



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-314

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Influencia de las técnicas de reforestación en la supervivencia de arbolado urbano: la experiencia del proyecto Quick Urban Forestation

PASCUAL ARRANZ, A.¹, GÓMEZ CORNEJO, R.², DOMÍNGUEZ LERENA, S.³ y RIVERA, R.⁴

¹ University of Eastern Finland, School of Forest Sciences, PO Box 111, 80101 Joensuu, Finland.

² Fundación CESEFOR (Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria).

³ SDL, Investigación y Divulgación del Medio Ambiente, S.L.

⁴ ICLAVES, S.L.

Resumen

El objetivo del estudio es demostrar, sobre un diseño experimental de 1.440 plantas repartidas en cinco especies mediterráneas, el incremento de la tasa de supervivencia mediante el uso de técnicas de restauración que no utilicen sistemas tradicionales de riego. Estas técnicas consistieron en el uso por separado y en combinación de retenedores y micorriza. El diseño experimental se inició en marzo de 2014 sobre una parcela de 13 hectáreas situada en la orilla del río Pisuerga a su paso por la ciudad de Valladolid. Se utilizó una red de sondas de humedad que hasta la fecha, han generado más de 35,000 observaciones, para medir la humedad edáfica y la tasa de supervivencia en campo se registró en siete ocasiones. Mediante el uso de modelos mixtos y un modelo de probabilidad de supervivencia, se ha demostrado la eficacia de los tratamientos a la hora de incrementar la supervivencia incluso en especies que presentan unas condiciones ecológicas no aptas para un entorno urbano de clima continental. La probabilidad de supervivencia así como la humedad edáfica variaron notablemente dentro del diseño experimental. Con este estudio hemos pretendido generar más información para la toma de decisiones en la creación de nuevas zonas verdes urbanas.

Palabras clave

Técnicas de restauración forestal, repoblaciones, bosques urbanos, micorrizas, sensorización forestal, retenedores de polímero.

1. Introducción

Las repoblaciones forestales de carácter protector han propiciado, durante el último siglo, una recuperación significativa de la cubierta forestal en los bosques españoles (MAESTRE y CORTINA, 2004). Durante este proceso, las técnicas de restauración forestal han jugado un papel decisivo para minimizar el impacto de los dos principales factores limitantes a la hora del establecimiento de especies forestales: la sequía (RUANO ET AL., 2009, SÁNCHEZ-SALGUERO ET AL., 2012) y el estrés hídrico (MARGOLIS Y BRAND, 1990). En este sentido, las técnicas de restauración forestal ayudan a mejorar la composición del terreno (RUTHROF y FONTAINE, 2013) e incrementan la disponibilidad del recurso hídrico en ambientes áridos. El resultado es el acondicionamiento de los requerimientos edáficos de especies que, de otra manera, no podrían desarrollarse en climas áridos y semi-áridos como son los entornos urbanos en las ciudades del Sur de Europa: rodeadas por zonas industriales o contaminadas o de suelos pobres y sin apenas vegetación (QUF, 2016). La transformación estos espacios urbanos degradados en zonas verdes requiere de grandes inversiones (preparación del terreno e instalación de infraestructuras de riego) en ausencia de técnicas que minimicen los insumos.

Existe una amplia diversidad de técnicas que ayudan a la restauración forestal: fertilización del suelo (LIU y LIANG, 2008), uso de materia orgánica (CARAVACA ET AL., 2003), micorrización (RINCÓN ET AL., 2007) o uso de retenedores de agua (YANG ET AL., 2014). Estos últimos permiten almacenar el agua en el entorno radical, regulando a su vez la oscilación térmica además de reducir el tiempo de infiltración lo que posibilita mejorar la adaptación de los brinzales en entornos áridos (CALLAGHAN ET AL., 1998, MAGHCHICHE ET AL., 2010). Del mismo modo, la micorrización de planta forestal tanto en

vivero como en campo ha sido una de las técnicas de restauración forestal más utilizadas para mejorar la productividad en vivero (OLIVEIRA ET AL., 2012) e incrementar la supervivencia de las plantas en entornos áridos (SOUSA ET AL., 2011). Es durante la fase de establecimiento cuando las técnicas de restauración contribuyen en mayor medida a asegurar la supervivencia del arbolado forestal. Por ello, es esencial ampliar la información disponible (condiciones edáficas, climatología y estado de las plantas) en esta primera fase de establecimiento.

La toma de datos con sondas mediante sensores remotos ha sido una metodología empleada con éxito en otros campos de investigación como la ingeniería agronómica y geológica (BOGENA ET AL., 2007). La continua evolución de estos sensores de precisión desde la pasada década (ADAMCHUCK ET AL., 2004) ha permitido a día de hoy, incrementar la precisión a la hora de estudiar la dinámica hidrológica en los suelos (SHENG ET AL., 2011) a escala de planta individual. Este avance permite estudiar la variabilidad espacial de mediciones (VERECKEN ET AL., 2008) y extraer información muy valiosa para la toma de decisiones en el manejo de plantaciones forestales especialmente para monitorizar las posibles necesidades hídricas así como adecuar los riegos en el tiempo. Esto es posible gracias al uso combinado de sensores y redes inalámbricas que, juntos, aumentan exponencialmente el número de observaciones (SINGH ET AL., 2014) sobre el mismo individuo respecto de la misma variable: una aplicación basada en el concepto “big data”

Nuestro estudio pretende aplicar esta novedosa metodología para analizar la influencia de las técnicas de repoblación forestal aplicadas en asegurar el éxito de una plantación localizada en un entorno árido urbano cuyo uso en el futuro sea el albergar un bosque urbano compuesto de especies forestales. La motivación de nuestro estudio, englobado dentro del proyecto europeo *Quick Urban Forestation* (QUF, más información sobre el proyecto en <http://www.quickurbanforest.eu/>), es la de recuperar zonas verdes y re-habilitar terrenos sin necesidad de acometer grandes infraestructuras de riego.

2. Objetivo

El principal objetivo del estudio es analizar la efectividad en un entorno árido y abandonado de tres técnicas que faciliten la restauración forestal (uso de retenedores, micorrización y uso combinado de ambos) a la hora de aumentar la supervivencia comparado con el tratamiento testigo (ningún tratamiento) a lo largo de los dos primeros años de una plantación en la que se han utilizado seis especies forestales.

3. Metodología

3.1 Diseño experimental

A finales del mes de marzo de 2014 se comenzó con las labores de plantación en una parcela de trece hectáreas situada en la orilla del río Pisuerga a su paso por la ciudad de Valladolid (Figura 1). El clima es Mediterráneo continentalizado caracterizado por inviernos fríos con mínimas por debajo de 5°C (heladas frecuentes hasta la primavera) y temperaturas medias en verano por encima de 22°C. La distribución de las precipitaciones (420 mm en total) es homogénea durante todo el año a excepción de los meses de julio y agosto. La zona de estudio, un suelo libre de obra y afectado por vertidos urbanos incontrolados, cumplía con los requerimientos de degradación y proximidad al entorno urbano. Se realizaron cuatro calicatas para analizar la composición edáfica dentro de la zona de estudio. En términos generales, los suelos son arenosos con un pH de 8.42 y excesiva concentración de nitrógeno (derivado del uso del terreno como escombrera). Las muestras recogidas, mostraron una variabilidad importante en cuanto a la composición del suelo determinada por el efecto acumulado de los áridos acumulados, proximidad a la ribera y variabilidad espacial en la distribución de los horizontes. Por este motivo, se estableció un diseño experimental pensado que permita identificar la variabilidad especial dentro de la parcela de estudio. El diseño consta de cuatro

parcelas de control, cada una dividida en cuatro sub-bloques, en donde se aplican los tratamientos (técnicas de restauración) sobre 1440 plantas en total:

- I. Testigo: Planta de una savia en contenedor
- II. Retenedor: Planta de una savia en contenedor y distribución en el hoyo de plantación de un retenedor de polímero.
- III. Micorrizas
- IV. Micorriza más retenedor: se utiliza planta inoculada y al hoyo de plantación se incorpora un retenedor de polímero

Se utilizó un compuesto de polímero absorbente como único tipo de retenedor mientras que la micorrización se determinó en base a la especie hospedante: i). *Pinus pinea* con *Pisolithus tinctorius*; ii) *Prunus dulcis*, *Juniperus thurifera* y *Acer campestre* con *Rhizophagus* y iii) *Quercus ilex* con *Pisolithus tinctorius* más *Scleroderma polyrhizum*.

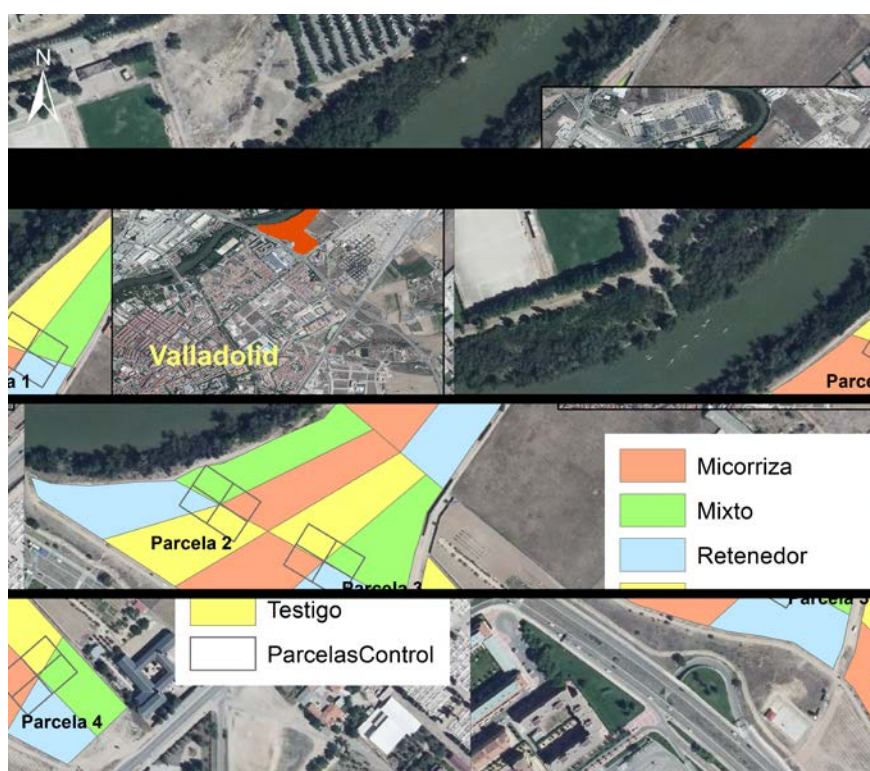


Figura 1. Plano de planta de la zona de estudio

3.2 Red de sensores: información y modelización

Junto con el establecimiento de las parcelas de control, se instaló una red de sensores conectada a fin de conocer información continua sobre el efecto de los tratamientos en el desarrollo radicular de las plantas. Para ello, se instalaron 64 sensores de humedad y temperatura. De las seis especies utilizadas se monitorizan con sensores dos: *Pinus pinea* y *Quercus ilex*. Se han medido ocho plantas por especie y tratamiento (dos plantas de cada especie y tratamiento por bloque). Para la recogida de la información se utilizan *dataloggers addit S4*, cada uno con seis sondas de humedad y temperatura de suelo, lo que hace un total de doce *dataloggers*. Las sondas eran de dos tipos: i) *Aquacheck*: es una sonda de capacitancia que mide el porcentaje volumétrico de agua en el suelo; y ii) *Soil Temperature*: mide en un rango de -10 to +60 Celsius con precisión de ± 1 Celsius. Los *dataloggers* se conectaron a un concentrador de comunicaciones que recoge y envía la información. Cada planta tiene cuatro sensores colocados en el entorno de la rizosfera: dos miden humedad a 20 y

40 cm. y dos miden la temperatura a 20 y 40 cm. de profundidad respectivamente. El sistema se configuró para que hubiera una lectura cada media hora. Los datos se vuelcan en bruto periódicamente desde la aplicación de recogida de datos y se procesan posteriormente en intervalos de horas y días. Además, se instaló una pequeña estación climatológica en el centro de la parcela para registrar los valores de temperatura, precipitación y viento de la misma forma e intervalo que los sensores edáficos.

Para el tratamiento de estas bases de datos jerarquizadas existen dos enfoques: los modelos de efectos fijos y los modelos de efectos aleatorios. Para nuestro estudio utilizamos una combinación de ambos enfoques, los modelos mixtos (BATES ET AL., 2015), para explicar el grado de humedad del suelo a 20 y a 40 cm de profundidad dado que proporcionan un entorno óptimo para responder a las cuestiones de un estudio con diseño experimental como nuestro estudio: modelizando simultáneamente el valor esperado de la respuesta y su variabilidad dentro de distintas escalas a raíz de la jerarquización de los datos (Individuo, Parcela de Control, Tratamiento, Especie). Los coeficientes se estiman para cada uno de los niveles del grupo de interés.

En nuestro estudio hemos utilizado dos modelos:

1. ME_1 : utilizamos el factor *Tratamiento* como fijo y tanto las interacciones *Tratamiento x Especie* como *Tratamiento x Parcela* más los componentes aleatorios *Individuo* y la variable de control *Mes* dentro de la parte aleatoria.
2. ME_2 : se incluye en la parte fija los factores *Tratamiento*, *Especie* y *Parcela*; dejando dentro de los efectos aleatorios los factores *Individuo* y variable de control *Mes*.

El objetivo de ME_2 es analizar la influencia de la composición del suelo en los resultados asumiendo como fijo el factor *Parcela* dada la alta variabilidad observada en las lecturas de humedad proporcionada por los sensores en distintos puntos del estudio experimental. El caso *Testigo* se utilizó como nivel de referencia en el ajuste del modelo a fin de que los coeficientes del modelo indicaran el grado de mejora (incremento porcentual), o no, de los tratamientos respecto al caso base.

3.3 Análisis de supervivencia: procesado de datos y modelización

Los análisis de supervivencia se basan en observar una serie de individuos de las diferentes especies y con diferentes tratamientos a lo largo del tiempo. El evento que se considera es el estado del individuo en cada momento de observación, que puede tener los valores: vivo o muerto. En siete ocasiones se ha registrado la tasa de supervivencia observada en las 1440 plantas que componen las parcelas de control: generalmente antes y después del periodo vegetativo; y antes y después del periodo probable de heladas. En este tipo de análisis hay dos factores relevantes, la no normalidad de las respuestas (solo puede tomar dos valores) y el hecho de que las observaciones pueden estar censuradas, es decir que hay individuos de los que observamos, para los que no se ha producido el evento en el momento de la observación, pero que se puede llegar a producir más adelante.

Nuestra variable de interés es el tiempo T que un individuo tarda en morir y en base a ello, es posible calcular la probabilidad de que el individuo sobreviva hasta un tiempo T :

$$F(t) = P(T \leq t), (t \geq 0) ; S(t) = 1 - F(t) = P(T > t).$$

Para ello modelaremos la función de riesgo, que para cada T es el ratio instantáneo de individuos que mueren en ese momento y que viene dado por la fórmula:

$$h(t) = \lim_{c \rightarrow 0} (P(t \leq T < t + c | T \geq t) / c)$$

Es muy sencillo cuantificar h en función de la función de probabilidad acumulada, F de la siguiente forma:

$$c \cdot h(t) = \Pr(t < T < t + c \mid T > t) = \Pr(t < T < t + c) [\Pr(T > t)]^{-1} = \frac{F(t+c) - F(t)}{1 - F(t)}$$

En el caso de que tengamos la función derivable $f(t) = dF(t)/dt$ resulta:

$$h(t) = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{F(t+c) - F(t)}{c} \cdot \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{S(t)}$$

Sabiendo que la derivada de $S(t) = 1 - F(t)$ es $-f(t)$ y aplicando integraciones llegamos a que la probabilidad de sobrevivir viene dada por la fórmula:

$$S(t) = \exp \left[- \int_0^t h(s) ds \right]$$

Por tanto nuestro interés se centra en obtener la función de riesgo, $h(t)$. Se eligió una función del tipo log-logística aunque, adicionalmente, se hizo también un análisis en base al modelo propuesto por COX (1972). En nuestro análisis estamos interesados en ver cómo cambia la función de riesgo en función de nuestros parámetros de interés, en particular la especie y el tratamiento (e, r). Podemos re-definir la función de riesgo como:

$$h(t; e, r, x) = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + c : T \geq t, e, r, x)}{c}$$

donde e es la especie, r el tratamiento y x otras variables de control.

En nuestro estudio cuantificaremos como varía el riesgo en función de la especie y del tratamiento. También haremos un análisis gráfico de la función de supervivencia en base al modelo no paramétrico de KAPLAN y MEIER (1958) por ser muy intuitivo. Para la computación estadística de estos modelos se utilizó R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006) y STATA v.13. (STATACORP, 2013) así como los paquete integrados “nlme” (PINHEIRO ET AL., 2013) y “ggplot2” (WICKHAM, 2009). La evaluación del ajuste se realizó en base a la significancia de los coeficientes (p valor < 0.05).

4. Resultados

4.1. Contenido de humedad

Utilizando como referencia el tratamiento *Testigo*, se comprueba que todos los tratamientos incrementan la humedad edáfica para una profundidad de 20 cm: el tratamiento *Micorriza* prácticamente dobla al tratamiento *Retenedor* y triplica al tratamiento *Mixto* (Tabla 1), siendo el único tratamiento significativo.

En el caso de 40 cm de profundidad, solo en el tratamiento mixto se observa una influencia negativa de los tratamientos respecto al *Testigo*. La diferencia entre los coeficientes del modelo se estrecha entre *Retenedor* y *Micorriza*. La medición del porcentaje de humedad del suelo a 20 y 40 cm mostró una variación espacial reseñable dado el diferente comportamiento del suelo entre las parcelas de control. En comparación la parcela 1 de referencia, el porcentaje de humedad es mayor para 20 cm mientras que los valores son inferiores y en especial, las parcelas 2 y 3 cuyos porcentajes de arena son más elevados. En total se analizaron 35.408 lecturas de humedad.

Tabla 1. Coeficientes de los modelos Hum20 y Hum40 y error standard de los mismos entre paréntesis (ambos en escala logarítmica) indicando el grado de significancia existentes mismos (* $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$)

Factores	Log(Hum20)		Log(Hum40)	
	ME ₁	ME ₂	ME ₁	ME ₂
Micorriza	0.098 (0.060*)	0.098 (0.048)	0.077 (0.079)	0.084 (0.063)
Retenedor	0.051 (0.071)	0.051 (0.048)	0.065 (0.114)	0.071 (0.063)
Mixto	0.027 (0.083)	0.027 (0.048)	-0.024 (0.126)	-0.018 (0.063)
Parcela 4	-	0.095 (0.048)	-	-0.283 (0.063)
Parcela 3	-	0.168 (0.048)	-	-0.099 (0.062)
Parcela 2	-	0.187 (0.048)	-	-0.083 (0.062)

La fácil integración de los datos climatológicos con los sensores permitió comprobar el efecto de los tratamientos en la laminación de la escorrentía generada tras un episodio de lluvia (Figura 2). Dada la elevada variabilidad observada en los análisis edáficos, se analizó por bloque y por tratamiento el incremento de la humedad edáfica desde el momento de la precipitación (registrada en la estación meteorológica) hasta 24 horas después. Se observó un pronunciado incremento de humedad a 20 cm en el caso del retenedor para los bloques más arenosos (Parcelas 2 y 3). En líneas generales, se observa como la humedad disminuye rápidamente en el caso del tratamiento *Testigo* mientras que los tratamientos (Retenedor en el caso de a 20 cm y *Micorriza* en el caso de a 40 cm) consiguen prolongar la retención de agua en los horizontes. El caso de las Parcelas 2 y 3, es especialmente notorio ya que, a pesar de contener un mayor porcentaje de arena, el incremento de la humedad registrado es notable y prolongado en el tiempo.

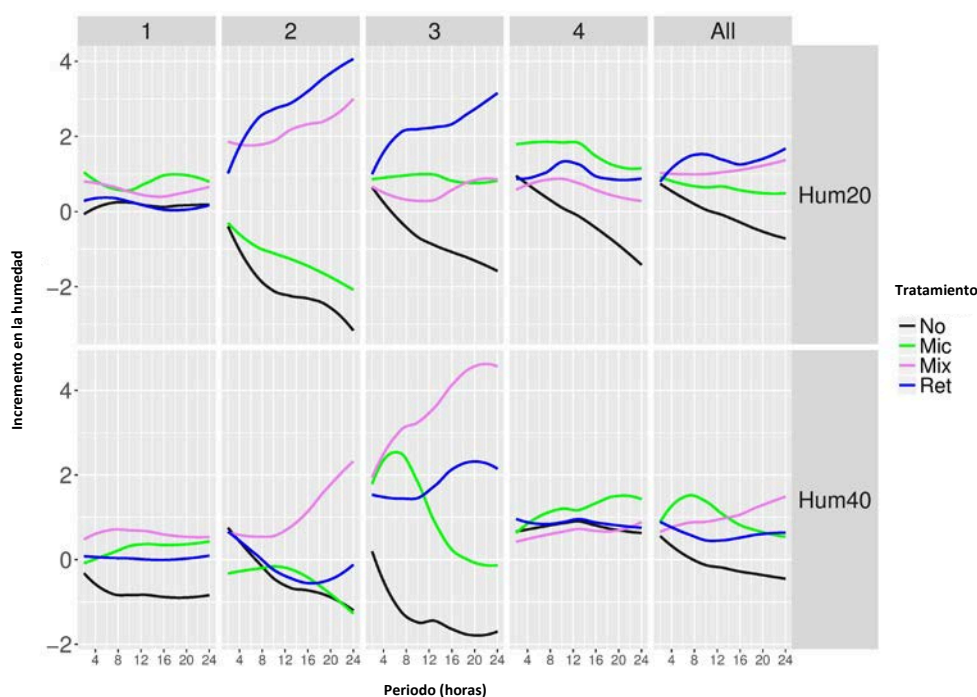


Figura 2. Evolución de la humedad edáfica tras las primeras 24 horas desde que se produce una precipitación

4.2. Supervivencia

Después de dos años y medio desde el establecimiento de los individuos, los valores totales de supervivencia de las plantas fue del 91% para *Prunus dulcis*, 78% *Pinus pinea*, 68% *Quercus ilex*, 64% *Juniperus thurifera* y 60% *Acer campestre*. Cuando los resultados se desglosan por tratamientos, se observa el aumento de supervivencia. En el caso del tratamiento *Mixto*, el aumento de la supervivencia es generalizado ya que todos los valores superan el 69 % a diferencia del *Testigo* (50%), *Retenedor* (58%) y *Micorriza* (60%) (Figura 3).

A nivel de especie, llama la atención la nula o negativa influencia de los tratamientos en el caso de *Prunus dulcis* mientras que el caso contrario sucede con *Juniperus thurifera* cuyos valores de supervivencia al final del periodo observado suben al 82% con el tratamiento *Mixto* respecto al *Testigo* (50%) y al resto (aprox. 60%). Sucede lo mismo pero con un efecto más mitigado con *Acer campestre*. En el caso de *Pinus pinea*, la influencia de los tratamientos es nula ya que los valores de supervivencia se mantiene constantes en torno al 80%.

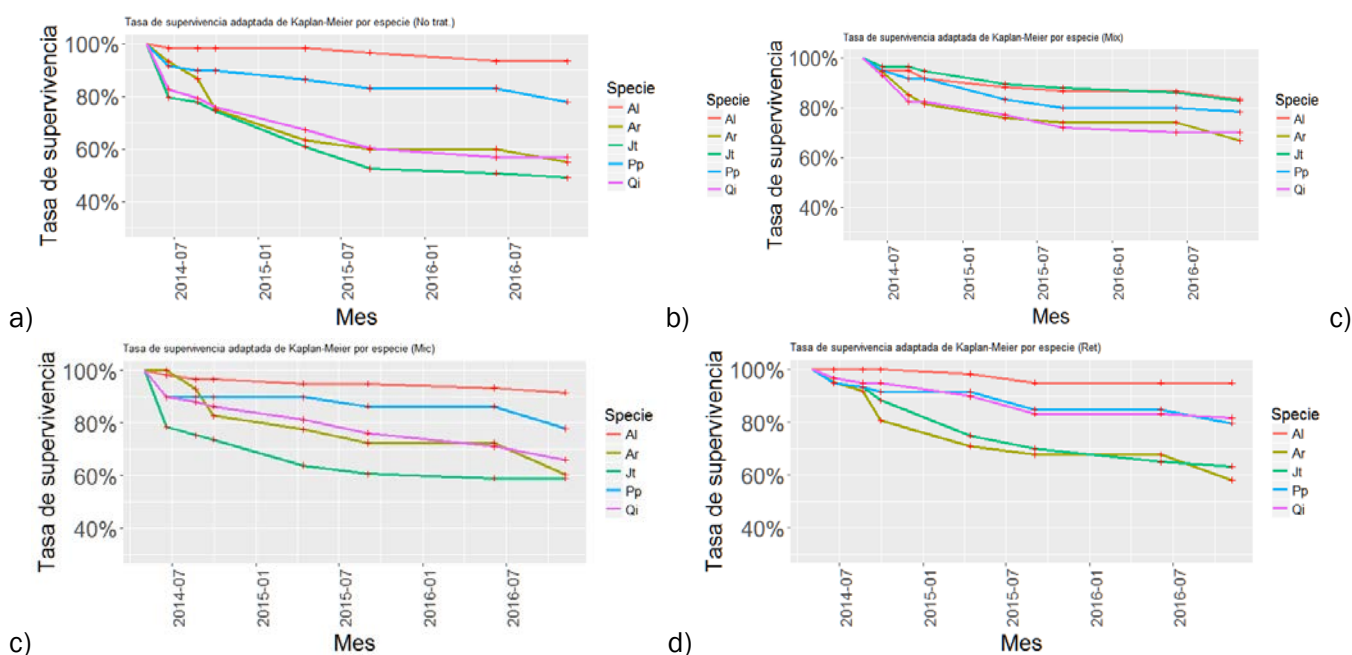


Figura 3. Evolución de la tasa de supervivencia observada por especies y por tratamiento: Testigo (a), Mixto (b), Micorriza (c) y Retenedor (d)

En comparación con el tratamiento testigo, se ha observado un aumento significativo de la probabilidad de supervivencia (Figura 4). *Quercus ilex* y *Juniperus thurifera* son las especies que más aumentan la probabilidad de sobrevivir tras la aplicación de los tratamientos de acuerdo a la significancia de los coeficientes del modelo (Tabla 2).

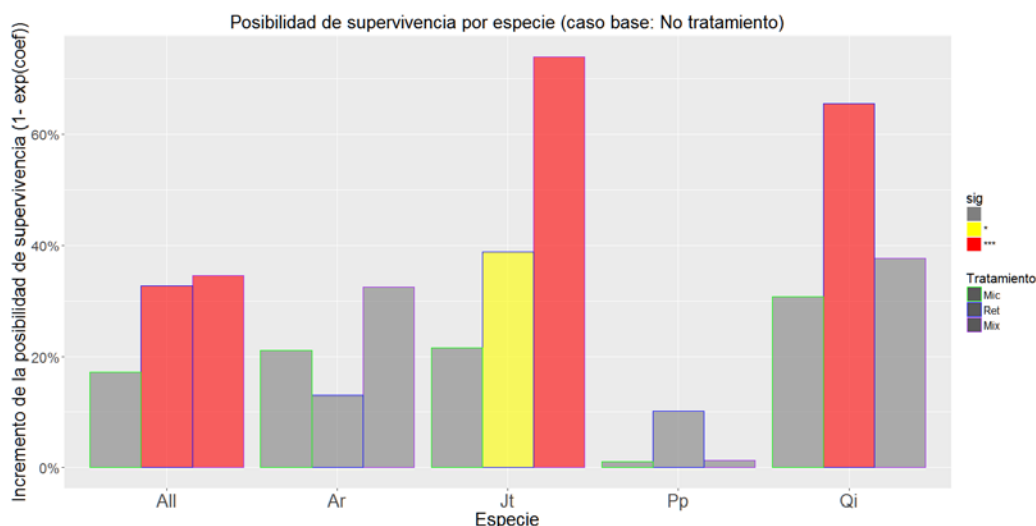


Figura 4. Incremento de la probabilidad de supervivencia por tratamiento (de izquierda a derecha: Micorriza, Retenedor y Mixto) combinando todas las especies ("All") y por especie. Se analizó la significancia en base a los supuestos * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$.

Tabla 2. Coeficientes del modelo de supervivencia, error estándar (se) y grado de significancia de los mismos (* $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$) para los supuestos en los que los tratamientos han resultado significativos

Tratamientos	Todas las especies			Jt			Qi		
	exp (coef)	se	Sign. (Pr(> z))	exp (coef)	se	Sign. (Pr(> z))	exp (coef)	se	Sign. (Pr(> z))
Micorriza	0.8280	0.1474	0.20291	0.7842	0.2709	0.385691	0.6920	0.3001	0.21638
Retenedor	0.6735	0.1537	0.00972 **	0.6123	0.2808	0.072227	0.3449	0.3620	0.00308 **
Mixto	0.6541	0.1575	0.00750 **	0.2597	0.3655	0.000169 ***	0.6224	0.3144	0.13867

La variabilidad espacial observada en la medición de la humedad edáfica también se traslada al cómputo de la tasa de supervivencia ya que se observan importantes diferencias entre las parcelas de control (Figura 5). En la Parcela de control 4 la supervivencia observada ronda el 90% indicando la tendencia que la mortalidad ha sido prácticamente nula en los últimos dos años. Por el contrario, en el peor de los casos (Parcela 2) el valor se queda por debajo del 65% y se observan un aumento gradual de la pendiente a lo largo del periodo analizado.

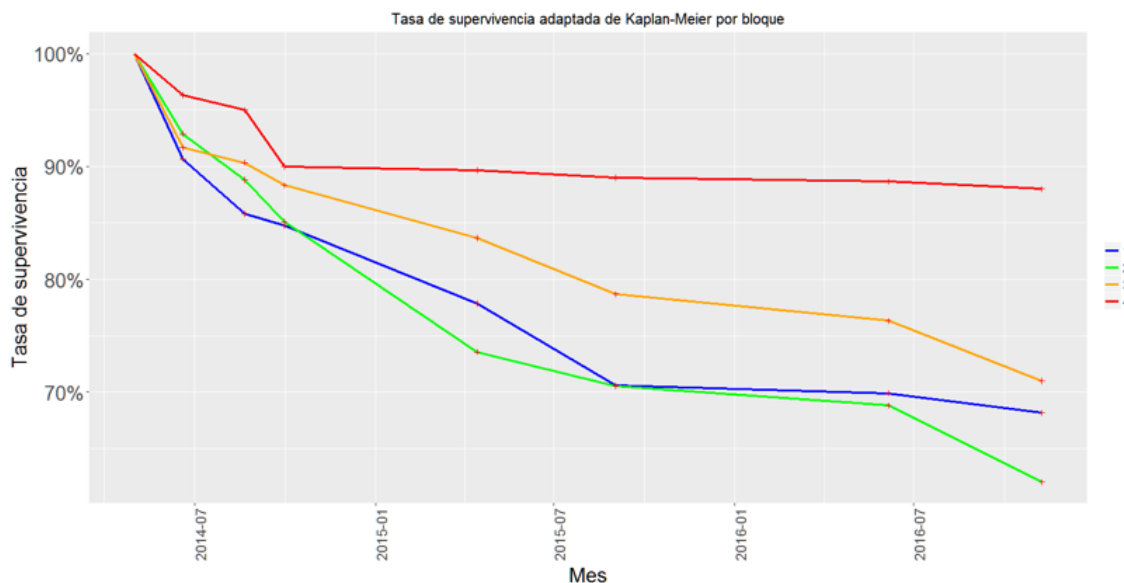


Figura 5. Evolución de la tasa de supervivencia observada en las cuatro zonas de ensayo

5. Discusión

Del mismo que con nuestra metodología, estudios previos han demostrado que el uso de retenedores de polímero, un compuesto súper absorbente, aumenta la humedad edáfica de las plantas mejorando la germinación y supervivencia de los individuos (YANG ET AL., 2014) incluso en lugares con fuerte sequía estival (HÜTTERMANN ET AL., 1999). Estos estudios no incluían el componente espacial en sus conclusiones, algo que en nuestro caso sí que hemos visto que es determinante ya que los resultados de humedad edáfica, y por consiguiente de supervivencia observada, varían dentro del diseño experimental. El efecto de la composición del suelo en la infiltración de la escorrentía generada en un aguacero muestra importantes diferencias tanto entre tratamientos como dentro de la zona de estudio. Esto es debido a que las labores de preparación del terreno fueron desiguales dentro de la parcela al haber zonas con más residuos de obra que otras en mejor estado de conservación y como resultado la acumulación de áridos ha sido desigual según zonas. Por lo tanto, la preparación del terreno y la composición del suelo son dos factores a considerar en la interpretación de los resultados (MAESTRE ET AL., 2003) ya que ha condicionado la metodología aplicada para calibrar las lecturas de humedad de las sondas. Este novedoso sistema de sensorización permite monitorizar con precisión la dinámica del agua en el entorno de la rizosfera (BOGENA ET AL., 2007) si bien es cierto que la precisión de las lecturas es elevada a la hora de procesar los datos es necesario una calibración de los valores (SHENG ET AL., 2011). En nuestro caso, fue complicado encontrar una sola fórmula que permita ajustar todas las lecturas dada la heterogeneidad del suelo dentro del diseño experimental. De cara a su aplicación en restauración forestal, es importante homogeneizar la textura del suelo a fin de reducir incertidumbre a la hora de interpretar y procesar la información resultante de las lecturas de las sondas.

A escala diseño experimental el efecto positivo de los tratamientos es claro respecto al tratamiento *Testigo*. El efecto del retenedor incrementa un 20% la tasa de supervivencia ya que amortigua la infiltración tras aguaceros y permite un mejor desarrollo radicular. Su uso en ambientes mediterráneos y arenosos puede reducir notablemente el peso de las marras y las necesidades de riego, consiguiendo resultados similares a cuando se aplican tratamientos más costosos como la fertilización (OLIVEIRA ET AL., 2015). Los resultados de supervivencia muestran una tendencia similar entre *Micorrización* y *Retenedor* salvo en el caso de *Quercus ilex*, que empeora con la inoculación. Un

factor importante a considerar es que el grado de inoculación conseguida en vivero puede ser muy variable entre los individuos, y más si la micorrización es en campo. La tasa de supervivencia en la micorrización fue del 60%, peor que lo esperado inicialmente. Por ello, se encargó un estudio de validación a un laboratorio independiente para averiguar del grado de inoculación conseguido: tanto en *Pinus pinea* como en *Quercus ilex* se detectó una alta variabilidad en el porcentaje de micorrización y unos valores medios del 31.3% y 11.1% respectivamente. En este sentido, Rincón et al., (2007) detectaron una alta variabilidad a lo largo del ciclo de estudio de dos años y midieron una porcentaje de inoculación que de media rondó el 38% en el género *Pinus spp*, similar a nuestro caso. Por lo tanto en principio, el efecto aditivo del retenedor más la micorrización podría haber mermado la eficacia del tratamiento *Mixto* en cuanto a aumentar la humedad edáfica y la supervivencia. Este hecho se observa en los resultados de humedad edáfica pero no así en la supervivencia observada ya que los valores para *Mixto* (salvo para *Prunus dulcis*) son superiores a *Retenedor* y a *Micorriza* respectivamente. Teniendo en cuenta que la zona de estudio era prácticamente una escombrera, los valores conseguidos son muy reseñables incluso en ausencia de tratamiento. En el caso de *Quercus ilex*, el retenedor incrementa hasta un 65% la probabilidad de supervivencia, superior a estudios previos (NAVARRO ET AL., 2006; SEVA ET AL., 2004).

6. Conclusiones

La aplicación de técnicas que facilitan la restauración forestal ha demostrado ser efectivo a la hora de reducir marras y asegurar unas condiciones que faciliten la supervivencia de las plantas. En un escenario de cambio climático con un aumento de episodios de fuerte sequía estival, como en nuestra zona de estudio, incrementar la disponibilidad hídrica sin incrementar recursos se presenta como un reto de planificación urbana y forestal. Con este estudio hemos pretendido generar más información apostando por técnicas de restauración que a la vez minimicen los insumos y aumenten la supervivencia de las plantas; y a su vez incorporar métodos de “*Big Data*” en la toma de decisiones (en este caso un uso combinado de sensores y datos climáticos). Los tratamientos permiten reducir la escorrentía ya que laminan la infiltración del agua, ayudando a no desperdiciar el agua (principal limitante en ecosistemas mediterráneos). La alta variabilidad espacial de los resultados en nuestro estudio pone en valor la importancia de la preparación del terreno a la hora de aplicar estos métodos con precisión.

7. Agradecimientos

El presente estudio se ha realizado gracias al apoyo del Ayuntamiento de Valladolid, Junta de Castilla y León, miembros del grupo de ciudades GSEC (<http://www.gsec-group.eu/>) así como de la Comisión Europea a través de su cofinanciación dentro del programa LIFE a través del proyecto Quick Urban Forestation (LIFE12 ENV/ES/000092).

8. Bibliografía

ADAMCHUK, V., HUMMEL, J., MORGAN, M., UPADHYAYA, S. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 44 71–91.

BATES, D., MAECHLER, M., BOLKER, B., WALKER, S., 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *J. Stat. Softw.* 67, 1-48.

BOGENA, H. R., HUISMAN, J. A., OBERDÖRSTER, C., VERECKEN, H. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *J. Hydrol.* 344 32–42.

CALLAGHAN T.V., ABDELNOUR H., LINDLEY D.K. 1988. The environmental crisis in the Sudan. The effect of water-absorbing synthetic polymers on tree germination and early survival. *J. Arid. Environ.* 14 301–318.

COX, D.R. 1972. Regression Models and Life-Tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol. 34(No. 2.), pp. 187-220.

CARAVACA, F., FIGUEROA, D., ALGUACIL, M., ROLDÁN, A. 2003. Application of composted urban residue enhanced the performance of afforested shrub species in a degraded semiarid land. *Bioresource. Technol.* 90, 65–70.

HÜTTERMANN, A., ZOMMORODI, M., REISE, K. 1999. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. *Soil & Tillage Res* 50 295-304.

KAPLAN, E. L., MEIER, P. 1958. Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American statistical association*, 53(282), 457-481.

LEKSHMI, S., SINGH, D. N., SHOJAEI BAGHINI, M. 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* 54 92–105.

MAESTRE, F. T.; CORTINA, J.; BAUTISTA, S.; BELLOT, J.; VALLEJO, V. R. 2003. Small-scale environmental heterogeneity and spatio-temporal dynamics of seedling establishment in a semiarid degraded ecosystem. *Ecosystems* 6 630-643

NAVARRO, R.M., DEL CAMPO, A.D., CORTINA, J. 2006. Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta. Cap. 2. En *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes Mediterráneos. Estado actual de conocimientos*. Cortina, J., Peñuelas, J.L., Puértolas, J., Vilagrosa, A., and Savé, R. (Coord.). Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid

OLIVEIRA, G., NUNES, A., CLEMENTE, A., CORREIA, O. 2011. Effect of substrate treatments on survival and growth of Mediterranean shrubs in a revegetated quarry: An eight-year study. *Ecol. Eng.* 37 255–259.

OLIVEIRA, R. S., FRANCO, A. R., CASTRO, P. M. L. 2012. Combined use of *Pinus pinaster* plus and inoculation with selected ectomycorrhizal fungi as an ecotechnology to improve plant performance. *Ecol. Eng.* 43 95–103.

PALACIOS, G., NAVARRO, R.M. 2001. Caracterización de la calidad de planta en vivero de siete procedencias de pino piñonero (*Pinus pinea* L.). *Actas III Congreso Forestal Español*, Mesa 3 854-860

PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S., DEEPAYAN, S., R Development Core Team. 2013. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-111.

R Development Core Team. 2006. R: A language and environment for statistical computing. Technical report, R Foundation for Statistical Computing.

- RINCÓN, A., DE-FELIPE, M. R. FERNÁNDEZ-PASCUAL, M. 2007. Inoculation of *Pinus halepensis* Mill. with selected ectomycorrhizal fungi improves seedling establishment 2 years after planting in a degraded gypsum soil, *Mycorrhiza* 18 23–32.
- RUANO, I., PANDO, V., BRAVO, F. 2009. How do light and water influence *Pinus pinaster* Ait. germination and early seedling development? *Forest. Ecol. Manag.* 258 2647–2653.
- RUTHROF, K. X., FONTAINE, J. B. 2013. Linking restoration outcomes with mechanism: the role of site preparation , fertilisation and revegetation timing relative to soil density and water content, *Plant. Ecol.* 214 987–998.
- SÁNCHEZ-SALGUERO, R., NAVARRO-CERRILLO, R. M., SWETNAM, T. W., ZAVALA, M. A. 2012. Is drought the main decline factor at the rear edge of Europe? The case of southern Iberian pine plantations. *Forest. Ecol. Manag.* 271 158–169.
- SEVA, J.P., VALDECANTOS, A., CORTINA, J., VALLEJO, R. 2004. Diferentes técnicas de introducción de “*Quercus ilex*” ssp. “*ballota*” (Desf.) Samp. en zonas degradadas de la Comunidad Valenciana. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales* 17 233–238
- SHENG, W., SUN, Y., SCHULZE LAMMERS, P., SCHUMANN, H., BERG, A., SHI, C., WANG, C. 2011. Observing soil water dynamics under two field conditions by a novel sensor system. *J. Hydrol.* 409 555–560.
- SOUSA, N. R., FRANCO, A. R., RAMOS, M. A., OLIVEIRA, R. S., CASTRO, P. M. L. 2011. Reforestation of burned stands: The effect of ectomycorrhizal fungi on *Pinus pinaster* establishment. *Soil. Biol. Biochem.* 43 2115–2120.
- STATA CORP. 2013. Stata Statistical Software: Release 13. College Station, TX.
- VERECKEN, H., HUISMAN, J. A., BOGENA, H., VANDERBORGHT, J., VRUGT, J. A., HOPMANS, J. W. 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review, *Water. Resour. Res.* 44 1–21.
- WICKHAM, H. 2009. *ggplot2: elegant graphics for data analysis.*: Springer New York.
- WU, L., LIU, M., RUI LIANG. 2008. Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. *Bioresour. Technol.* 99 547–54.
- YANG, L., YANG, Y., CHEN, Z., GUO, C., LI, S. 2014. Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering. *Ecol. Eng.* 62 27–32.