río Turia situado al sur. Los bosques principalmente están dominados por el pinar, en la mayoría el pino carrasco, generalmente acompañado de matorrales de jaguarzo, aliaga, romero y madroño. En cuanto a la fauna, la Sierra Calderona presenta una fauna muy diversa, encontrándose principalmente aves rapaces como el azor, trepador azul y el águila culebrera en zonas boscosas. Por otra parte, en zonas rocosas se encuentra el halcón peregrino, el águila perdicera, el búho real y los roqueros. A lo que refiere a reptiles, se pueden encontrar diversas especies de ofidios y saurios, en cuanto a mamíferos destacan el gato montés, la ardilla roja, la gineta y el tejón. También la población de perdiz, liebre y jabalí ocupan un lugar importante.

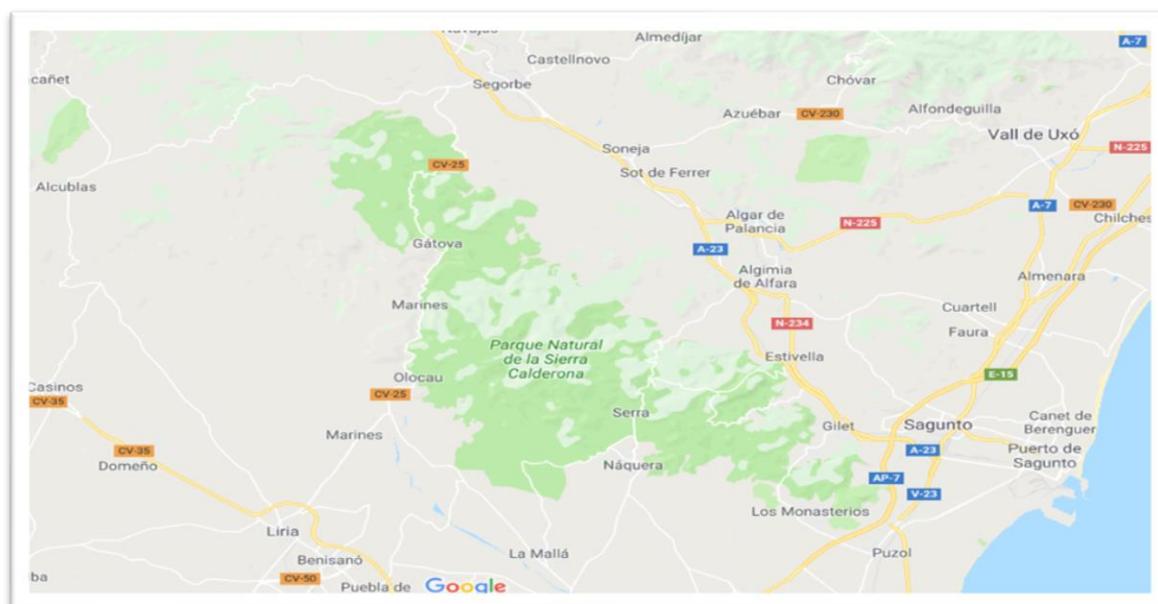


Figura 4.- Mapa del parque natural "Sierra calderona". Fuente: Google Maps

La parcela experimental ubicada en el parque natural “Sierra Calderona”, término municipal de Serra, sigue una orientación Noroeste-Sureste, influenciado directamente por el mar Mediterráneo que se encuentra a una distancia de 25 kilómetros y presenta un bosque de *Pinus halepensis* regenerado después de un incendio forestal ocurrido en 1992 (del\_Campo et al., 2018). Este incendio forestal consumió 94.98 Km<sup>2</sup> (9,498 hectáreas) del parque natural (Urios, 2004). El suelo superficial tiene una textura limosa, un pH básico y tiene un contenido alto de carbonato de calcio. La roca madre es kárstica, presentando arroyos que se secan en los meses de verano sin existir cursos de agua regulares.

### **CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL**

El sitio experimental tiene unas características en que la densidad de árboles y la competencia intraespecífica son altas (*Figura 6*) y ningún tratamiento silvicultural ha sido aplicado en las últimas décadas debido a su rol de bosque protector. El sitio es un tipo de bosque de baja biomasa. La biomasa que presenta por encima del suelo está estimada en 47.3 Mg/ha (22.2 Mg C/ha) (del\_Campo et al., 2018). El clareo juvenil fue ejecutado por un tractor del servicio forestal de Valencia siguiendo los métodos de trabajo para este tipo de tratamientos que se puede apreciar en la *Figura 7*. El clareo removió árboles con diámetros pequeños y árboles dobles y en su realización se trató de lograr una distribución homogénea de los mismos (*Figura 8*), esto basado en la cobertura forestal. Con respecto a los restos producidos por el tratamiento de clareo, los restos gruesos fueron desalojados afuera de la parcela, mientras que los restos finos se trituraron en mantillo en las parcelas que sirvieron de fuente de materia orgánica. Los trabajos fueron realizados entre enero y octubre del 2012 en un área de 50 hectáreas con una alta densidad de pinos jóvenes, alrededor de 15,000 pies por hectárea. En un área representativa se procedió a formar dos parcelas una con tratamiento (**T**) y otra sin tratamiento llamado control (**C**), la parcela de tratamiento fue establecida en octubre de 2012, teniendo las dos un área de 1500 m<sup>2</sup> y con una orientación en sentido noroeste y dividida en 3 bloques desde pendiente arriba a pendiente abajo. El total de área basal eliminada en la aplicación del clareo fue de 74% y la reducción de la densidad fue de un 94%.

Como se puede ver en la *Tabla 2* se describen las características fisiográficas, climáticas y edáficas del sitio experimental en las subparcelas de control y tratamiento. Así mismo en la *Tabla 3* se observa un resumen de la estructura forestal en las subparcelas antes mencionadas, mientras que en la *Figura 5* se observa una ortofoto de las parcelas de control y tratamiento, en donde se puede notar la diferencia de densidad arbórea entre una y otra.

Tabla 2.- Características fisiográficas, climáticas y edáficas del sitio experimental y parcelas de Control C y Tratamiento T. <sup>a</sup> los números romanos corresponden a los bloques experimentales de pendiente arriba a pendiente abajo. <sup>b</sup> Las fracciones expresadas corresponden al siguiente orden: Arena (2-0.02 mm), limo (0.02-0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm). <sup>c</sup> Los intervalos son para la profundidad de suelo (cm). Los valores son la media  $\pm$  desviación estándar. La muestra de los datos fue tomada en mayo del 2012 y mayo del 2016.

PARÁMETRO	UNIDAD	CONTROL (C)	TRATAMIENTO (T)
COORDENADAS	Geográficas	39°42'29-30'' N 0°27'25-26'' E	39°42'28-30'' N 0°27'22-24'' E
ALTITUD	m.s.n.m	785-795	785-795
PENDIENTE	%	26.8 $\pm$ 6.5	28.9 $\pm$ 10.3
ORIENTACIÓN	° (0°: norte)	318.0 $\pm$ 4.8	304.5 $\pm$ 20.2
PRECIPITACIÓN	mm	342	342
TEMPERATURA	°C	14	14
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	mm	837	837
PROFUNDIDAD DEL SUELO <sup>a</sup>	cm	I:20; II:30; III:70	I:20; II:30; III:70
TEXTURA <sup>b, c</sup>	%	0-15:45;29;26	0-15:39;34;27
pH	(agua)	8.3 $\pm$ 0.2	8.3 $\pm$ 0.1
CARBONATOS	(g g-1 de suelo seco)	0.319 $\pm$ 0.114	0.371 $\pm$ 0.114

Tabla 3.- Resumen de la estructura forestal en las parcelas de Control y Tratamiento. (DB es el diámetro basal, DBH es el diámetro basal a altura de pecho, BA es el área basal y LAI es el índice de área foliar. I, II y III es el promedio para cada bloque experimental desde pendiente arriba(I) a pendiente abajo (III),<sup>5</sup> representa valores tomados en el 2016, <sup>γ</sup> representa valores en el año del tratamiento y <sup>x</sup> representa valores promediados a lo largo del periodo de estudio).

Parcela	DB (cm) <sup>5</sup>				DBH (cm) <sup>5</sup>			
	Promedio General	I	II	III	Promedio General	I	II	III
Control	4.33	9.50	4.20	3.70	2.74	6.40	2.80	2.30
Tratamiento	13.18	16.40	12.20	12.10	8.51	11.00	8.00	7.50
Parcela	BA (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> ) <sup>γ</sup>				Densidad (árbol ha <sup>-1</sup> ) <sup>γ</sup>			
	Promedio General	I	II	III	Promedio General	I	II	III
Control	17.50	14.50	15.30	22.80	11300.00	3360.00	5188.00	25350.00
Tratamiento	4.54	5.40	3.70	4.50	703.00	522.00	622.00	964.00
Parcela	Cobertura (%) <sup>5</sup>				LAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ) <sup>x</sup>			
	Promedio General	I	II	III	Promedio General	I	II	III
Control	78.70	64.00	80.00	92.00	1.50	1.40	1.40	1.70
Tratamiento	38.70	32.00	32.00	52.00	0.50	0.50	0.40	0.40



*Figura 5.- Ortofoto de las parcelas de Control C y Tratamiento T*



*Figura 6.- Parcela antes de aplicar el clareo (Tratamiento)*



*Figura 7.- Tractor del servicio forestal de Valencia aplicando el clareo (Tratamiento)*



*Figura 8.- Parcela después de aplicar el clareo (Tratamiento)*

### OBTENCIÓN DE DATOS

En el sitio experimental se instaló un data-logger central CR1000 de Campbell Sci. (Figura 9) para registrar y almacenar los datos. Esta unidad presenta una alta fiabilidad y bajo consumo de energía, lo que lo hace ideal para el trabajo en campo en condiciones extremas y utilizado para múltiples aplicaciones como meteorología, hidrología, geotecnia, monitorización de estructuras, etc., siendo compatible con un amplia gama de sistemas de comunicaciones, periféricos de expansión y software (CAMPBELL, 2018). Esta unidad fue instalada con un panel solar (Figura 12), una batería de 12 V y complementada con dos multiplexores AM16/32B (Figura 10) que tienen la función de incrementar significativamente el número de sensores que se pueden medir con el data-logger. El funcionamiento de los mismos consiste en que se conectan al data-logger y añaden terminales para conectar sensores adicionales casi de cualquier tipo. Además, se adicionaron dos módulos de expansión SDM-IO16 (Figura 11) que expande las prestaciones de los canales I/O del data-logger y además provee cada uno 16 puertos digitales I/O. El sistema de esta unidad fue programado para leer los sensores colocados cada 5 segundos o cada minuto y grabar los valores cada 5 segundos, 10 minutos o 30 de acuerdo con las condiciones medioambientales.



Figura 9.- Unidad central Data-logger (CAMPBELL, 2018b)

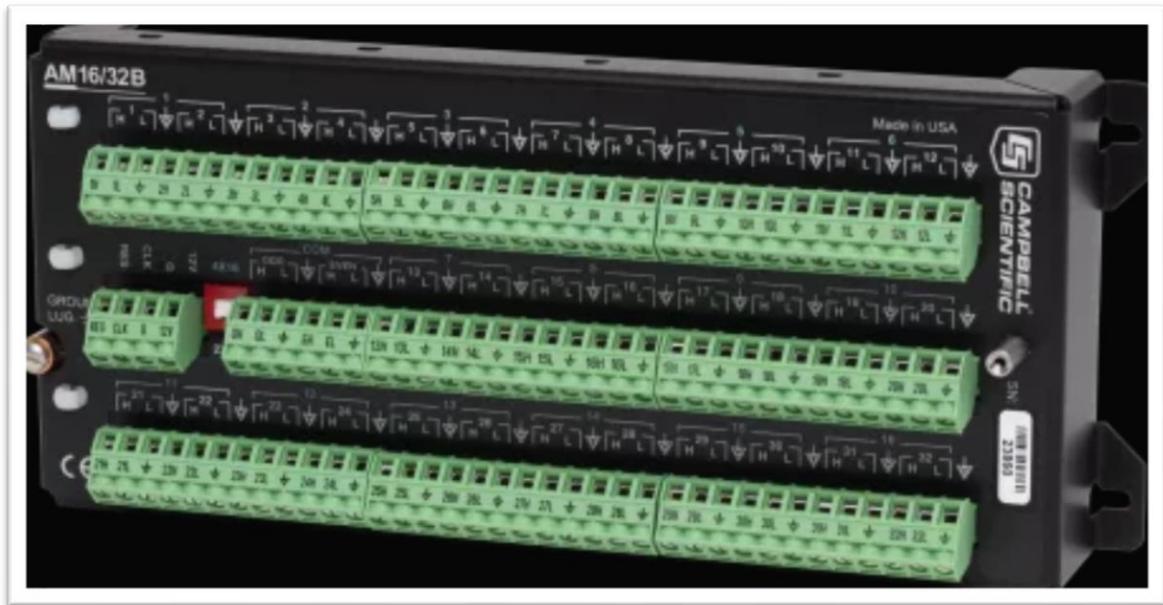


Figura 10.- Multiplexor AM16/32B (CAMPBELL, 2018a)



Figura 11.- Modulo de expansión SDM-IO16 (CAMPBELL, 2018c)



*Figura 12.- Unidad central data-logger instalada en el lugar de estudio*

#### **PARTICIÓN DE LLUVIA BRUTA: TRASCOLACIÓN, ESCORRENTÍA CORTICAL E INTERCEPTACIÓN**

La **precipitación bruta (Pg)** se midió ya que es la base de todo el ciclo hidrológico y componente que da origen a las demás variables estudiadas en el presente trabajo. La misma fue medida continuamente mediante un pluviómetro de cubo basculante (*Figura 13*) situado a 6 metros sobre el nivel del suelo; el mismo cuenta con una resolución de 0.2 mm, y cuando se da un evento de precipitación, mide en intervalos de 5 segundos. Los datos se reagruparon en intervalos de 10 minutos ya que es lo más común encontrar en la literatura. Para el análisis de la precipitación se transformó el tiempo en días julianos y se fijó el tiempo mínimo entre eventos en 1 hora, lo que asegura que dos eventos de precipitación consecutivos sean de diferentes nubes, así como también solo se incluyeron los eventos con más de 1 mm. Para clasificar un evento como convectivo, se adoptó un umbral de intensidad de 50 mm/h que corresponde a un intervalo de tiempo de 1 minuto (del\_Campo et al., 2018).



Figura 13- Pluviómetro (WEATHERSHOP, 2018)

La **trascolución (Tr)** junto a la escorrentía cortical forma la lluvia neta. La misma se midió estableciendo 15 canalones de acero galvanizado (*Figura 14*) por parcela, dispuestos siguiendo las curvas de nivel manteniendo las mismas posiciones a lo largo de todo el estudio. Las dimensiones de los canalones eran de 250 cm de largo y 30.7 cm de ancho el mismo que fue fijado a 50 cm de la superficie. Estos canalones están dispuestos de tal manera que drenan hacia unos contadores de agua Altair V4 que miden un caudal mínimo de 5 l/h. Adicionalmente se colocaron depósitos de 25 litros que fueron aforados en intervalos de 10 a 15 días, para la calibración de todo el sistema. El área total de recogida por cada uno de los canalones fue de 0.613 m<sup>2</sup>, la cual se considera un área adecuada para obtener una estimación de la media con un 95 % de probabilidades; así mismo el lapso del tiempo para los contadores fue de 10 minutos cuando no existían eventos de precipitación y de 5 segundos para cuando ocurría lo contrario.



Figura 14.- Canalones utilizados para medir la trascolación en las parcelas

La **escorrentía cortical (Ec)** se origina por el agua retenida en el tronco del árbol, la cual ha caído directamente sobre éste o proviene de la parte de la precipitación que cae sobre las copas de los árboles y que después resbala por las ramas hasta llegar al tronco. Esta variable fue medida por collares sellados al tronco (Figura 15) a árboles dentro de cada clase de diámetro en la parcela (9 árboles en total). La preparación consistió en que la corteza de cada árbol fue raspada para alisar la superficie de ésta. Después de este proceso se instaló el collarín de plástico con un sellado de poliuretano a una altura variable entre 0.3 y 1.2 metros. Después de que los collarines de plástico fueron instalados, se emplazaron tubos de plástico ubicados en la parte más baja del conjunto de collares y que terminan en pluviómetros y botellas recolectoras para medir el drenaje. Los equipos que se utilizaron son de la marca Promanic modelo 100.054 (Figura 16) que cuenta con una resolución de 1 mm, se utilizó un lapso de tiempo de 10 minutos y 5 segundos cuando existen eventos de precipitación. Este equipo se considera ideal ya que tiene un bajo costo y alta calidad, lo que lo hace que trabaje de una forma óptima en pequeñas estaciones meteorológicas, en mediciones de suelo e irrigación y en medida del drenaje de agua. Después se llevó la fracción de agua a depósitos de 25 litros muestreados en intervalos de 10 a 15 días para validar.



*Figura 15.- Medición de escorrentía cortical*



*Figura 16.- Cubo basculante Pronamic 100.054 (PRONAMIC, 2018)*

La **interceptación (It)** es la fracción de la precipitación bruta que no llega al suelo ni por trascolación ni por escorrentía cortical, que es retenida por la copa, hojas, tronco y vuelve a la

atmósfera por evaporación. La misma fue calculada como la diferencia de precipitación bruta menos la suma de trascolación más escorrentía cortical.  $It = Pg - (Tr + Ec)$ .

Para el promedio de los bloques, cuando el valor de  $It$  daba negativo, éste se pasó a cero.

Para más detalle e información de la obtención y medición de estas variables se puede consultar del\_Campo et al. (2018).

### **REDISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN NETA: REPOSICIÓN DE AGUA DEL SUELO, DRENAJE Y ESCORRENTÍA**

El contenido y dinámica del agua del suelo se midió por su importancia para la obtención de reposición de agua del suelo y el drenaje, ya que estas variables son las encargadas de la recarga de agua en los acuíferos, de producir escorrentía, etc. Para la obtención de estas variables fue medido el contenido de agua del suelo cada 10 minutos por medio de sensores FDR (EC-5 Decagon services Inc., Pullman) (Figura 17). Estos miden el contenido volumétrico de agua por la constante dieléctrica del suelo. El sensor usa una frecuencia de 70 MHz que minimiza la salinidad y los efectos de textura del suelo (ICT, 2018). Los sensores fueron ubicados de tal manera que, por parcela experimental, se ubicaron 15 sensores en 9 puntos situados en una rejilla de malla de 10 x 10 m para lograr una buena estimación del contenido del agua en el suelo. Los hoyos que se excavaron para la instalación de las sondas fueron rellenados con el mismo suelo excavado y fue compactado hasta tener una densidad similar a la del suelo natural no alterado.

En cada evento de precipitación se consideró el primer y el máximo valor de humedad del suelo. La capacidad de campo se calculó para cada sonda y en eventos de precipitación mayores a 20 mm. Dado que los valores de capacidad de campo no fueron consistentes (algunas sondas mostraron desviaciones temporales), se volvió a calcular la capacidad de campo para cada sensor siempre que la precipitación bruta superó el umbral de 20 mm establecido (la desviación promedio  $\pm$  desviación standard en el periodo de estudio para el valor de capacidad de campo fue de  $0.167 \pm 0.043 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). Con ello, los valores recalculados de capacidad de campo se distribuyeron simétricamente a lo largo de la serie temporal con el fin de estimar **la reposición de agua en el suelo ( $\Delta\theta$ ) y el drenaje (D)**. Para este fin, se utilizó una profundidad de suelo promedio para todos los sensores de 187.5 mm (promedio al que se encontraban las 12 sondas de cada parcela experimental). Para calcular  $\Delta\theta$  y D, se tomó como referencia el punto de capacidad de campo, de modo que valores por debajo de este umbral son considerados  $\Delta\theta$  y por encima, son computados como D.

Es preciso aclarar que todos los cálculos se hacen para una profundidad de 18.75 cm del suelo. Esto hace que puedan subestimarse algunos procesos hidrológicos que se dan en capas superiores del suelo y que no son tomados en cuenta, como, por ejemplo: los eventos de lluvia ligera, fracciones pequeñas de interceptación de la hojarasca y estrato subarbustivo-herbáceo, la mayor capacidad de  $\Delta\theta$  en los horizontes orgánicos superiores, etc. **El drenaje (D)** se evaluó como la cantidad de lluvia total (Pg) registrada desde que, una sonda entraba en capacidad de campo y restando la escorrentía, en caso de que ésta se hubiera producido. Se asume que la mayor parte de la interceptación ya ha tenido lugar para el momento en que la sonda entra en capacidad de campo. Adicionalmente, se realizaron controles cualitativos del movimiento de agua en profundidad en piezómetros de 1-4 metros, por medio de chequeo visual de un

muestreador transparente que se encuentra dentro de los piezómetros. El toma-muestras transparente utilizado es un modelo 428 BioBailer, ESP Ltd. (Figura 18); cada 10-15 días, se hacían lecturas de la marca del nivel de agua en el interior del toma-muestras. Además, en algunos piezómetros se instalaron instrumentos automáticos de medida del nivel de agua de marca Omega modelo PX40-15G5V (Figura 19).



Figura 17.- Sensor FDR EC-5 (ICT, 2018)

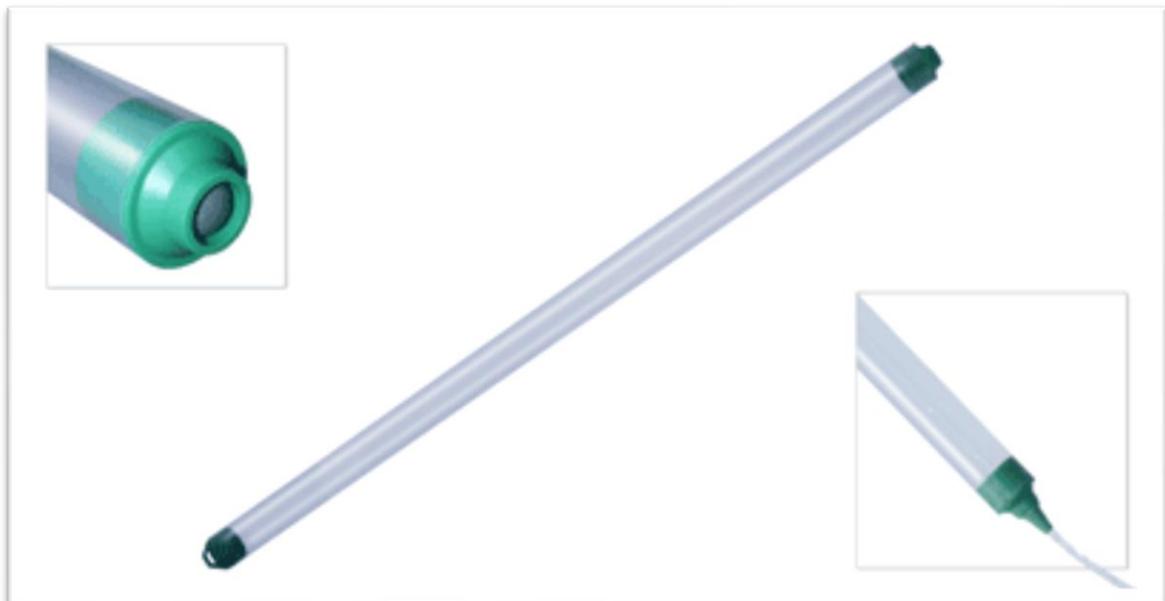


Figura 18.- Modelo 428 BioBailer (Solinst, 2018)

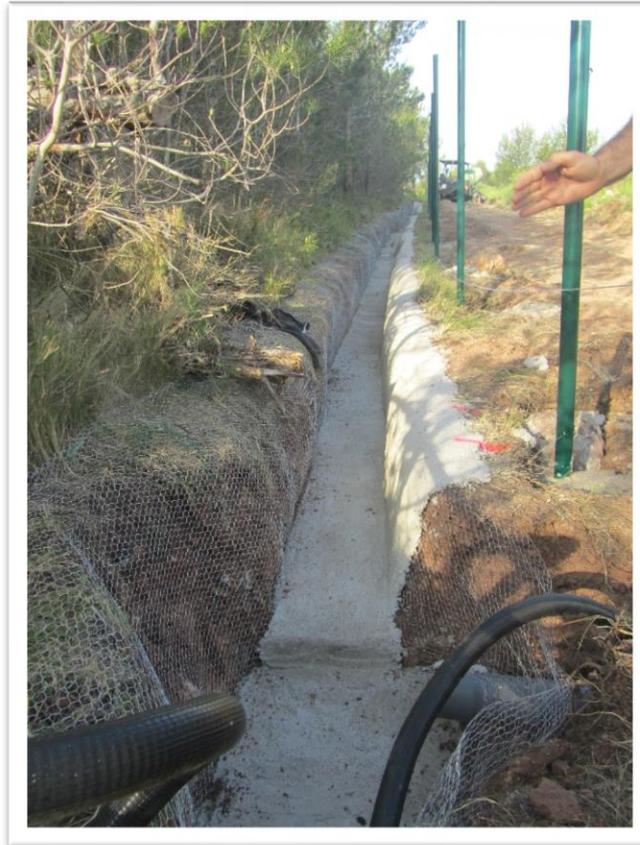


Figura 19.- PX40-15G5V (OMEGA, 2018)

Para el caso de los flujos laterales, éstos se midieron en zanjas excavadas en la base de las parcelas (Figura 21). Estas zanjas tuvieron una profundidad de 30 a 40 cm y una longitud de 35 metros bordeando el límite inferior de la parcela. El lado ascendente de la zanja con respecto a la pendiente se encontraba abierta a los flujos del subsuelo e implementado una malla fina al suelo expuesto al aire. Mientras que los lados basal y aguas abajo de la zanja fueron impermeabilizados con hormigón. Los flujos de superficie y subsuperficiales, que en el presente trabajo se denomina como **escorrentía (E)**, se desviaron a depósitos conectados a contadores de agua de marca Diehl modelo ALTAIR V4 (Figura 20). El tiempo de medición se fijó en 5 segundos cuando existan eventos de precipitación y de 10 minutos cuando no existan eventos. Igualmente, zanjas similares se realizaron en la zona alta de la parcela con la intención de desviar la escorrentía producida en la parte superior fuera de control (Figura 22).



Figura 20.- Contador de agua marca Diehl modelo ALTAIR V4



*Figura 21.- Zanja para medición de esorrentía*



*Figura 22- Franja de desviación de escorrentía ubicada en la parte superior de la parcela*

Para más información sobre la obtención, tratamiento y medición de las variables relacionadas con la redistribución en el suelo de la lluvia neta consultar del\_Campo et al. (2019).

### **TRANSPIRACIÓN DE LAS PLANTAS, EVAPORACIÓN DEL SUELO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN**

Los datos de transpiración, evaporación de agua del suelo fueron obtenidos por medio del modelo TETIS-VEG, dado que la información experimental no ha sido depurada hasta la fecha. Este modelo es calibrado y evaluado usando datos de campo (textura del suelo y transpiración) e información satelital (temperatura del suelo), en donde los primeros fueron utilizados para la validación del modelo (González-Sanchis et al., 2019). Este modelo es el resultado de la unión de un modelo dinámico de vegetación con un modelo de hidrología distribuida llamado TETIS.

Las entradas para el modelo TETIS-VEG son: datos climáticos, características del suelo y el modelo digital de terreno, después el mismo se calibra y válida para finalmente ser aplicado. El uso del modelo no forma parte del trabajo realizado en este trabajo de fin de máster y para más información sobre la obtención, tratamiento, medición de datos y aplicación del modelo consultar González-Sanchis et al. (2019).

### **ESTADÍSTICA APLICADA AL CASO DE ESTUDIO**

Para comparar las diferencias entre las distintas variables medidas entre el tratamiento y control, se utilizó el análisis de ANCOVA considerando el tratamiento como factor y la lluvia bruta como una covariante, para obtener si las diferencias eran significativas entre control y tratamiento. Las variables analizadas corresponden a mediciones realizadas en los años hidrológicos 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016 en el marco de los proyectos HYDROSIL y SILWAMED (Caracterización hidrológica de las estructuras forestales a escala de parcela para

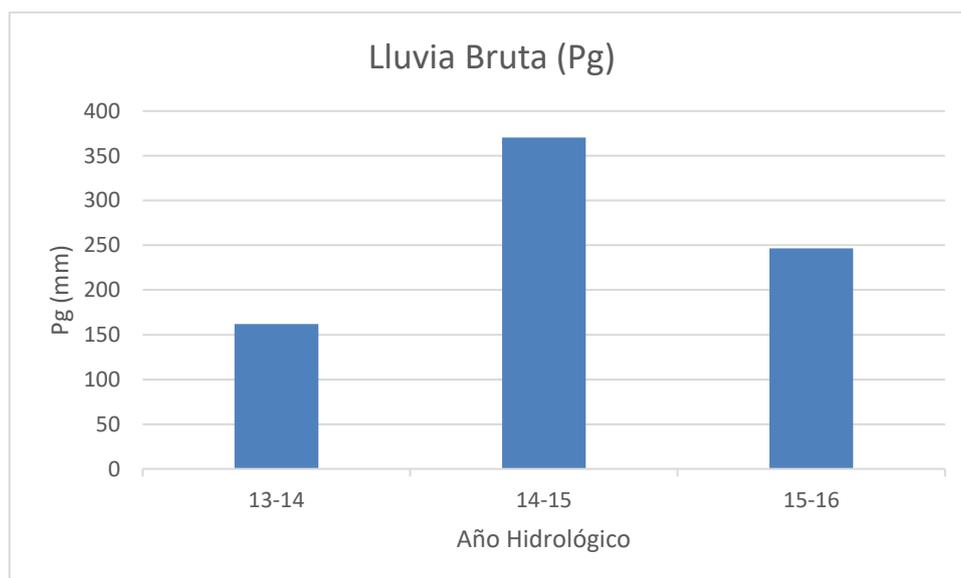
una gestión adaptativa) (UPV, 2018). Las mismas se han tomado a escala de parcela: una parcela de control **C** y la parcela de tratamiento **T** descritas anteriormente. El análisis de estas se llevó a cabo para todo el periodo de datos. También se analizó por separado el año hidrológico 2013-2014 y 2014-2015. El primero por ser considerado un año seco ya que se registró uno de los periodos más secos desde 1870. También es importante porque la Sierra Calderona es propensa a sufrir los impactos del cambio climático, siendo uno de estos la reducción en la precipitación. Y el segundo año hidrológico por registrar la mayor precipitación acumulada en el periodo de estudio.

## CAPÍTULO 4:

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### LLUVIA BRUTA

La lluvia bruta total acumulada en el sitio de estudio fue de 162, 370 y 247 mm de lluvia para los años hidrológicos de 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016 respectivamente (*Figura 23*), siendo el año hidrológico 2013-2014 uno de los años más secos registrados en la serie histórica en el parque natural Sierra Calderona con un total de 162 mm de lluvia. Lo que tuvo como consecuencia que a mediados del año 2014 hubiera mortalidad y decaimiento generalizado de la población de *Pinus halepensis* y otras especies como el alcornoque (*Figura 27*). El régimen de precipitación interanual es muy irregular como se ve en la *Figura 24*, *Figura 25* y *Figura 26*, no hay un periodo húmedo marcado ni un periodo seco, teniendo sequías de 3 meses en época de invierno en el año hidrológico 2013-2014 y meses de sequía en invierno en los demás años hidrológicos del estudio.



*Figura 23.- Lluvia bruta acumulada en cada año hidrológico*

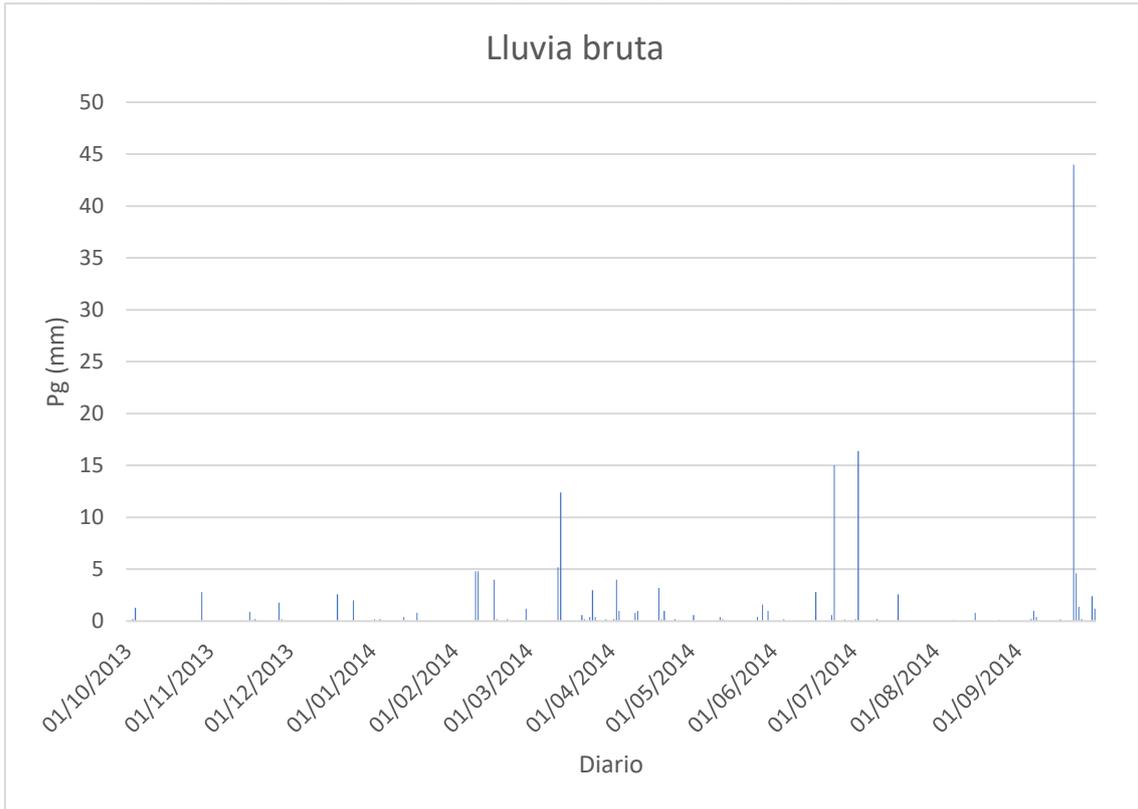


Figura 24- Lluvia bruta diaria en el año hidrológico 2013-2014

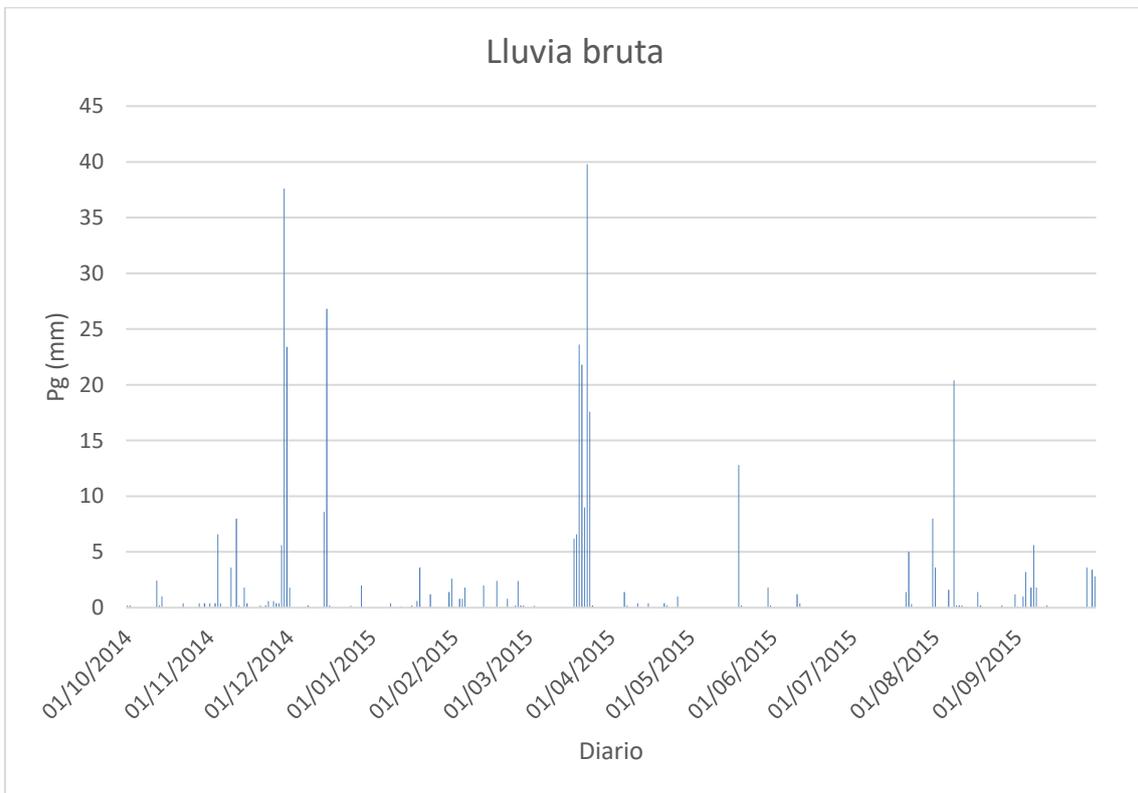


Figura 25.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2014-2015

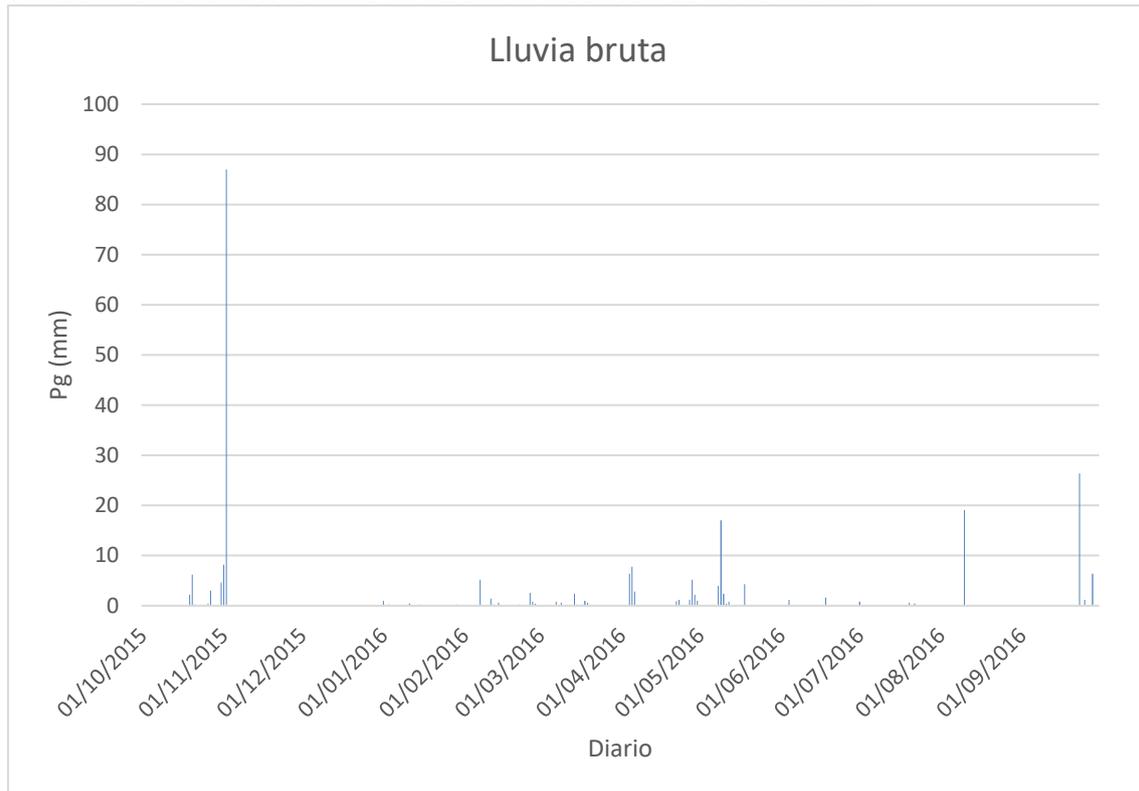


Figura 26.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2015-2016



Figura 27.- Decadencia de *Pinus halepensis* y *Quercus suber*

#### **PARTICIÓN DE LLUVIA BRUTA: TRASCOLACIÓN, ESCORRENTÍA CORTICAL E INTERCEPTACIÓN**

Con base en los datos analizados y expuestos en la *Tabla 4* y *Figura 28*, se pudo comprobar que la trascolación año a año fue mayor en la parcela de tratamiento **T** con respecto a la parcela de control **C**, obteniendo un valor acumulado de 448 mm para **C** y 617 mm para **T**, lo que significa que la trascolación aumentó en un 37.5% aplicando el tratamiento.

Por el contrario como se observa en *Tabla 4*, *Figura 29* y *Figura 30*, la escorrentía cortical e interceptación fueron siempre mayores en **C** que en **T**, registrando un acumulado total en **C** de 105 y 229 mm y en **T** de 17 y 153 mm respectivamente para escorrentía cortical e interceptación, lo que se traduce en que estos componentes del ciclo hidrológico, aplicando el tratamiento, disminuyeron en 83.6 % y 33.0% con respecto al control.

Por lo que al aplicar el tratamiento la trascolación tiende a aumentar y la escorrentía cortical e interceptación a disminuir. Lo que tiene sentido, ya que al haberse aplicado el tratamiento la lluvia bruta cuando cae encuentra más espacio para pasar y llegar al suelo convirtiéndose en una fracción de la lluvia neta, mientras que la escorrentía cortical e interceptación disminuyen por encontrarse con menor densidad de árboles en el tratamiento.

Aplicando el análisis ANCOVA encontramos que las diferencias en **C** y **T** para estos tres componentes fueron significativas.

Tabla 4.- Año hidrológico, lluvia bruta, trascolación, escorrentía cortical e interceptación (valores acompañados de letras diferentes en C y T indican que existe una diferencia significativa; valores acompañados con letras iguales en C y T indican que no existe una diferencia significativa)

Año hidrológico	Lluvia bruta (mm)	Trascolación (mm)		Escorrentía cortical (mm)		Interceptación (mm)	
		C	T	C	T	C	T
13-14	162	94 <sup>a</sup>	121 <sup>b</sup>	20 <sup>a</sup>	3 <sup>b</sup>	48 <sup>a</sup>	39 <sup>a</sup>
14-15	370	217 <sup>a</sup>	293 <sup>b</sup>	55 <sup>a</sup>	9 <sup>b</sup>	103 <sup>a</sup>	73 <sup>b</sup>
15-16	247	138	202	31	5	78	41
<b>Acumulado</b>	779	448 <sup>a</sup>	617 <sup>b</sup>	105 <sup>a</sup>	17 <sup>b</sup>	229 <sup>a</sup>	153 <sup>b</sup>
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (años 13-14, 14-15, 15-16) (%)</b>		37.5		-83.6		-33.0	
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (año 13-14) (%)</b>		29.0		-82.9		-19.1	
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (año 14-15) (%)</b>		35.5		-84.1		-29.1	

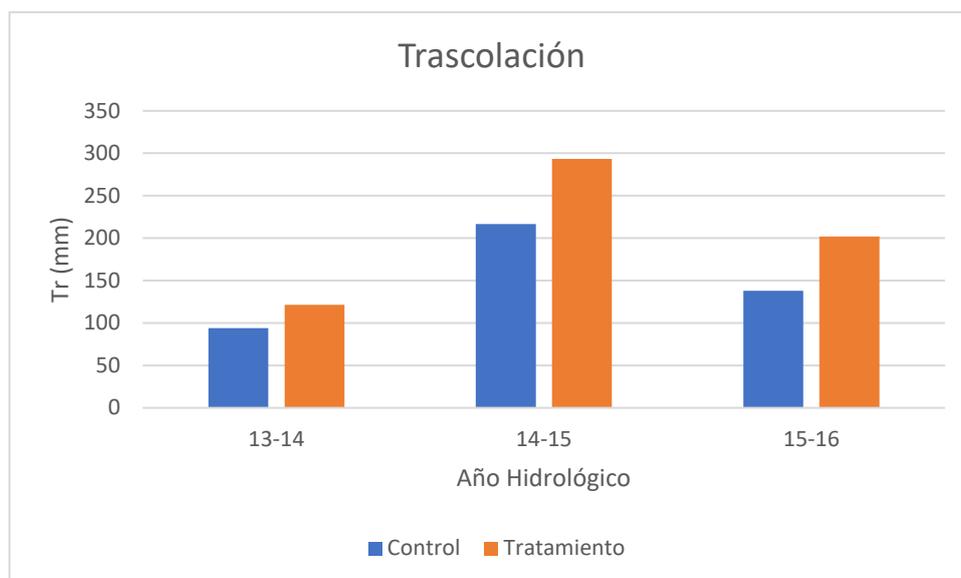


Figura 28.- Trascolación en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

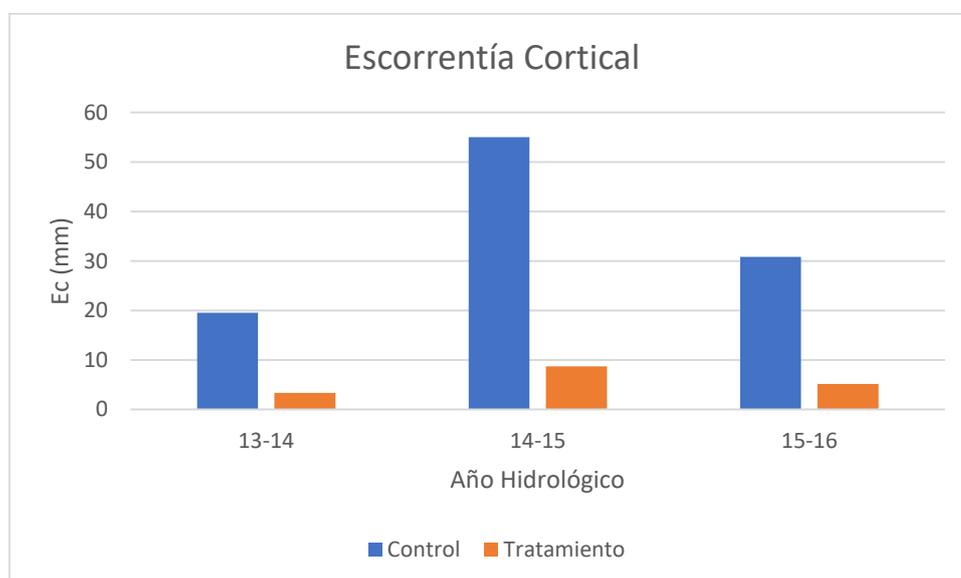


Figura 29.- Escorrentía cortical en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

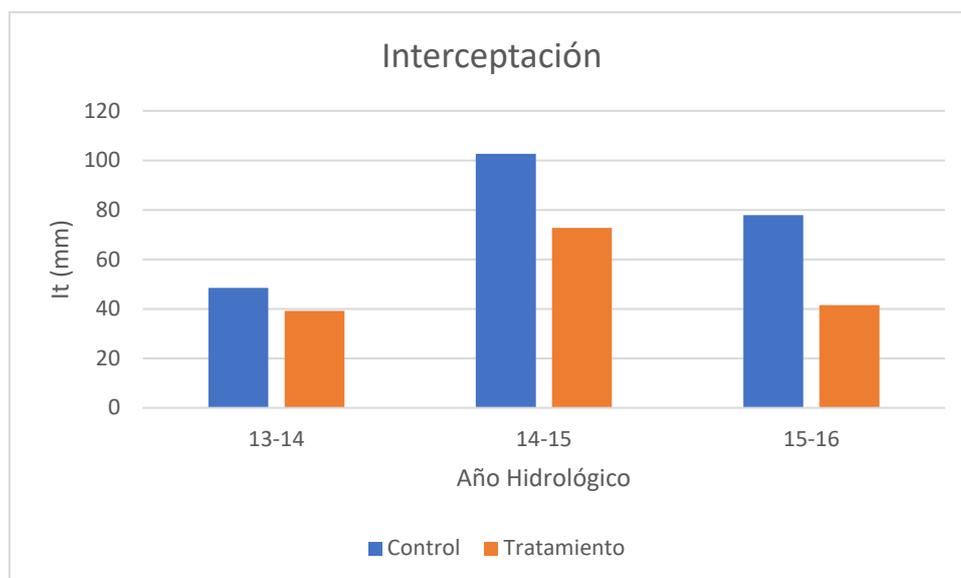


Figura 30- Intercepción en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

En el año **2013 y 2014** para la trascolación, escorrentía cortical e intercepción se registró un valor de 94, 20 y 48 mm para **C** y 121, 3 y 39 mm para **T**. Lo que indica un aumento de 29% en la trascolación y una disminución del 83% y 19% en la escorrentía cortical e intercepción al aplicar el tratamiento con respecto al control (*Tabla 4*).

Se observa que en la *Figura 32* que la trascolación sigue la misma tendencia en **C** y **T**, mientras que la escorrentía cortical (*Figura 33*) muestra una diferencia más marcada entre **C** y **T** especialmente en los meses de febrero, marzo, junio, julio y septiembre, este último siendo el mes que muestra mayor diferencia entre **C** y **T**. Por último, la intercepción, como se observa en la *Figura 34*, es mayor en **C** que en **T** con excepción de septiembre en que **T** es mayor que **C** por un pequeño rango, esto coincide con que en el mencionado mes se registró la mayor precipitación del año hidrológico *Figura 24*. Las tres variables siguen la misma tendencia temporal.

Asimismo, el análisis de ANCOVA indica que las diferencias son significativas entre **C** y **T** para la trascolación y escorrentía cortical; por el contrario, las mismas no son significativas para intercepción.

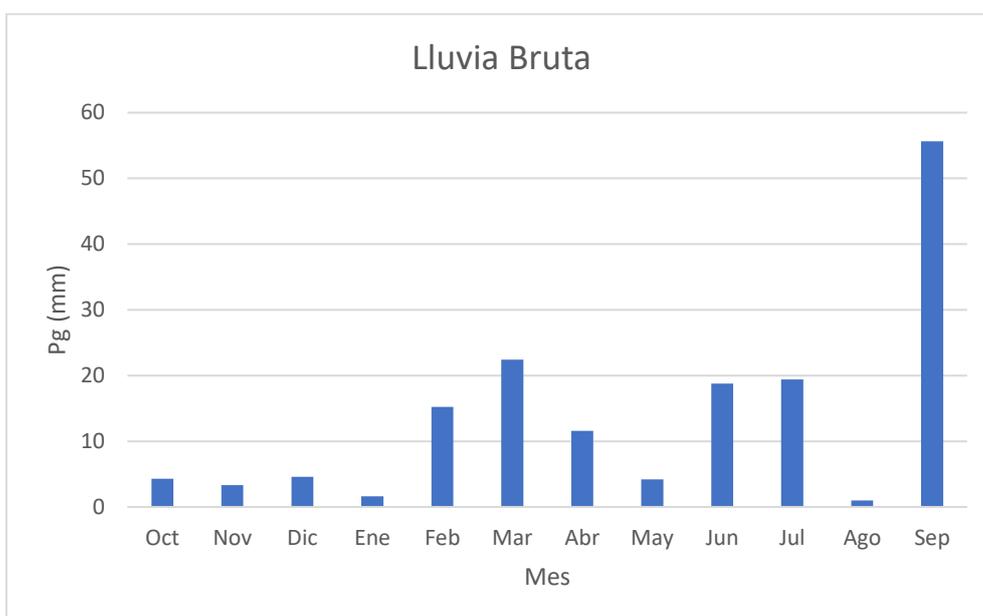


Figura 31.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2013-2014

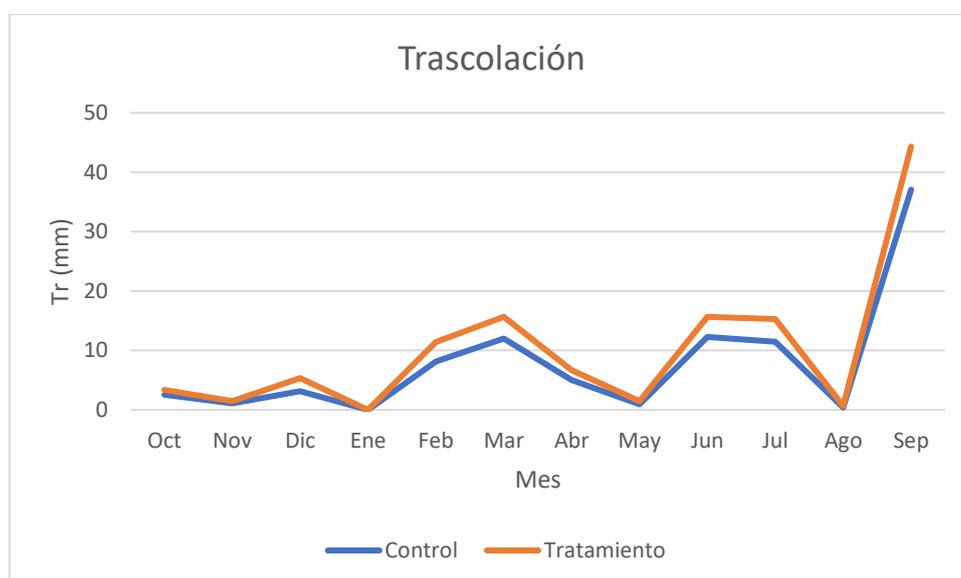


Figura 32.- Trascolación en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

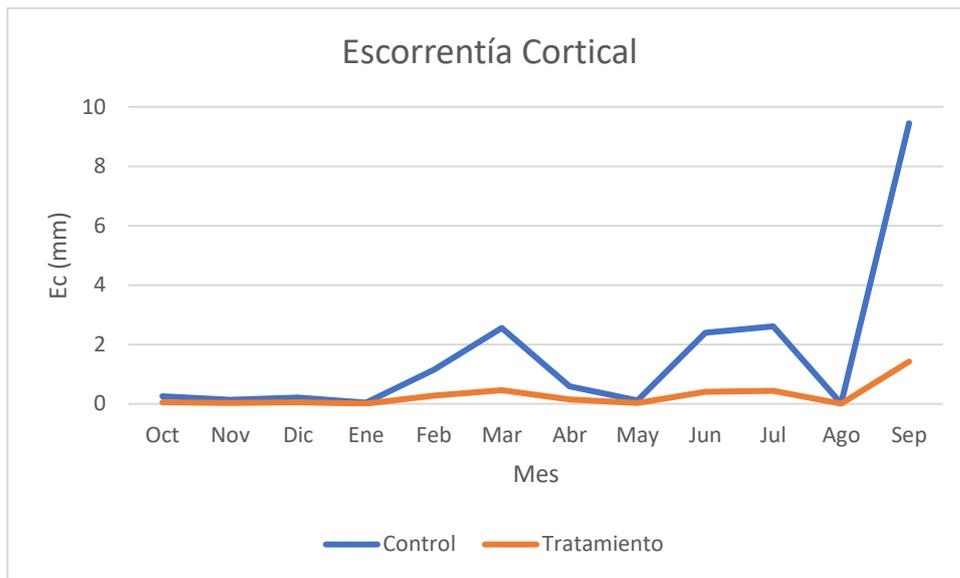


Figura 33.- Escorrentía cortical en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

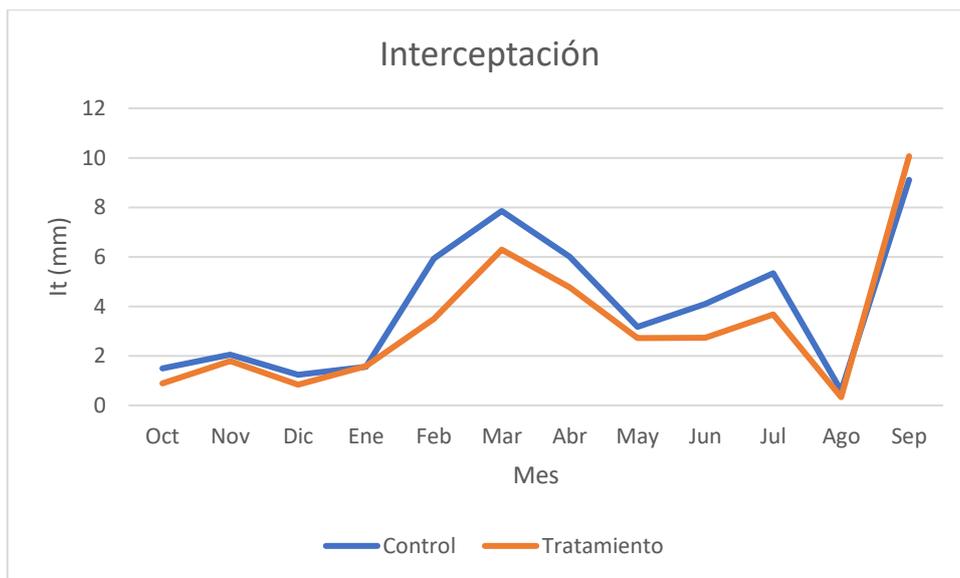


Figura 34.- Interceptación en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

Para el año **2014-2015** la trascolación, escorrentía cortical e interceptación, se registraron valores de 217, 55 y 103 mm para **C** y 293, 9 y 73 mm respectivamente para **T**. Lo que nos indica un aumento de 35.5% en la trascolación y una disminución del 84.1% y 29.1% en la escorrentía cortical e interceptación al aplicar el tratamiento con respecto al control (*Tabla 4*).

Se observa en la *Figura 36* y *Figura 38* que la trascolación e interceptación siguen la misma tendencia entre **C** y **T**, mientras que la escorrentía cortical, como indica la *Figura 37*, muestra una diferencia más marcada en los meses de noviembre y marzo, siendo estos meses los que mayor precipitación presentaron.

Así mismo el análisis de ANCOVA nos indica que las diferencias son significativas entre **C** y **T**.

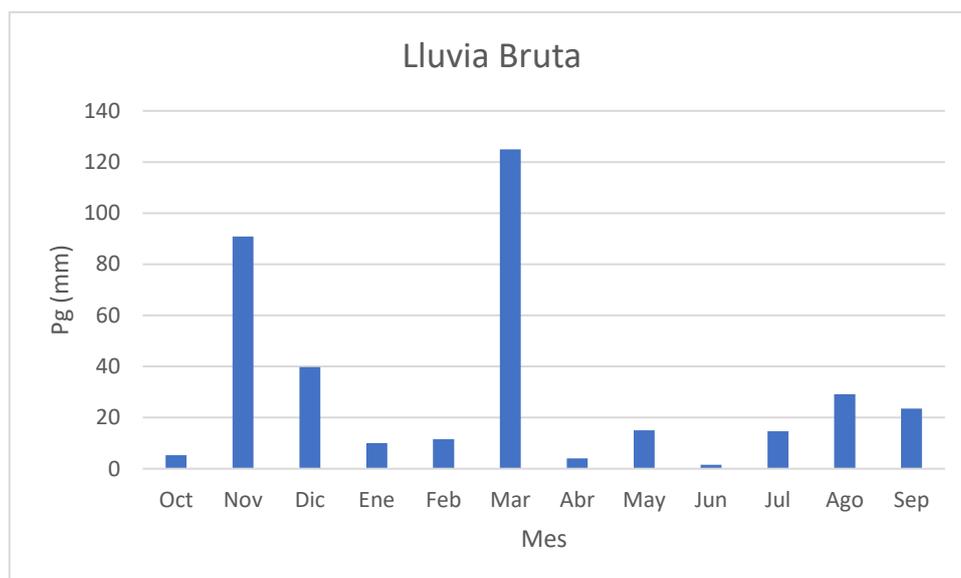


Figura 35.- Lluvia bruta en el año hidrológico 2014-2015

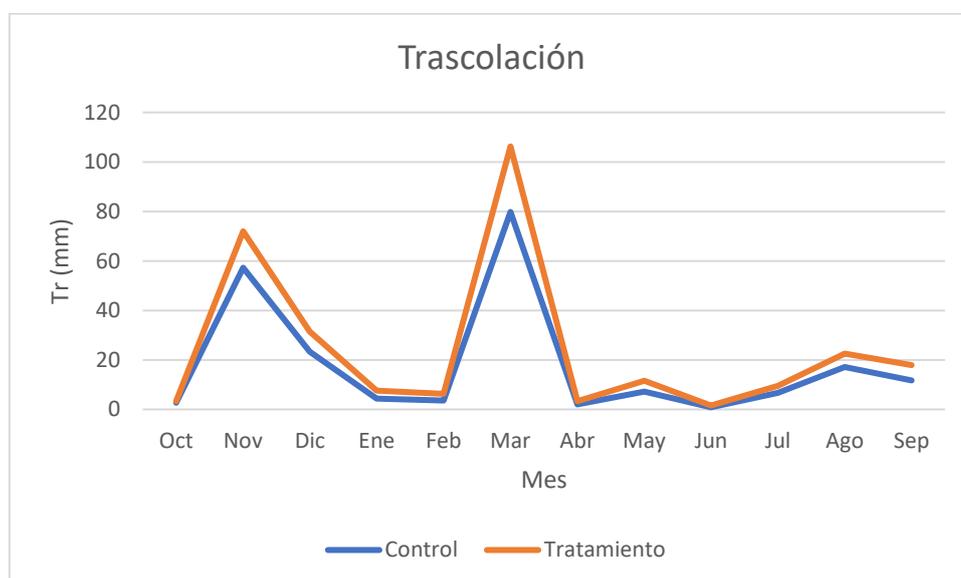


Figura 36.- Trascolación en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

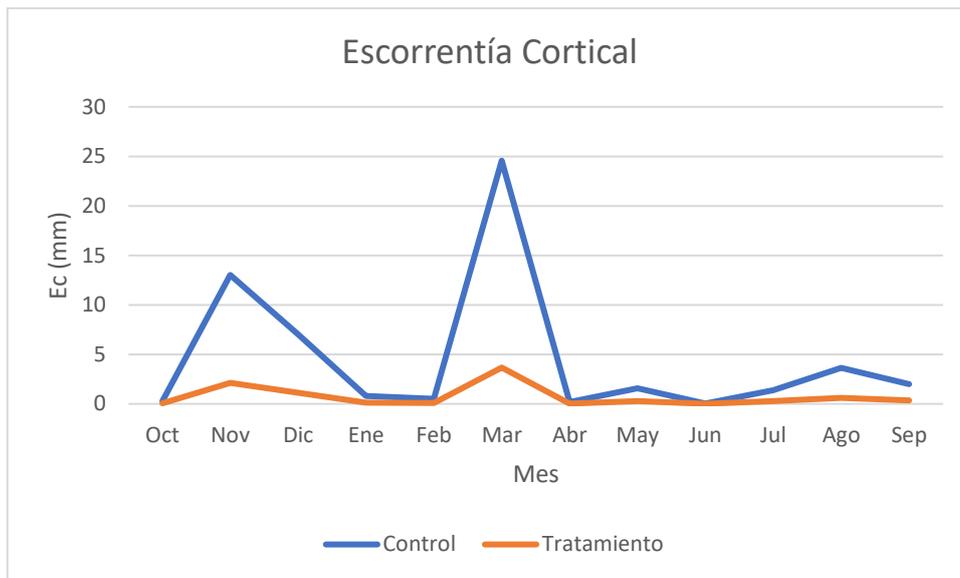


Figura 37.- Escorrentía cortical en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

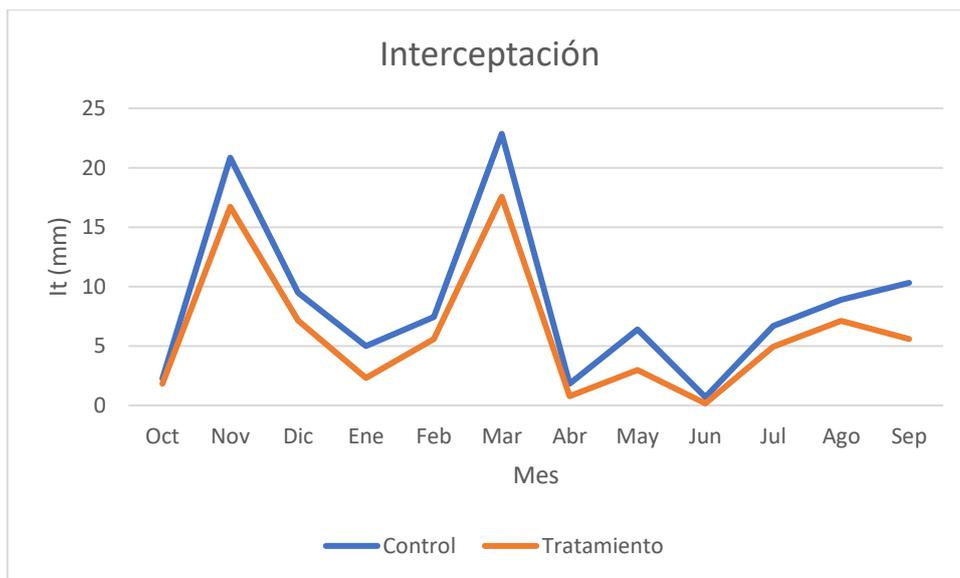


Figura 38.- Intercepción en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

### REDISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN NETA: REPOSICIÓN DE AGUA DEL SUELO, DRENAJE Y ESCORRENTÍA

Como se observa en la *Tabla 5*, *Figura 39*, *Figura 40* y *Figura 41* la reposición de agua del suelo, drenaje y escorrentía siempre fue mayor en el tratamiento que en el control con valores acumulados a lo largo de todo el periodo de estudio de 193, 293 y 1.32 mm para **C** y de 252, 318 y 1.93 mm para **T** respectivamente, lo que se traduce a un aumento de 30.7% para la reposición de agua del suelo, 8.5% para el drenaje y 46.2% para la escorrentía aplicando el tratamiento con respecto al control. Se observa que la mayor diferencia es en la escorrentía, pero esta variable representa menos del 1% de la lluvia bruta por lo que esta diferencia no es representativa.

La tendencia temporal para estas variables se mantiene a lo largo del periodo de estudio, presentando un patrón más estático con respuestas más marcadas en los meses con mayor precipitación.

El análisis de ANCOVA indica que la diferencia de ninguna de estas variables entre C y T fue significativa.

Tabla 5.- Año hidrológico, lluvia neta, reposición de agua del suelo, drenaje y escorrentía (valores acompañados de letras diferentes en C y T indican que existe una diferencia significativa; valores acompañados con letras iguales en C y T indican que no existe una diferencia significativa)

Año hidrológico	Lluvia neta (mm)		Reposición de agua del suelo (mm)		Drenaje (mm)		Escorrentía (mm)	
	C	T	C	T	C	T	C	T
13-14	114	125	44 <sup>a</sup>	55 <sup>a</sup>	32 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>	0.04 <sup>a</sup>	0.05 <sup>a</sup>
14-15	272	302	91 <sup>a</sup>	126 <sup>a</sup>	153 <sup>a</sup>	169 <sup>a</sup>	1.05 <sup>a</sup>	1.55 <sup>a</sup>
15-16	169	207	58	71	108	118	0.24	0.33
<b>Acumulado</b>	554	634	193 <sup>a</sup>	252 <sup>a</sup>	293 <sup>a</sup>	318 <sup>a</sup>	1.32 <sup>a</sup>	1.93 <sup>a</sup>
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (años 13-14, 14-15, 15-16) (%)</b>	14.5		30.7		8.5		46.2	
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (años 13-14) (%)</b>	9.8		25.8		-4.4		28.2	
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (años 14-15) (%)</b>	11.3		38.2		10.5		48.3	

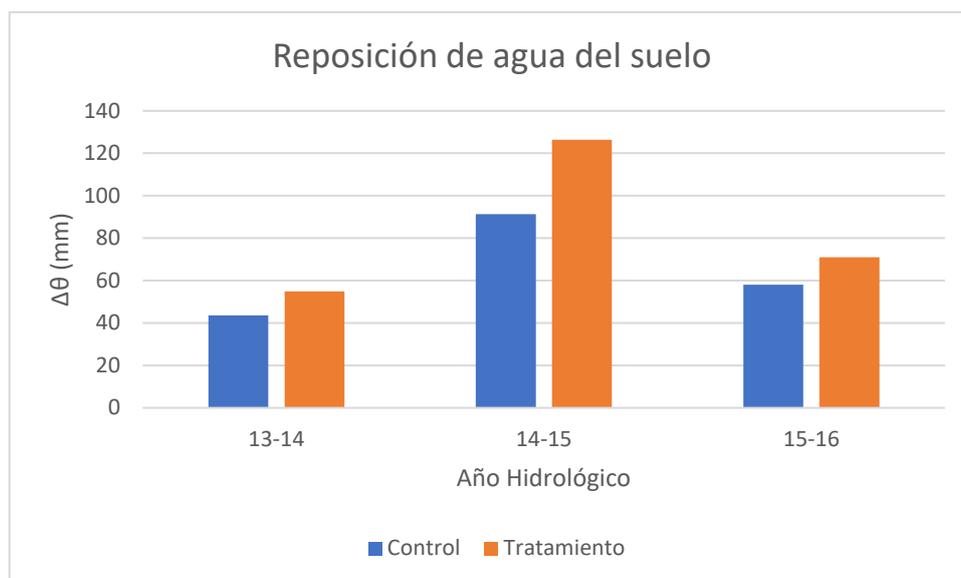


Figura 39.- Reposición de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

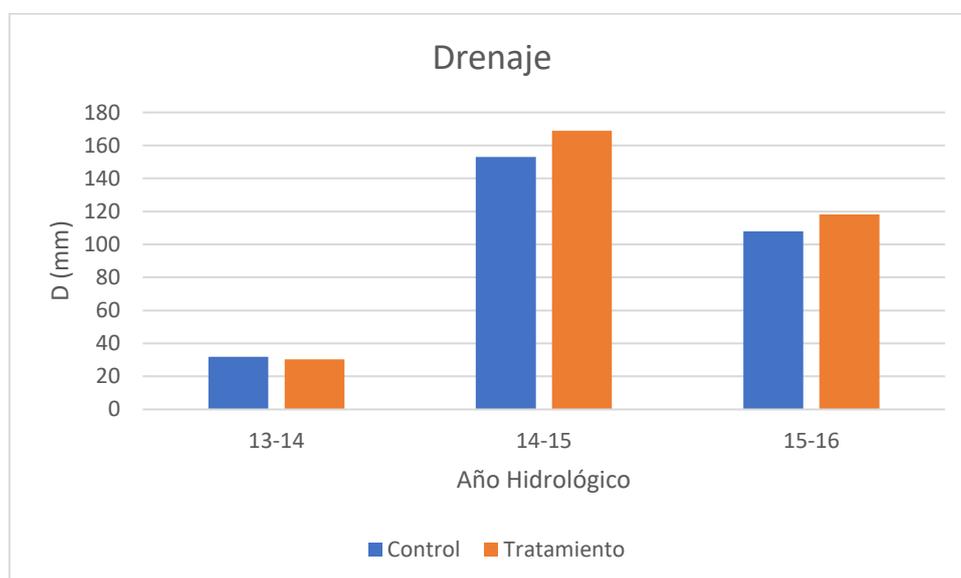


Figura 40.- Drenaje en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

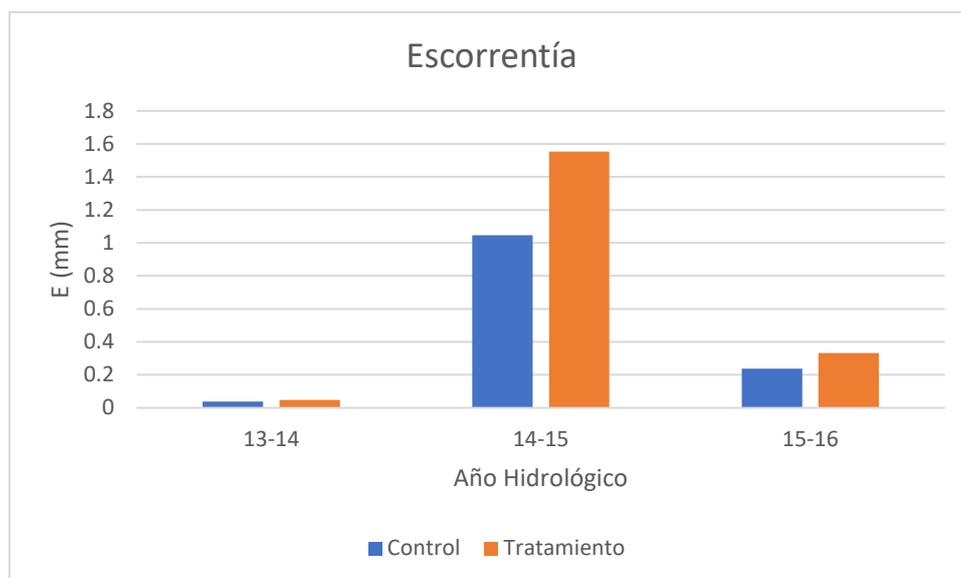


Figura 41.- Escorrentía en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

Para el año **2013-2014** la reposición de agua del suelo, drenaje y escorrentía se registró un valor de 44, 32 y 0.04 mm para **C** y 55, 30 y 0.05 mm para **T** respectivamente. Lo que indica un aumento de 25.8% y 28.1% en la reposición de agua del suelo y escorrentía, mientras que se encontró una disminución de 4.4% en el drenaje (*Tabla 5*).

Se observa en la *Figura 43* que el mes de marzo el valor de la reposición de agua del suelo es más alto en el control que en el tratamiento. Es preciso indicar que el contenido de humedad del suelo siempre fue superior en T respecto de C. Ahora bien, para un contenido más alto de humedad del suelo (meses de invierno) y una determinada cantidad de agua infiltrada, el alcance del punto de capacidad de campo se producirá antes en un suelo con mayor humedad antecedente y por tanto el volumen de agua colocado como  $\Delta\theta$  es menor. En el caso de los meses de junio y julio, con menor humedad antecedente en ambas parcelas, se observó que los valores de  $\Delta\theta$  del tratamiento son mayores que los de control ya que apenas hay drenaje y toda la precipitación neta ( $P_n$ ) es colocada en la recarga de la humedad del suelo.

En este sentido, se observó en la *Figura 43* y *Figura 44* que la reposición de agua del suelo y el drenaje siguen un patrón distinto dependiendo que si se viene del otoño (control mayor que el tratamiento) o de la primavera (tratamiento mayor que el control). En el control el componente dominante de la evapotranspiración es la transpiración. La evaporación del suelo siempre va a ser mayor en el tratamiento que en el control ya que la radiación va a llegar con más intensidad al suelo, pero la transpiración es mucho menor debido al menor número de árboles que usan el agua del suelo. Por lo que en verano la evaporación del suelo llega a ser un componente importante y se observa que la cantidad de agua del suelo está condicionada por la época del año.

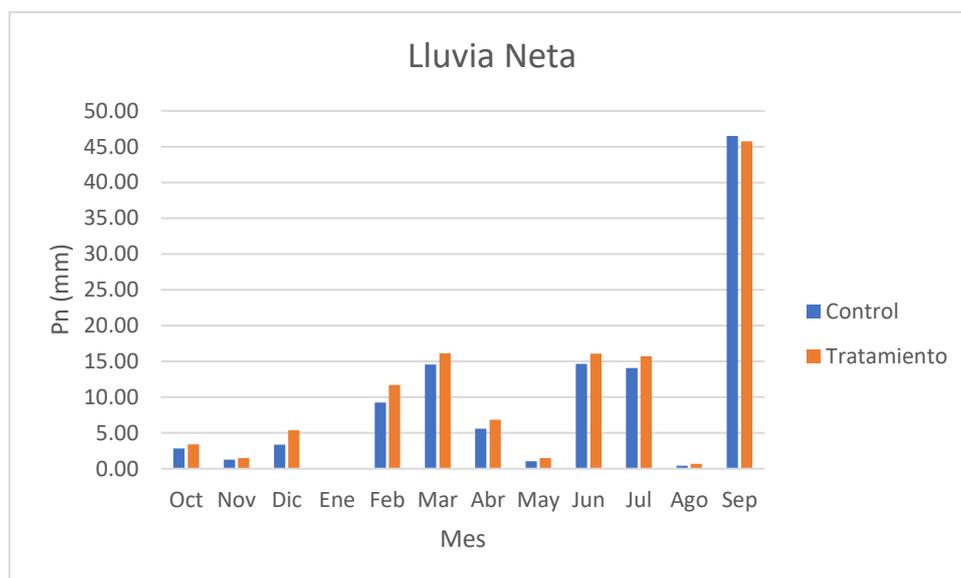


Figura 42.- Lluvia neta en el año hidrológico 2013-2014

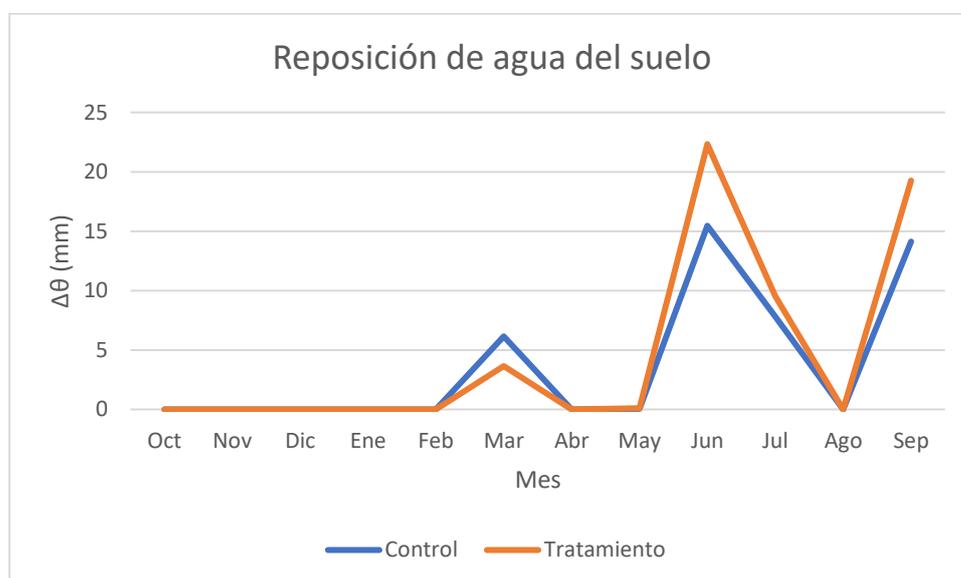


Figura 43.- Reposición de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

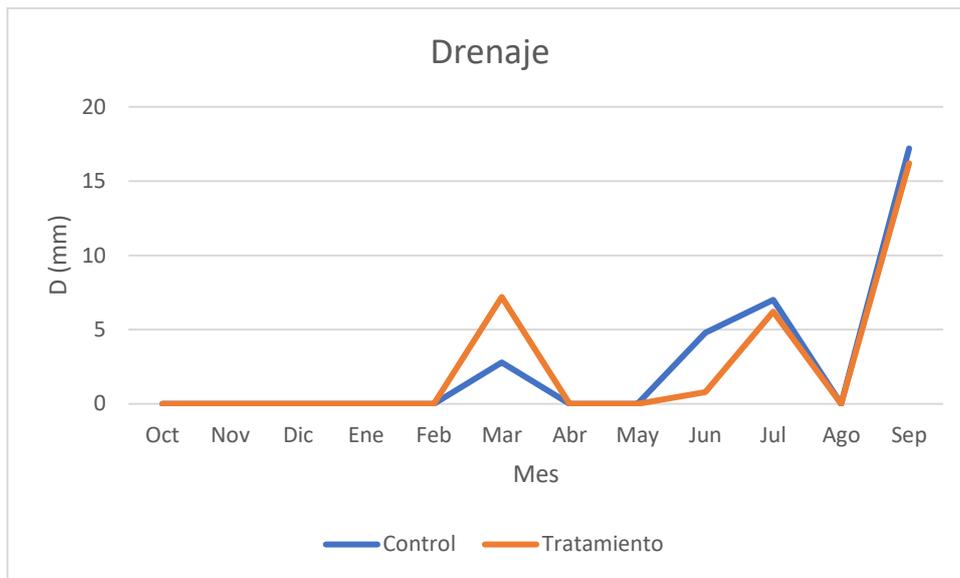


Figura 44.-Drenaje en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014



Figura 45.-Escorrentía en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

En el año **2014-2015** la reposición de agua del suelo, drenaje y escorrentía se registró un valor de 91, 153 y 1.05 mm para **C** y 126, 169 y 1.55 mm para **T** respectivamente. Lo que indica un aumento de 38.2%, 10.5% y 48.3% respectivamente (*Tabla 5*).

Se observa en la *Figura 47*, *Figura 48* y *Figura 49* que los valores en tratamiento son siempre mayores que en el control, lo que diría que estas son las condiciones normales de la parcela. También se observa que la recarga de agua del suelo, drenaje y escorrentía está relacionados con la precipitación neta (*Figura 46*). Al principio del año hidrológico se encuentra que existe una gran recarga de agua del suelo debido a que las condiciones iniciales son bajas al ser el año hidrológico 2013-2014 un año seco.

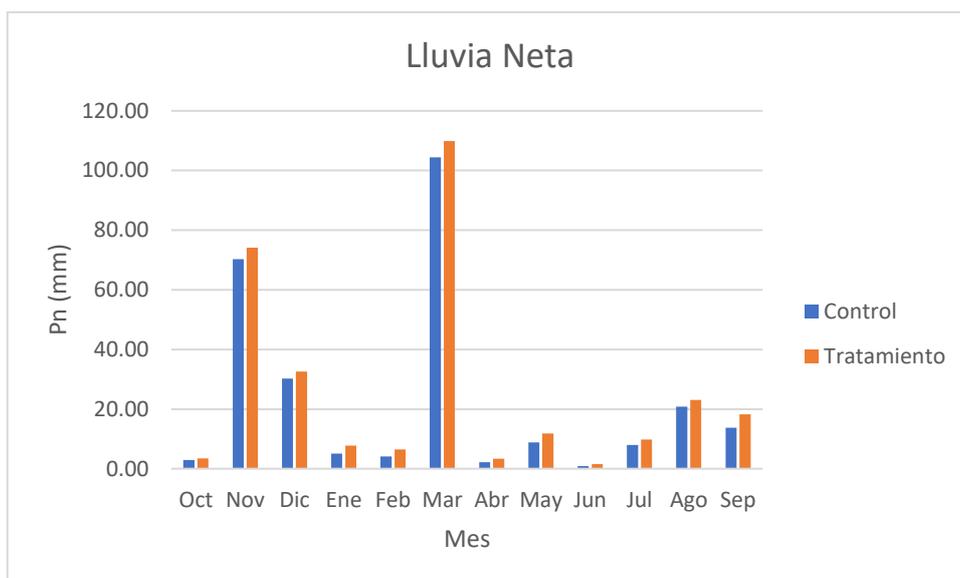


Figura 46.- Lluvia neta en el año hidrológico 2014-2015

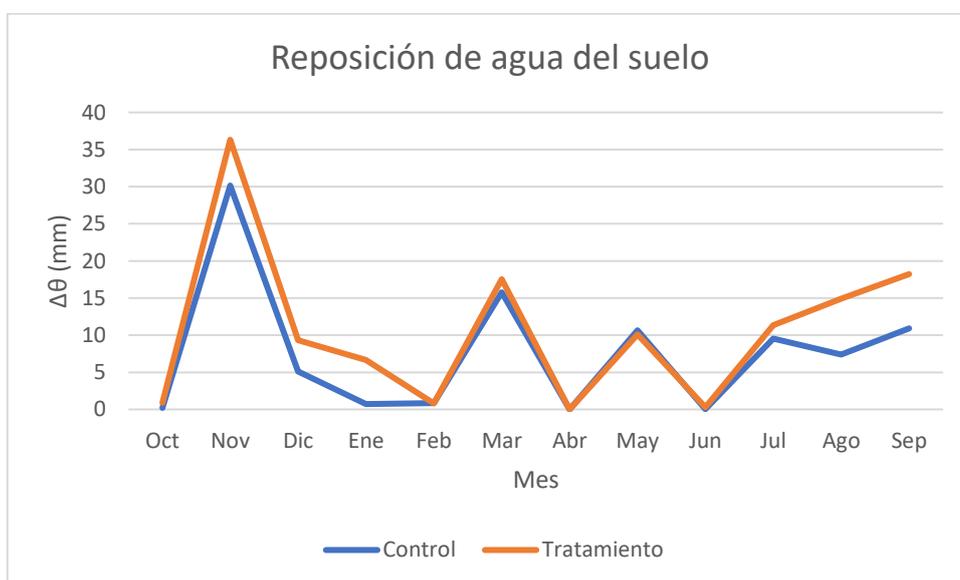


Figura 47.- Reposición de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

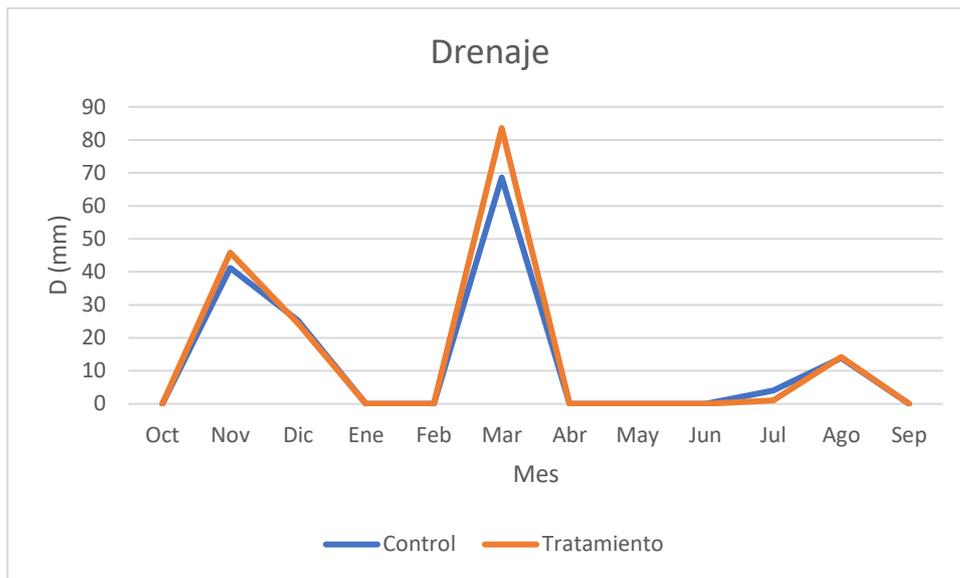


Figura 48.-Drenaje de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

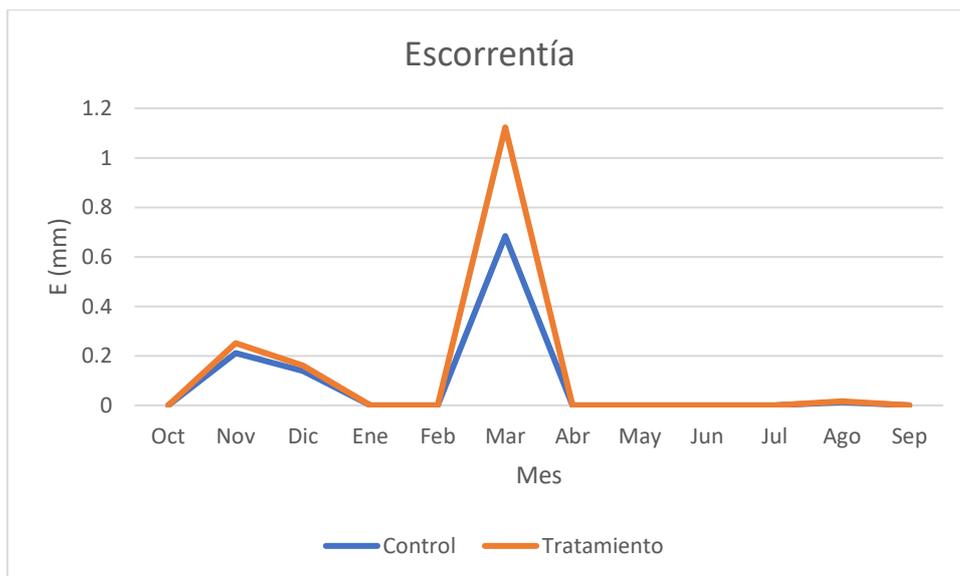


Figura 49.- Escorrentía de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

### TRANSPIRACIÓN, EVAPORACIÓN DEL SUELO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

Con base en los datos analizados y expuestos en la *Tabla 6* y *Figura 50* se pudo comprobar que la transpiración año a año fue mayor en la parcela de control **C** con respecto a la parcela de tratamiento **T**, obteniendo un valor acumulado de 186 mm para **C** y 94 mm para **T**, lo que significa que la transpiración disminuyó en un 49.6% aplicando el tratamiento.

Por el contrario como se observa en la *Tabla 6*, *Figura 51* y *Figura 52*, la evaporación del suelo y evapotranspiración fue siempre mayor en **T** que en **C**, registrando un acumulado total en **C** de 194 y 380 mm y en **T** de 336 y 430 mm respectivamente, lo que se traduce en que estos componentes del ciclo hidrológico, aplicando el tratamiento, aumentaron en 73.3 % y 13.1% con respecto al control. Es preciso indicar, que, si bien los datos de transpiración han sido validados

entre el modelo y lo medido experimentalmente en la parcela (González-Sanchis et al., 2019), no ocurre lo mismo con los datos de evaporación del suelo, y puede pensarse que el modelo está sobreestimando este componente, tal y como hacía con la transpiración antes de que se corrigiera.

Lo mencionado anteriormente se debe a que, al aplicar el tratamiento, la transpiración en los árboles va a bajar ya que por el clareo existió una remoción de los mismos. Al contrario de esto, la evaporación del suelo va a subir, pues la mayor radiación y menor sombreado en el tratamiento harán que la suma de estas dos variables se vea equilibrada entre control y tratamiento, pues la demanda de la atmósfera (DPV) es constante entre ambas parcelas. No se presenta una diferencia significativa según el análisis de ANCOVA en la evapotranspiración total, si bien, las anteriores dos componentes si presentaron una diferencia significativa en dicho análisis.

Tabla 6.- Año hidrológico, transpiración, evaporación del suelo y evapotranspiración (valores acompañados de letras diferentes en C y T indican que existe una diferencia significativa; valores acompañados con letras iguales en C y T indican que no existe una diferencia significativa)

Año hidrológico	Transpiración (mm)		Evaporación del suelo (mm)		Evapotranspiración (mm)	
	C	T	C	T	C	T
<b>*13-14</b>	45 <sup>a</sup>	21 <sup>b</sup>	69 <sup>a</sup>	119 <sup>b</sup>	114 <sup>a</sup>	140 <sup>a</sup>
<b>14-15</b>	80 <sup>a</sup>	37 <sup>b</sup>	93 <sup>a</sup>	162 <sup>b</sup>	173 <sup>a</sup>	199 <sup>a</sup>
<b>**15-16</b>	61	35	32	56	93	91
<b>Acumulado</b>	186 <sup>a</sup>	94 <sup>b</sup>	194 <sup>a</sup>	336 <sup>b</sup>	380 <sup>a</sup>	430 <sup>a</sup>
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (años 13-14, 14-15, 15-16) (%)</b>	-49.6		73.3		13.1	
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (años 13-14) (%)</b>	-52.4		71.5		22.7	
<b>Diferencia aplicando el tratamiento con respecto al control (años 14-15) (%)</b>	-41.9		76.5		-1.4	

\*= periodo del 30/10/2013 al 30/09/2014

\*\*=periodo del 30/10/2015 al 25/02/2016

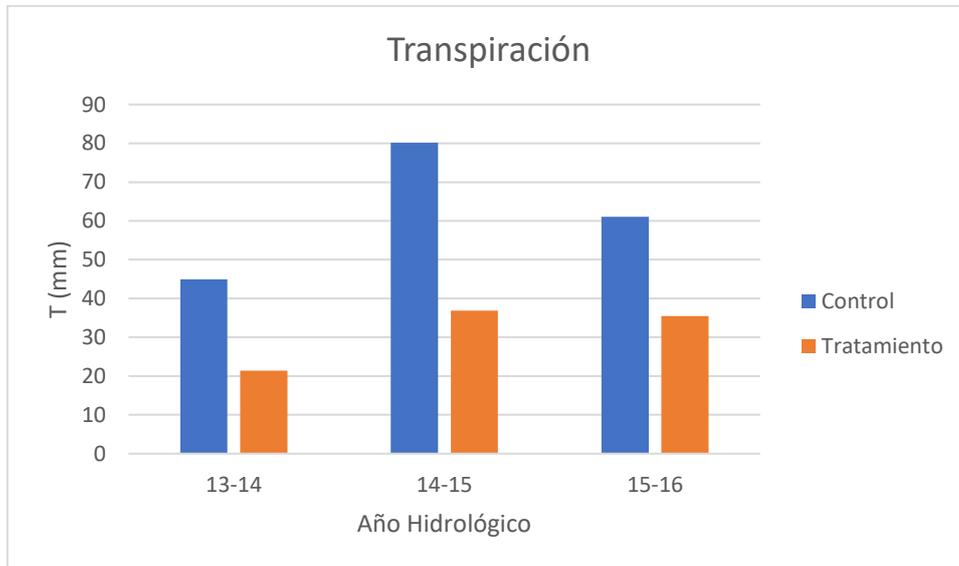


Figura 50.- Transpiración en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

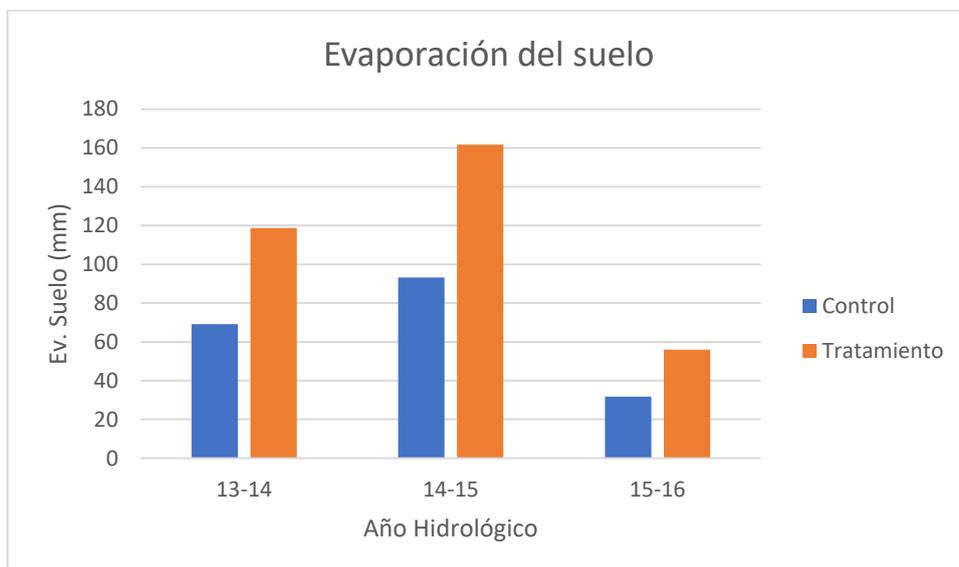


Figura 51.- Evaporación del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

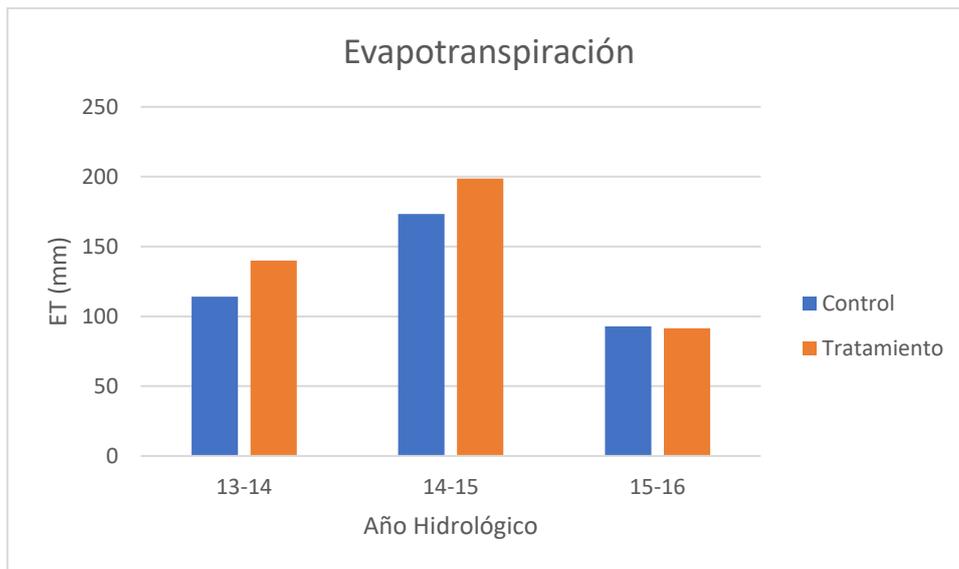


Figura 52.- Evapotranspiración del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento para cada año hidrológico

Para el año **2013-2014** la transpiración, evaporación del suelo y evapotranspiración se registraron valores de 45, 69 y 114 mm para **C** y 21, 119 y 140 mm para **T** respectivamente. Lo que indica una disminución de 49.6% en la transpiración, mientras que se encontró un aumento de 73.3% y 13.1% en la evaporación del suelo y evapotranspiración (*Tabla 6*).

Se observa en la *Figura 53*, *Figura 54* y *Figura 55* que la transpiración, evaporación del suelo y evapotranspiración siguen la misma tendencia produciéndose lo mismo descrito en el anterior párrafo. El análisis de ANCOVA nos muestra que existieron diferencias significativas en la transpiración y evaporación del suelo, mientras que en la evapotranspiración no existieron.

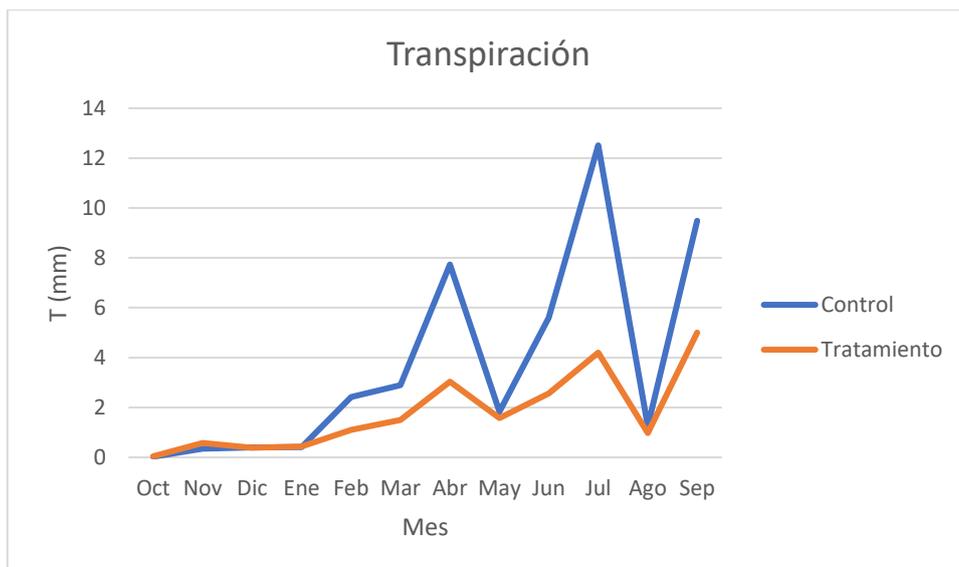


Figura 53.- Transpiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

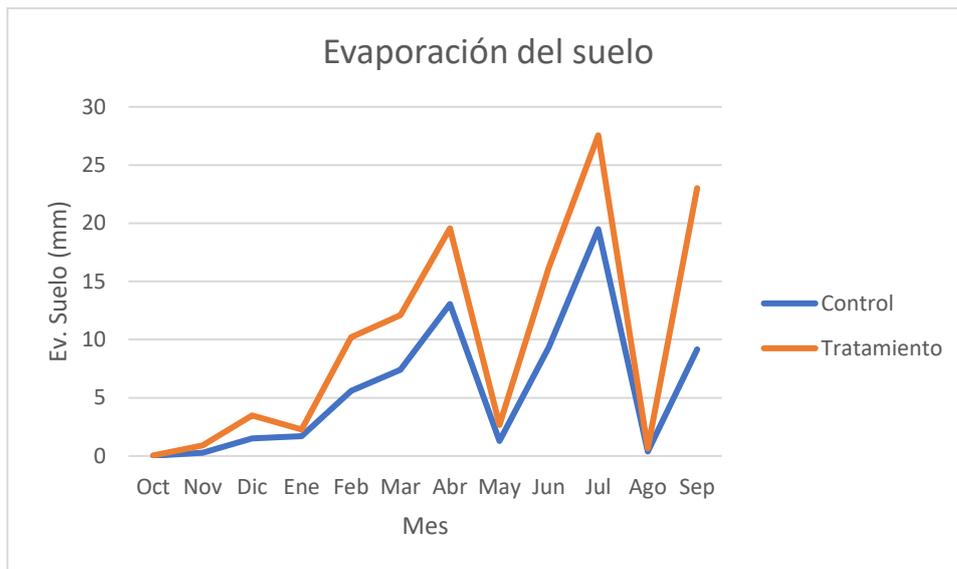


Figura 54.- Evaporación del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

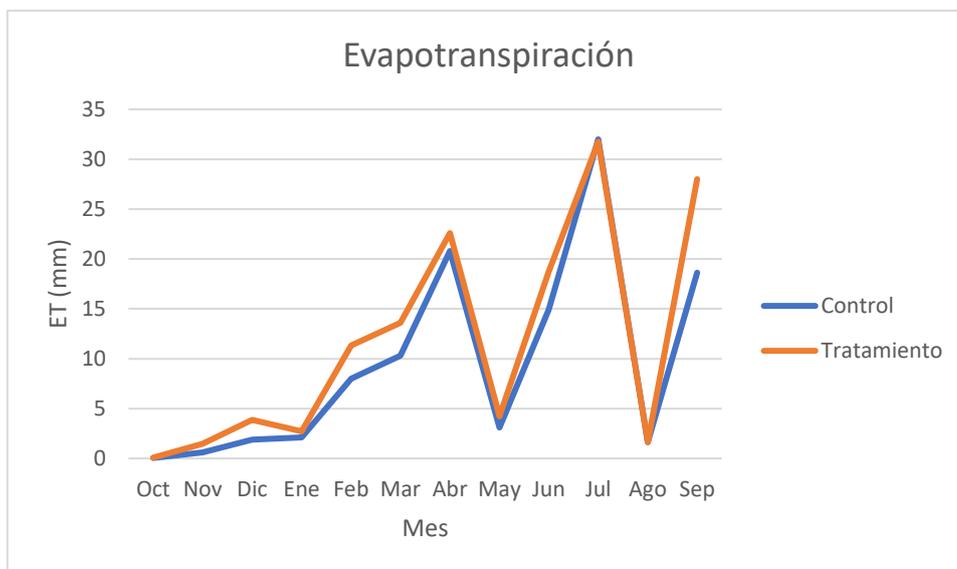


Figura 55.- Evapotranspiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2013-2014

Para el año **2014-2015** la transpiración, evaporación del suelo y evapotranspiración se registraron valores de 80, 93 y 17 mm para **C** y 37, 162 y 199 mm para **T** respectivamente. Lo que indica una disminución de 52.4% en la transpiración, mientras que se encontró un aumento de 71.5% y 22.7% en la evaporación del suelo y evapotranspiración (*Tabla 6*).

Se observa en la *Figura 56*, *Figura 57* y *Figura 58* que la transpiración, evaporación del suelo y evapotranspiración siguen la misma tendencia produciéndose lo mismo descrito anteriormente. El análisis de ANCOVA nos muestra que existieron diferencias significativas en la transpiración y evaporación del suelo, mientras que en la evapotranspiración no existieron.

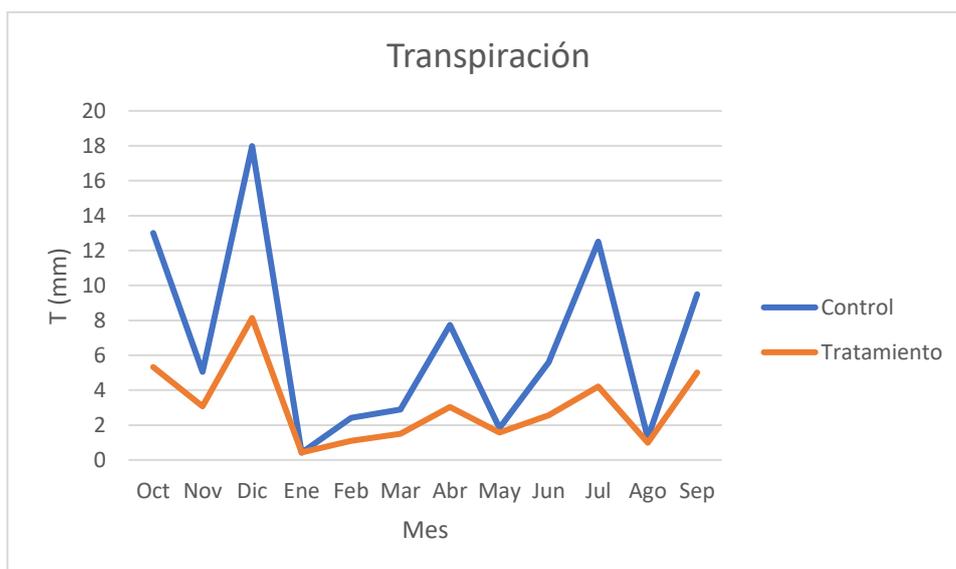


Figura 56.- Transpiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

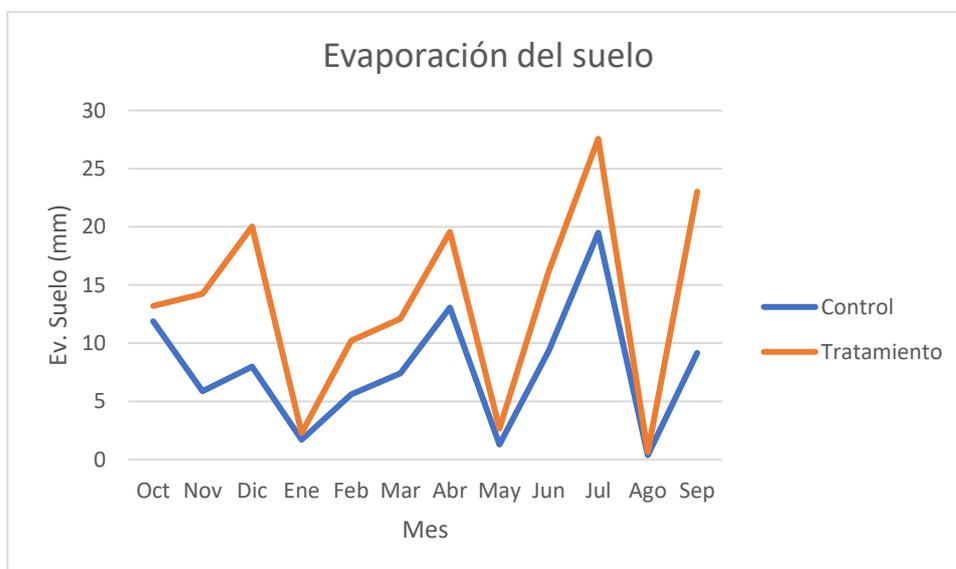


Figura 57.- Evaporación del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

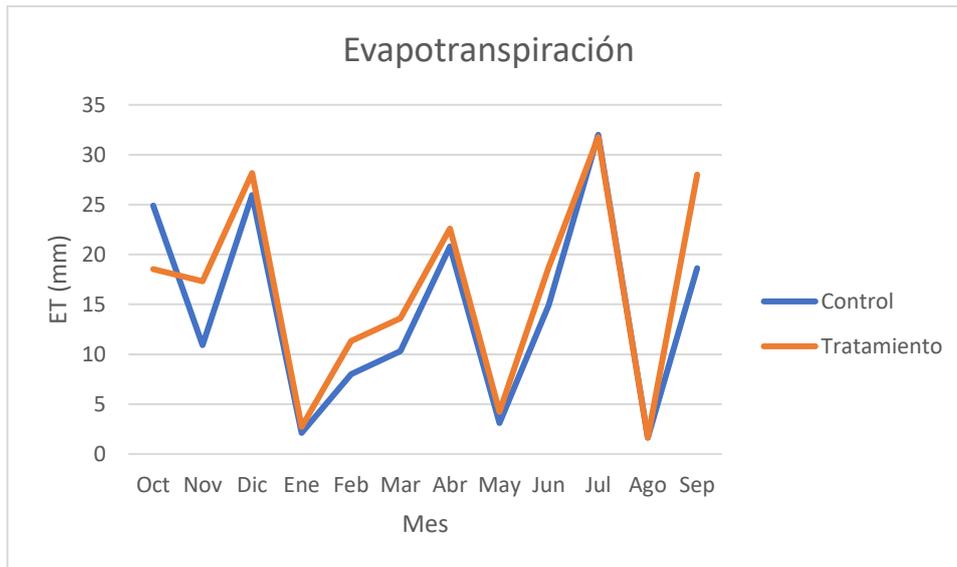


Figura 58.- Evapotranspiración de agua del suelo en las parcelas de Control y Tratamiento en el año hidrológico 2014-2015

#### BALANCE DEL CICLO HIDROLÓGICO

El balance del ciclo hidrológico no fue posible realizarlo ya que algunas variables se han computado experimentalmente y otras aplicando modelos, concretamente la evapotranspiración y transpiración. La única variable que no se ha medido experimentalmente es la evaporación del suelo y por tanto no es posible validar los resultados aquí presentados. En el caso de la transpiración, se compararon las medidas computadas experimentales de la transpiración con las modeladas resultando ser muy similares tras ciertos ajustes en el modelo. Es factible que, la evaporación del suelo pueda superar la realidad. En otras parcelas en las que se han aplicado similares tratamientos, se tiene que la evaporación del suelo es un 28% de la ET en el control y un 40% en el tratamiento. Siendo la evaporación del suelo una variable fundamental que junto con la transpiración componen la evapotranspiración, este aspecto debe abordarse ineludiblemente.

Se intentó cerrar el ciclo hidrológico utilizando las variables experimentales y modeladas, pero resultó el error negativo y de gran magnitud; esto no se puede dar pues los datos experimentales demuestran que hay algo de escorrentía y que no toda la precipitación se evapora.

## CAPÍTULO 5:

# CONCLUSIONES

La precipitación bruta varía año tras año registrándose en el periodo de estudio uno de los años más secos registrados históricamente desde 1870, lo que indica una gran variabilidad intranual. El patrón de las lluvias muestra que no existe un periodo húmedo definido en el sitio de estudio, mostrando, meses secos tanto en periodo de invierno como de verano, otoño y primavera para el periodo de estudio. Lo mismo que puede causar un decaimiento, mortalidad e invasión de plagas para el *Pinus halepensis*.

En cuanto a la partición de la lluvia, tanto en el acumulado total como el año hidrológico 2014-2015, se observó que la trascolación aplicando el tratamiento tiende a aumentar, mientras que la escorrentía cortical e interceptación tiende a disminuir, presentando diferencias significativas entre el control y tratamiento. El volumen de escorrentía cortical se vio afectado negativamente al aplicar el tratamiento, lo que puede sugerir evaluaciones opuestas según los diferentes objetivos que se persiguen con la gestión forestal (hidrológicos, ecohidrológicos, etc.). Por otra parte, el año seco presentó una menor diferencia entre control y tratamiento con respecto a los demás años en la trascolación e interceptación, igualmente presentando diferencias significativas de estas dos variables aplicando el tratamiento, mientras que en la escorrentía cortical se mantuvo aproximadamente la misma diferencia por lo que en el año mencionado la interceptación no presenta diferencias significativas entre el control y tratamiento. También se observó que estas variables en control y tratamiento siguen la misma tendencia que la lluvia bruta, teniendo la escorrentía cortical una diferencia más marcada entre C y T cuando existen las mayores precipitaciones en el año hidrológico.

En la redistribución de la lluvia neta la reposición de agua del suelo, drenaje y escorrentía se encontró que en todos los años hidrológicos estudiados la tendencia es a aumentar en el tratamiento con respecto al control, con excepción del año hidrológico 2013-2014 en donde el drenaje fue mayor en el control que en el tratamiento, pero por una diferencia insignificante por lo que se podría considerar que los valores son iguales, es decir muy bajos. En el año hidrológico 2013-2014 se producen las menores diferencias en porcentajes aplicando el tratamiento. La variable que más diferencia muestra entre el control y tratamiento es la escorrentía, pero como es un valor no representativo en comparación la lluvia bruta, no se puede decir que el tratamiento la aumente. El análisis indicó que no existen diferencias significativas entre control y tratamiento de ningún componente de la redistribución de la lluvia neta, algo que puede ser contradictorio ya que la trascolación y escorrentía cortical si muestran una diferencia significativa. Esto se puede deber a que el sitio de estudio tenga una gran tasa de evapotranspiración que debería ser comparada con datos experimentales. Así mismo, al no existir una diferencia significativa en la escorrentía podemos decir que el papel de bosque protector en el control de la erosión del suelo no se modificó por el tratamiento. Así mismo la reposición de agua del suelo se muestra con diferentes patrones dependiendo de la época.

La transpiración, evaporación del suelo y evapotranspiración fueron estimadas a base del modelo TETIS-VEG por lo que difiere del resto de datos que fueron obtenidos experimentalmente. Así mismo se realizó el análisis de los datos en el intervalo de tiempo que

se contaba con los mismos (oct 2013-feb-2016) obteniendo diferencias significativas para la transpiración y evaporación del suelo, mas no para la evapotranspiración, representando este componente el 60% de la precipitación neta para el control y tratamiento. Se observó que las diferencias en transpiración (baja con respecto al control) y evaporación del suelo (sube con respecto al control), tienden a compensarse al computar la ET de ambas parcelas. Se observa también que los porcentajes de aumento y disminución se mantiene constantes a lo largo de los 3 años sin distinguir si se trata de un año seco o años con mayores precipitaciones. Para la realización del balance se deberían contar también con datos experimentales de estas variables para así mejorar el error.

Una futura línea de investigación relacionada con el presente trabajo se debería centrar en como el tratamiento varía a lo largo de los años a mediano y largo plazo, así como también las distintas variables ecohidrológicas varían con el mismo. Se debería complementar con más años hidrológicos para poder cuantificar el efecto del tratamiento monitoreando y midiendo experimentalmente las mismas.

## CAPÍTULO 6:

## REFERENCIAS

- Bartczak, A., Giergiczny, M., Bredahl, J., Mavsar, R., Mantymaa, E., Ovaskainen, V., . . . Wunder, S. (2014). *The Provision of Forest Ecosystem Services*. Copenhagen: University Of Copenhagen.
- Belmonte, F., & Romero, M. (1999). Balance hídrico y distribución espacial de la trascolación bajo cobertura de pino: influencia de la dirección del viento y la pendiente de la ladera. *Lurralde inves. esp*, 22(1697-3070), 339-350.
- CAMPBELL. (2018a). AM16/32B. *When measurements matter*. from [www.campbellsci.es/am16-32b](http://www.campbellsci.es/am16-32b)
- CAMPBELL. (2018b). CR1000 Measurement and Control Datalogger. *CAMPBELL SCIENTIFIC*. 2018, from <https://www.campbellsci.es/cr1000>
- CAMPBELL. (2018c). SDM-IO16. *When measurement matter*. from [www.campbellsci.es/sdm-io16](http://www.campbellsci.es/sdm-io16)
- Campos, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (E. u. Potosina Ed. Tercera ed.). San Luis Potosí-México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí-Facultad de Ingeniería
- Castro, E., Casado, M., Costa, M., Escribano, R., García, M., Génova, M., . . . Sainz, H. (2001). *Los bosques ibéricos: Una interpretación geobotánica* (Planeta Ed. Vol. 2). España.
- Colomé, E., González, E., de\_Vicente, J., & Navarro, F. (2018). Plan de acción territorial forestal de la Comunitat Valenciana: Generalitat Valenciana.
- del\_Campo, A., González-Sanchis, M., Lidón, A., Ceacero, C., & García-Prats, A. (2018). Rainfall partitioning after thinning in two low-biomass semiarid forests: Impact of meteorological variables and forest structure on the effectiveness of water-oriented treatments. *Journal of Hydrology*, 565, 74-86.
- del\_Campo, A., González-Sanchis, M., Lidón, A., García-Prats, A., Lull, C., Bautista, . . . Francés, F. (2017). *Ecosystem Services of Headwater Catchments (Ecohydrological-Based Forest Management in Semi-arid Climate)* (J. Křeček, M. Haigh, T. Hofer, E. Kubin & C. Promper Eds.).
- del\_Campo, A., González-Sanchis, M., Molina, A., García-Prats, A., Ceacero, C., & Bautitsa, I. (2019). Impacts of silvicultural treatments on the soil water distribution of net rainfall in two low-biomass semiarid forest. *Forest Ecology & Management*, En revisión.
- FAO. (2018). Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible (GFS). *Planificación de la gestión forestal*. <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/forest-management-planning/basic-knowledge/es/>
- García-Saúco, A. (2014). Pino carrasco, Pinus halepensis. *Un blog de montaña, escalada y senderismo hecho por pels desde Alicante*. from <https://www.panoramicas360.net/guiando-por-el-p-r-cv-29-xorret-de-cati-cumbre-del-cid/01rabosa-cid/>
- García, A., del\_Campo, A., & Gonzales, M. (2018). In aqua scribere. O de la gestión forestal de base ecohidrológica en bosques semiáridos. *iagua*. Retrieved 26/09, 2018, from <https://www.iagua.es/blogs/alberto-garcia-prats/in-aqua-scribere-o-gestion-forestal-base-ecohidrologica-bosques>
- González-Sanchis, M., Ruiz-Pérez, G., Campo, A. d., García-Prats, A., Francés, F., & Lull, C. (2019). Managing low productive forest at catchment scale: Considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility. *Journal of Environmental Management*, 231, 653-665.

- González, F., López, M., & Minaya, M. (1993). *Intercepción, trascolación y escorrentía cortical en masas de eucalyptus globulus labill y Pinus pinea L. del sur de la provincia de Huelva*. Paper presented at the CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL, Lourinzán.
- ICT. (2018). Enabling better global research outcomes in soil, plant & environmental monitoring. 2018, from <http://www.ictinternational.com/products/ec-5/decagon-ec-5-moisture/>
- MAASP. Componentes del ciclo hidrológico. Distribución global. Retrieved 14 de septiembre 2018, from <http://tinchot.ferozo.com/hidricos/componentes-del-ciclo-hidrologico-distribucion-global/>
- Maestre, F., & Cortina, J. (2004). Are Pinus halepensis plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *Forest Ecology and Management* 198(1-3), 303-317.
- OMEGA. (2018). Miniature Voltage Output Pressure Sensors Fully Temperature Compensated. *OMEGA a spectris company*. from <https://au.omega.com/pptst/PX40.html>
- Pallardy, S. (2008). *Physiology of Woody Plants*: ELSEVIER.
- PRONAMIC. (2018). Rain and precipitation gauges. from <http://pronamic.com/products>
- Santa-Regina, I., Gallardo, J. F., San Miguel, C., & Moyano, A. (1989). Intercepción, pluviolavado y escorrentía cortical en una plantación de Pinus sylvestris de la Cuenca de Candelario (centro-oeste de España). *Bosque*, 10, 19-27.
- Smith, D. M., Larson, B. C., Kelty, M. J., & Ashton, P. M. S. (1997). *The practice of silviculture: Applied Forest Ecology* (Ninth ed.). United States of America.
- Solinst. (2018). 428 BioBailer. *Muestreadores de agua subterránea*. from [www.solinst.com/espanol/productos/ds/428-bailer-desechable.php](http://www.solinst.com/espanol/productos/ds/428-bailer-desechable.php)
- UPV. (2018). Hydrosil-Silwamed Hydrological characterisation of forest structures at plot scale for an adaptive management. Retrieved 20/01/2019, 2018, from <http://hydrosil.webs.upv.es/>
- Urios, J. (2004). *Cuadernos de geografía: Análisis del régimen de incendios forestales en los montes de portaceli durante el siglo XX (Serra, Valencia)* (Vol. 76). Valencia: Universitat de Valencia.
- USGS. (2018). *Water Science Science for a changing world*. Retrieved 26/09, 2018, from <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#transpiration>
- WEATHERSHOP. (2018). WEATHERSHOP. from [https://weathershop.glopal.com/es-ES/p-135/descatalogado-davis-7852-rain-coleccionista.html?utm\\_campaign=pr\\_r&utm\\_source=https://www.weathershop.co.uk/shop&utm\\_medium=wi\\_osf&utm\\_content=en\\_GB#wi-descriptionModal](https://weathershop.glopal.com/es-ES/p-135/descatalogado-davis-7852-rain-coleccionista.html?utm_campaign=pr_r&utm_source=https://www.weathershop.co.uk/shop&utm_medium=wi_osf&utm_content=en_GB#wi-descriptionModal)
- Whelan, M. J., & Anderson, J. M. (1996). Modelling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (Picea abies) plantation at the plot scale *Journal of Hydrology*, 186(1-4), 335-354.
- Zalewski, M. (2002). Ecohydrology-the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47, 823-832.