



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

Evaluación del papel de la cubierta vegetal en la capacidad de secuestro de C de cultivos de olivar. Aplicación del modelo RothC como herramienta predictiva

Alumno: Nicolás Duro Molina

Febrero, 2018

ÍNDICE

Resumen	4
Summary	4
1. Introducción	5
2. Material y métodos	9
2.1. Descripción del modelo RothC	9
2.2. Aplicación general del modelo	10
2.3. Escenarios considerados en este trabajo	11
2.3.1. Zonas climáticas en la provincia de Jaén	11
2.3.2. Características de los suelos, tipos de manejo y contenido en C de la cubierta vegetal	14
2.4. Modelado en distintos escenarios de cambio climático	15
2.4.1. Temperatura	15
2.4.2. Precipitación	18
2.4.3. Proceso iterativo de cálculo de modelo bajo los escenarios de cambio climático	19
3. Resultados	20
3.1. Capacidad de secuestro de C en las distintas localidades y manejos	20
3.2. Capacidad de secuestro de C bajo condiciones de cambio climático	30
4. Discusión	38
5. Conclusión	42
6. Bibliografía	44

Resumen

La cantidad de carbono presente en la atmosfera se está viendo aumentada de forma muy importante en los últimos años debido fundamentalmente a la actividad humana, tanto la industrial como la agrícola o los transportes. Este carbono, principalmente en forma de CO₂, así como otros gases aumentan la capacidad de retención de energía de la atmósfera, aumentando el efecto invernadero y, por lo tanto, provocando un cambio climático a escala global. Para mitigar los efectos del cambio climático se han propuesto distintos mecanismos de secuestro de C, entre ellos la actividad agrícola. El objetivo de este trabajo ha sido, por tanto, intentar cuantificar el carbono orgánico que es capaz de retener el suelo del olivar de la provincia de Jaén, teniendo en cuenta a, las condiciones climáticas a meso- micro-escala, y, distintos tipos de manejo de las explotaciones, en concreto:

- Permitir la presencia de cubierta vegetal permanente,
- Añadir fertilizantes de síntesis química que estimulan la presencia de cubierta a corto plazo, o
- Eliminar por completo la cubierta vegetal.

Además, se ha evaluado el papel del incremento de temperatura y la variabilidad asociados al cambio climático en las precipitaciones sobre la capacidad de secuestro de C. Los resultados obtenidos sugieren que la capacidad de secuestro de C aumenta si se permite la presencia de cubierta vegetal a largo plazo, aunque a corto plazo el C retenido en el suelo es mayor en presencia de fertilización química. Además, el incremento de temperatura asociado a distintos escenarios de cambio climático reducen, independientemente del lugar y del manejo, la capacidad del suelo de cultivos de olivar como sumideros de C orgánico a largo plazo.

Summary

The amount of carbon in the atmosphere has increased during the last years due to the human being, mainly the industrial, farming or transports activities.

The main species of inorganic carbon, CO₂, and others gases, increase the ability of energy retention of the atmosphere, increasing the greenhouse effect and promoting a climate change at the global scale. In order to reduce the effects of climate change, agricultural activities have been proposed as a possible CO₂ sink. Thus, the objective of this work has been to quantify the ability of olive grove soils to retain organic C, taking into account local weather conditions and different sorts of land management:

- allowing the presence of plant cover
- adding chemical fertilizers that stimulate the presence of a plant cover in the short term
- removing the plant cover permanently

We have also evaluated the role of increasing temperature and the variability of rainfall on the inorganic C retention capacity. Our results show that the presence of a plant cover increases the amount of organic carbon in the soil, although in the short term a higher amount of inorganic C is found in the soil when a chemical fertilization is applied. On the other hand, the increase of temperature associated to different climate change scenarios reduces the ability of the soil to withhold the organic C in the long term, independently of the location or the land management applied

1. Introducción

A lo largo de la historia de la Tierra, el clima ha visto cambiado de manera más o menos frecuente, especialmente en cuanto a la temperatura, ya sea con aumentos o descensos de la misma, como, por ejemplo, en las glaciaciones. Estos cambios climáticos han constituido una fuerza selectiva entre otras que han provocado la selección de organismos, de forma que los que fueron capaces de aclimatarse y adaptarse a esos cambios son los que se han seleccionado y se encuentran en la actualidad. Así, podemos definir el cambio climático como un cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima, estando este cambio influenciado por diferentes causas:

- Naturales: como por ejemplo, variaciones en la energía que se recibe del Sol, erupciones volcánicas, circulación oceánica, procesos biológicos a gran escala, etc.
- Antrópico: influido por la actividad humana, provocado fundamentalmente por la actividad industrial desde el siglo XVIII (Revolución industrial), los medios de transporte y la deforestación de bosques para convertirlos en tierras agrícolas. Esta modificación del clima a escala global está provocada, en su práctica totalidad por la emisión de gases de efecto invernadero emitido, provocado por, por ejemplo, la industria, los medios de transporte, las granjas de ganadería intensiva o la actividad agrícola intensiva.

El cambio climático actual que estamos experimentando a escala planetaria, aparte de tener en cierta medida un origen natural, está fuertemente influenciado por la emisión de los llamados gases de efecto invernadero que provocan un aumento de la retención de la energía de onda larga en la atmosfera y por lo tanto un aumento de la temperatura global. Estos gases son, fundamentalmente, el vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonos (CFC), ozono (O₃) y el hexafluoruro de azufre (SF₆)

Como se ha comentado anteriormente, la principal fuente de estos gases de efecto invernadero son la industria y los medios de transporte, cuya actividad se ha ido incrementando exponencialmente desde la revolución industrial. Otra de las principales fuentes de emisión de estos gases, en parte de forma indirecta y objeto de nuestro estudio es el sector de la agricultura en cuanto a:

- Liberación de CO₂ relacionada con la deforestación
- Liberación de metano del cultivo de arroz
- Liberación de metano de la fermentación entérica en el ganado
- Liberación de óxido nitroso de la aplicación de fertilizantes

A los que se suma el consumo de combustibles fósiles y todo el CO₂ emitido en los procesos que acompañan de manera indirecta a la actividad agrícola (consumo de combustible para los distintos transportes, producción de fertilizantes, etc.)

La concentración de dióxido de carbono se ha visto aumentada en el último siglo y especialmente en los últimos años, llegando a superar niveles record en la actualidad. La concentración de CO₂ en la atmosfera es en la actualidad del orden del 145% mayor que a los niveles preindustriales, superando actualmente, y en continuo crecimiento, las 400 partes por millón.

Para combatir se han propuesto distintos medios de retirada de CO₂ de la atmosfera y entre ellos destaca la actividad agrícola, tanto la propia vegetación cultivada como el suelo sobre el que se desarrolla, pudiendo jugar ambos un papel fundamental para la retención de C orgánico, actuando particularmente el suelo como un potente sumidero de C. Esto es especialmente cierto en cultivos donde la cantidad de C retenido, como consecuencia de los manejos aplicados, es muy baja, es decir, existe un bajo déficit de saturación de C, o dicho de otra manera, por sus características de estructura y textura tienen una elevada capacidad de acumular C. En esta situación se encontrarían gran parte de los cultivos de olivar de la provincia de Jaén, donde los contenidos en C orgánico están muy alejados de la situación máxima posible (Vicente, 2017). Siguiendo este razonamiento, la retención de C orgánico en el suelo, provocaría un descenso de las emisiones de CO₂ a la atmosfera, contribuyendo así a la lucha contra el cambio climático, lo que eventualmente podría ser cuantificado desde un punto de vista económico.

En la provincia de Jaén se encuentra la mayor superficie de cultivo de olivar de España, con 586173 hectáreas, siendo dedicadas al olivar ecológico más de 9380 hectáreas, y en continuo crecimiento gracias en parte a las ayudas recibidas. El olivar ecológico es más importante en cuanto a la retención de C orgánico en el suelo, ya que la continua presencia de cobertura vegetal, característica del mismo, debería provocar un aumento en C orgánico en el suelo y por lo tanto una mayor reducción del cambio climático con respecto al

olivar convencional, en el que se utilizan fertilizantes químicos o incluso en muchos casos no existe en ningún momento la presencia de una cubierta vegetal.

Para estimar el C orgánico que es capaz de retener en el suelo del olivar de la provincia de Jaén hemos usado el modelo "Roth C model", que es un modelo capaz de cuantificar, teniendo en cuenta las características climáticas y el tipo de suelo de una localidad, así como el tipo de manejo que se realiza (aporte de vegetación adyacente, fertilización, etc) en la explotación, y las tasas de descomposición y las distintas fracciones de C orgánico, cuanto de C orgánico puede quedar retenido en el suelo durante un periodo de tiempo especificado.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto, el objetivo fundamental de este trabajo ha sido evaluar la capacidad de secuestro de C orgánico en explotaciones de olivar de la provincia de Jaén empleando el modelo Roth C, considerando zonas, con un tipo de suelo y unas condiciones climáticas diferentes. Dentro de cada una de esas zonas se han considerado 3 tipos de manejo de suelo, diferenciados en el manejo que se hace de la cubierta vegetal: con cubierta vegetal no eliminada (CC), aplicando fertilizantes químicos que estimulan el crecimiento de cubierta a corto plazo (EQ) y eliminando de forma activa la cubierta vegetal (SC).

Por otro lado se han propuesto diferentes escenarios de futuro en cuanto al cambio climático realizados por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (IPCC 2014), donde se consideran diferentes ritmos de crecimiento económico y poblacional a nivel mundial. Así, para considerar la posible evolución del clima futuro, una vez evaluadas las diferencias entre los distintos casos considerados se han realizado simulaciones de evolución del C orgánico acumulado en el suelo en las mismas localidades y los mismos manejos pero bajo diferentes escenarios de cambio climático, seleccionando 3 escenarios de crecimiento considerados por el IPCC, dos extremos (el menos desfavorable y el más favorable) y uno intermedio, donde se prevé un aumento de la temperatura de 1.5°C, 3°C y 4.5°C respectivamente. Mediante esta aproximación hemos podido examinar el

objetivo de evaluar el papel del cultivo de olivar y la presencia de cubierta vegetal bajo diferentes situaciones posibles de cambio climático.

2. Material y métodos

2.1 Descripción del modelo RothC

RothC (Coleman y Jenkinson, 1996, 1999) es un modelo diseñado para predecir los cambios en el contenido en C y la cantidad de CO₂ emitido por suelos dedicados a actividad agrícola, que permite evaluar el efecto del tipo de suelo, las condiciones climáticas y la presencia de cubierta vegetal sobre los procesos responsables de la retención de C y su renovación.

El modelo considera 9 variables de entrada además de la cantidad inicial de C presente:

- La temperatura, precipitación y evapotranspiración mensual.
- El porcentaje de arcilla del suelo.
- La profundidad del suelo para calcular la cantidad de C retenido. En este trabajo se han considerado 10 cm de profundidad en todos los casos
- La presencia de cobertura vegetal durante los distintos meses del año así como la cantidad de C que aporta dicha cubierta en cada uno de los meses.
- Una estimación de las tasas de descomposición de la cubierta vegetal que se incorpora al suelo, a partir del ratio de material vegetal de fácil descomposición y el material vegetal de difícil descomposición (“decomposable plant material” o DPM y “resistant plant material” o RPM)

El C orgánico del suelo es, a su vez, dividido en materia orgánica inerte (“inert organic matter” o IOM) y cuatro porciones activas: DPM y RPM, anteriormente mencionados, materia orgánica humificada (“humified organic matter” o HUM) y biomasa microbiana (“microbial biomass” o BIO). Cada uno de estas fracciones activas se descompone en el suelo pasando a los compartimentos BIO y HUM

y liberándose CO₂ como consecuencia de la respiración bacteriana. El proceso seguido por el modelo se muestra en la **Figura 1**

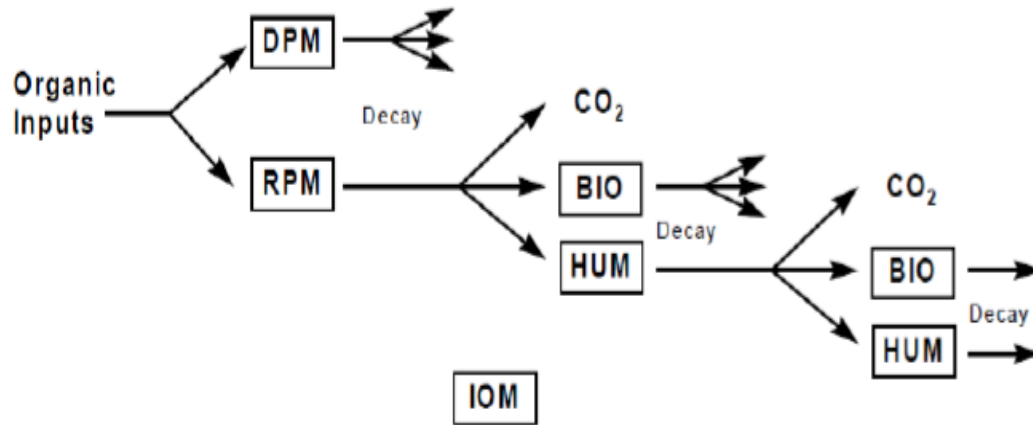


Figura 1. Secuencia de procesos que realiza el modelo RothC para evaluar el destino del C incorporado a un suelo.

2.2 Aplicación general del modelo

El procedimiento que se sigue para predecir el destino del C orgánico en los suelos con el modelo RothC es el siguiente. En primer lugar es necesario conocer el valor de la fracción IOM, como contenido inicial de C. En nuestro caso los datos se han obtenido de fuentes bibliográficas (Falloon et al, 1998). A continuación el modelo calcula de forma iterativa la cantidad de C presente en el suelo en las distintas fracciones anteriormente mencionadas en función del input mensual de C procedente de la cubierta vegetal o la fertilización, en caso de que existan, durante el periodo de años considerado. Este proceso se repite con los diferentes escenarios (cambios en las condiciones climáticas, presencia/ausencia y contenido de C de la cubierta vegetal, etc)

2.3 Escenarios considerados en este trabajo

2.3.1 Zonas climáticas en la provincia de Jaén

Nuestro trabajo se ha centrado en la provincia de Jaén, donde, para evaluar las posibles diferencias atribuibles a las condiciones climáticas, hemos considerado 3 zonas claramente diferenciadas (**Figura 2**):

1. Depresión del Guadalquivir
2. Sierra Morena
3. Sierras Béticas

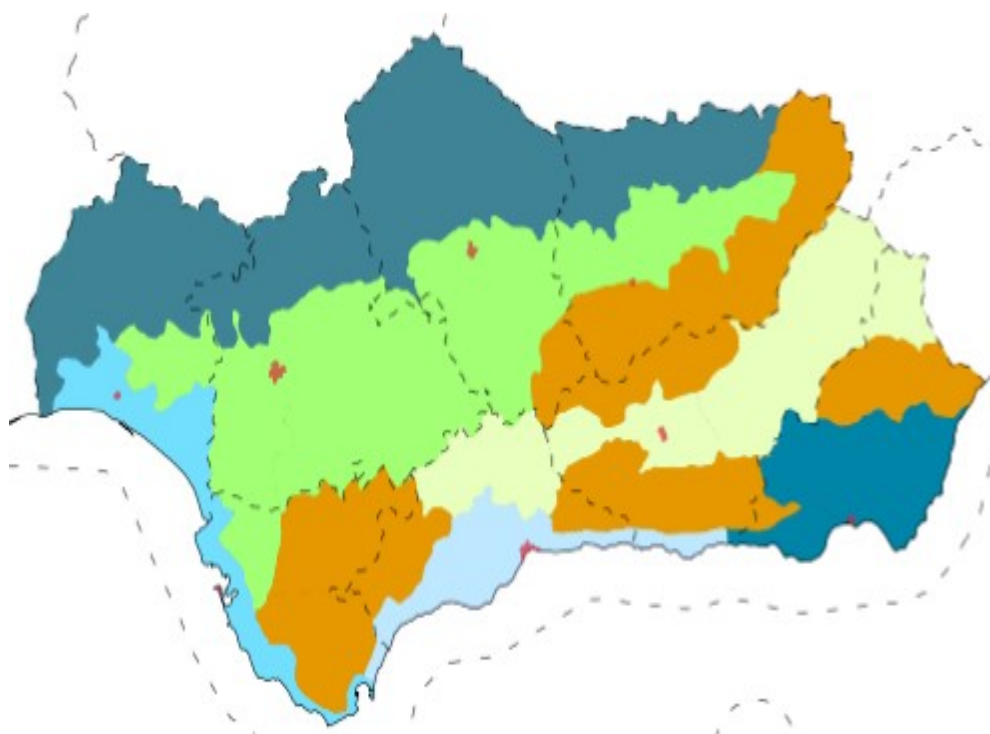


Figura 2, Distribución espacial de las tres zonas climáticas consideradas en la provincia de Jaén. En azul la zona de Sierra Morena; en verde la zona de la Depresión del Guadalquivir; y en marrón la zona de las Sierras Béticas

Al no existir superficie del olivar en toda la superficie de la provincia de Jaén, se han seleccionado 3 municipios, uno por cada zona, representativos de de las mismas y que contengan superficie de olivar. Estos municipios seleccionados son Baeza, Marmolejo y Chilluevar, correspondientes a las zonas de Depresión

del Guadalquivir, Sierra Morena y Sierras Béticas, respectivamente. En la **Tabla 1** se muestran las características generales de las zonas consideradas.

Tabla 1. Características generales de las 3 zonas consideradas en el presente estudio.

	Baeza	Chilluévar	Marmolejo
Altitud (msnm)	520	490	200
Latitud (°)	37,94	37,58	38,4
Longitud (°)	-3,49	-3,3	-4,14
T° media- anual (°C)	17,5	16,30	16,43
T° máxima- anual (°C)	28,03	27,68	26,43
T° mínima- anual (°C)	7,35	6,88	6,63
Precipitación anual acumulada(mm)	446,14	438,23	539,16
Contenido de arcilla en el suelo (%)	49,6	22,8	37,2
Cantidad de C orgánico en el suelo (IOM) (Tn C/ ha)	148	104,2	87,9

Los datos de clima se han obtenido de la estación meteorológica más cercana a estos municipios y los datos mensuales promedio de los últimos 10 años de temperatura media, precipitación total y evapotranspiración se han usado como datos de entrada de características climáticas en el modelo (**Figura 3**)

Como se puede observar en la **Figura 3**, se trata, en los 3 lugares, de un clima típicamente mediterráneo, de marcada estacionalidad, con inviernos templados y lluviosos y veranos secos y calurosos. La temperatura es prácticamente la misma con diferencias de 1 y 2 °C entre localidades, por lo que respecta a la precipitación, encontramos diferencias ligeramente mayores si comparamos las diferentes zonas, siendo la diferencia más acusada la elevada precipitación del mes de octubre en Marmolejo. Por lo general las diferencias son prácticamente nulas y esto se debe a que la distancia geográfica, y por tanto la diferencia climatológica es escasa.

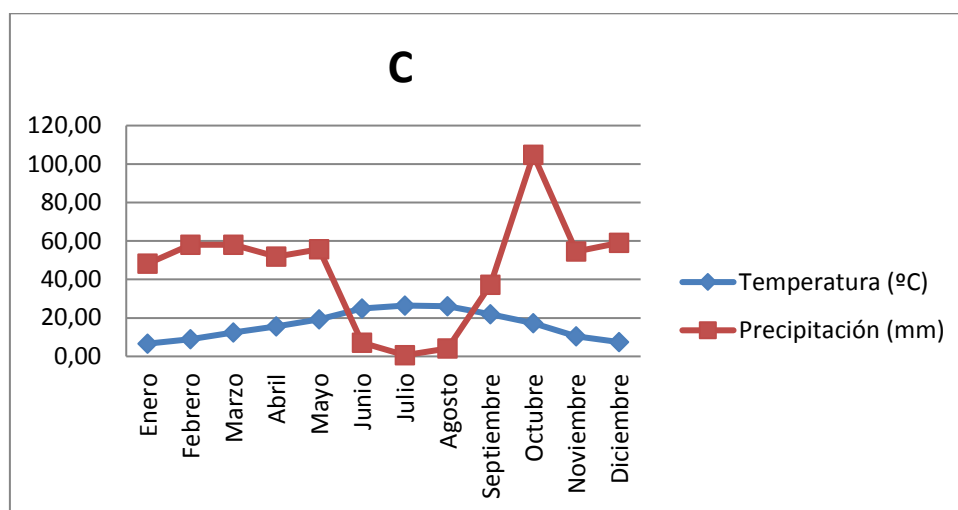
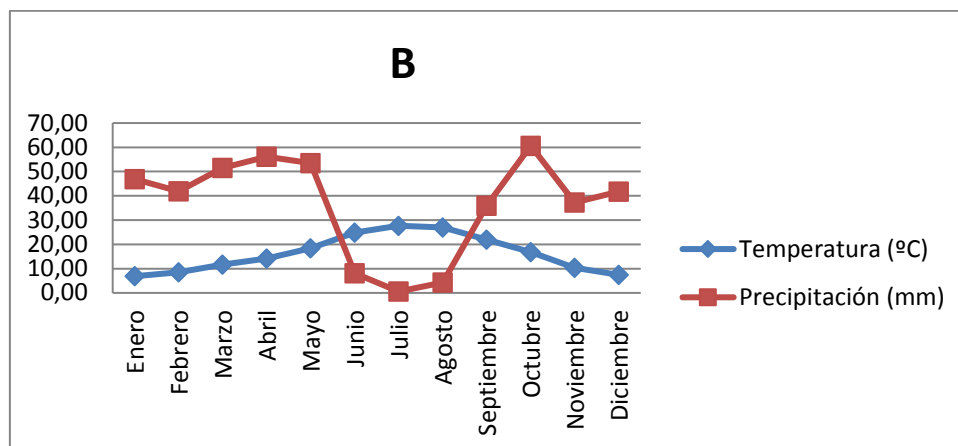
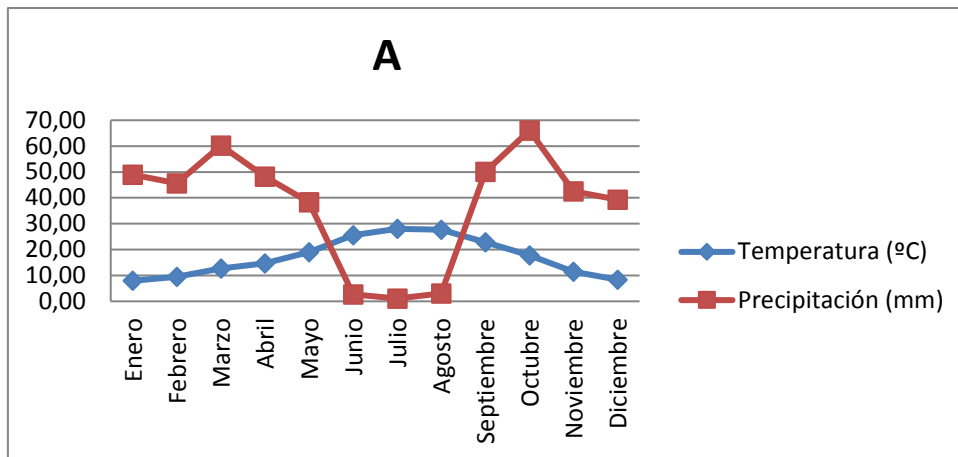


Figura 3. Distribución de precipitación y temperatura a lo largo del año en las 3 áreas; Baeza (A), Chilluevar (B) y Marmolejo (C). Nótese la diferencia de escala en las figuras.

Ya que no se trataba de una variable recogida en ninguna de las estaciones meteorológicas consideradas, la evapotranspiración se calculó de acuerdo con la ecuación de Turc:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

siendo P la precipitación mensual total (mm/año), T la temperatura media mensual (°C) y L un parámetro calculado de acuerdo con la ecuación $300 + 25T + 0,0057T^3$

2.3.2. Características de los suelos, tipos de manejo y contenido en C de la cubierta vegetal

En el presente trabajo se han considerado 3 tipos diferentes de manejo de suelo, que corresponden a las situaciones más comunes en cultivos de olivar en la provincia de Jaén:

1. Suelo con cobertura vegetal (**CC**), manejo en el que se permite la presencia de cobertura vegetal, que se desarrolla sólo en determinados meses, fundamentalmente durante los periodos de primavera y, condicionado a la precipitación en otoño. En estos meses, el modelo considera que la cantidad de C que existe en el suelo corresponde a la cantidad, en el que previamente presenta más el que se incorpora procedente de la cubierta vegetal.
2. Suelo con aplicación de fertilizantes químicos (**EQ**), donde al igual que en el suelo con cobertura vegetal, existe cubierta durante los mismos meses que en el caso anterior. En este caso se suma la cantidad de carbono aportada por la cubierta que crece como consecuencia de la fertilización al carbono que posee el suelo sin cobertura.
3. Suelo sin cubierta vegetal (**SC**), en la que no existirá cubierta en ningún mes del año, por lo que la presencia de carbono no varía en ningún mes, teniendo siempre la misma cantidad basal de C orgánico.

Los valores de distribución mensual de la cantidad de C orgánico presente en las diferentes localidades y los distintos tipos de manejo se muestra en la **Tabla 2**

Tabla 2. Cantidad de carbono que presenta el suelo a lo largo del año en la función del tipo de manejo, la cantidad de C en ausencia de cubierta (SC) se suma el C presente en la cubierta en los dos tipos de manejos en que se permite su crecimiento (CC y EQ)

	Baeza			Chilluévar			Marmolejo		
	SC	EQ	CC	SC	EQ	CC	SC	EQ	CC
Enero	3,83	3,83	3,83	1,83	1,83	1,83	2,62	2,62	2,62
Febrero	3,83	3,83	3,83	1,83	1,83	1,83	2,62	2,62	2,62
Marzo	3,83	13,81	28,49	1,83	7,43	19,2	2,62	10,85	17,27
Abril	3,83	13,81	28,49	1,83	7,43	19,2	2,62	10,85	17,27
Mayo	3,83	13,81	28,49	1,83	7,43	19,2	2,62	10,85	17,27
Junio	3,83	3,83	3,83	1,83	1,83	1,83	2,62	2,62	2,62
Julio	3,83	3,83	3,83	1,83	1,83	1,83	2,62	2,62	2,62
Agosto	3,83	3,83	3,83	1,83	1,83	1,83	2,62	2,62	2,62
Septiembre	3,83	13,81	28,49	1,83	7,43	19,2	2,62	10,85	17,27
Octubre	3,83	13,81	28,49	1,83	7,43	19,2	2,62	10,85	17,27
Noviembre	3,83	13,81	28,49	1,83	7,43	19,2	2,62	10,85	17,27
Diciembre	3,83	3,83	3,83	1,83	1,83	1,83	2,62	2,62	2,62
Total	45,9	105,83	193,92	21,9	55,5	126,12	31,4	80,82	119,34

2.4. Modelado en distintos escenarios de cambio climático

2.4.1. Temperatura

El panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC) considera una serie de escenarios en función de las tendencias de desarrollo de la población mundial y la emisión de gases de efecto invernadero, de forma que se pueden generar predicciones de evolución del clima en función de dichos escenarios de

desarrollo socio-económico. En la siguiente tabla se muestran diferentes escenarios para los próximos 100 años, partiendo desde el año 2.000.

Tabla 3. Variables que describen las características socio-económicas de la población mundial en los distintos escenarios de predicciones de cambio climático (modificado de IPCC 2014). Se incluyen el incremento global de la temperatura y el aumento global del nivel del mar

Escenario de emisiones	Población		Concentración de CO ₂ (ppm)	ΔT global (°C)	Subida del nivel del mar (cm)
	Global (Miles de millones)	Producto Interior Bruto ^a			
1990	5.3	21	354	0	0
2000	6.1-6.2	25-28	367 ^e	0.2	2
2100					
- SRESA1FI	7.1	525	976	4.5	49
- SRESA1B	7.1	529	711	2.9	39
- SRESA1T	7.1	550	569	2.5	37
- SRESA2	15.1	243	857	3.8	42
- SRESB1	7.0	328	538	2.0	31
- SRESB2	10.4	235	615	2.7	36
- IS92a	11.3	243	721	2.4	—
- SRES-min	7.0	197	478	1.4	9
- SRES-max	15.1	550	1099	5.8	88

a. Miles de millones de dólares/año

Dentro de estos escenarios de futuro, hemos seleccionado el menos desfavorable y el más desfavorable, como los extremos de las posibles situaciones futuras, que implican un incremento de la temperatura a escala global durante los próximos 100 años de 1.5°C y 4.5°C respectivamente. Junto

a estos 2 escenarios hemos seleccionado un escenario intermedio, que considera un incremento de 3°C durante los próximos 100 años. Estos incrementos de temperatura corresponden a los siguientes escenarios:

- SRES A1FI (4,5°C)
- SRES A1B (3°C)
- SRES-min o Is92c bajo(1,5°C)

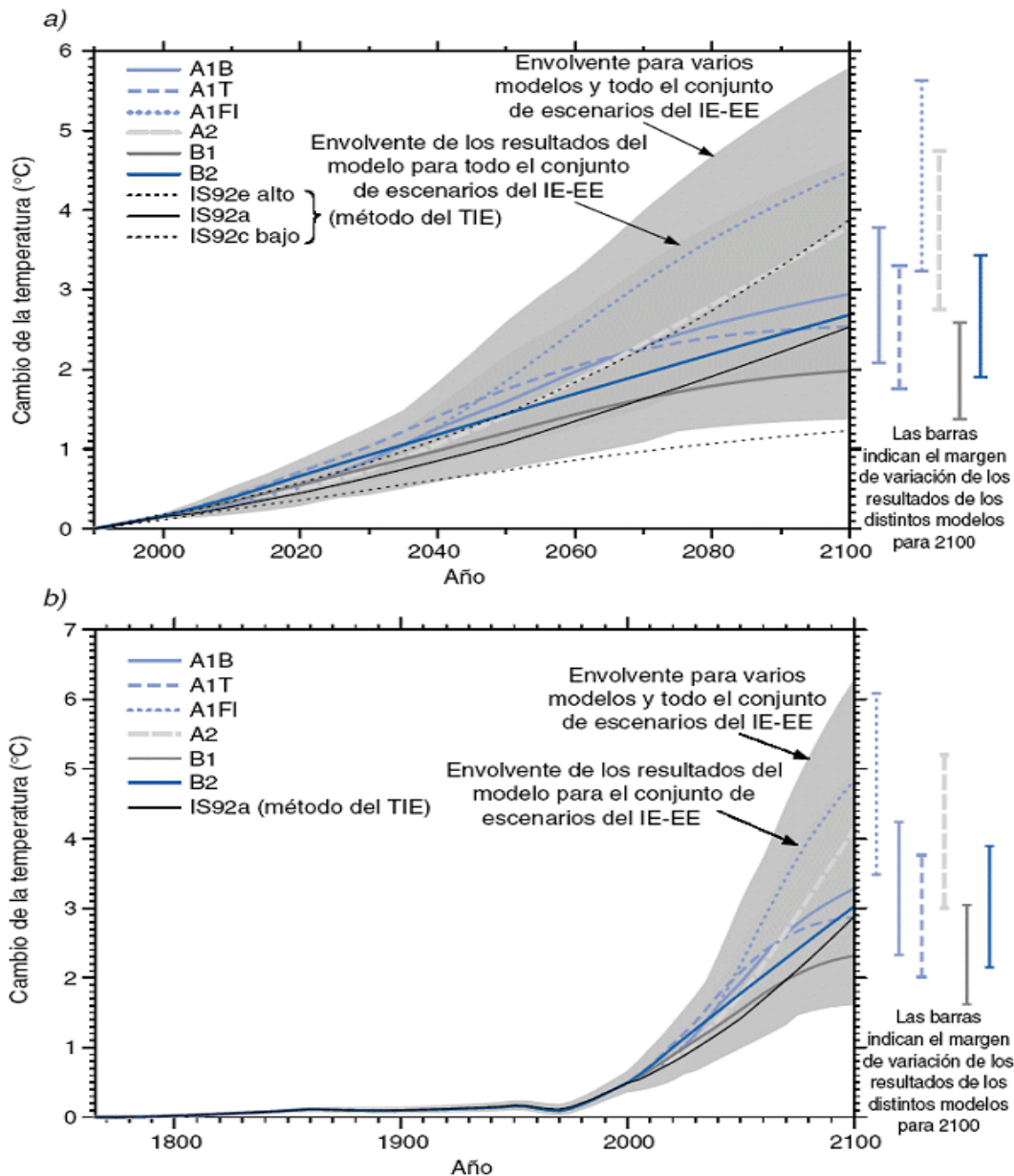


Figura 4. Incremento de temperatura en grados centígrados previsto para los próximos 100 años en los diferentes escenarios considerados por el IPCC (Tomado de IPCC 2014), de 1800 a 2100 o para el periodo 2000-2100

2.4.2 Precipitación

Los informes del IPCC nos aportan la información necesaria para saber cómo puede cambiar el clima en el futuro, pero necesitamos conocer el cambio probable que se producirá tanto en la temperatura como en la precipitación. No existen tendencias claras de la variación de la precipitación en los distintos modelos de cambio climático por lo que hemos examinado la evolución de la precipitación a largo plazo en las 3 localidades estudiadas (**Figura 5**).

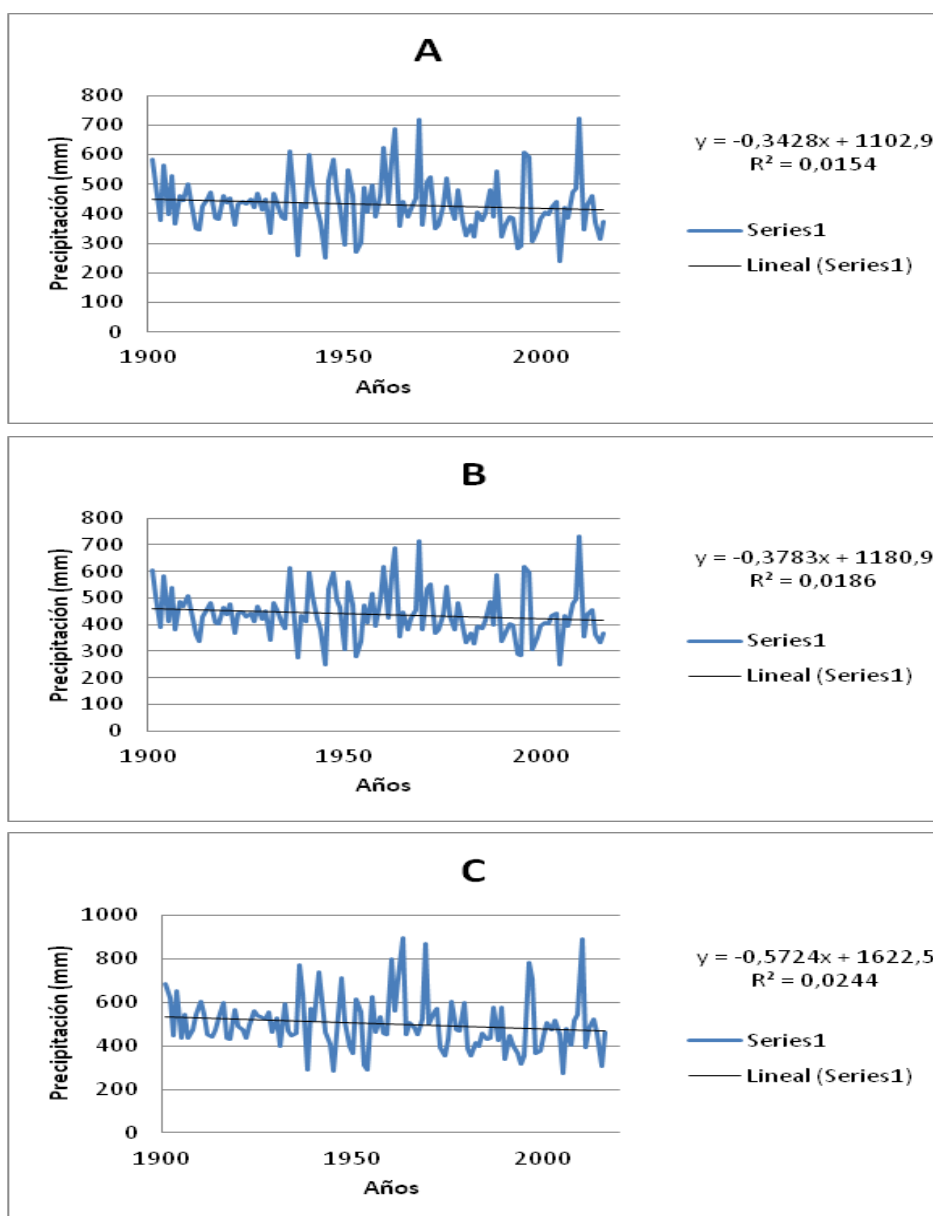


Figura 5. Variación de la precipitación desde 1900 a 2016 en las 3 zonas estudiadas: A) Baeza, B) Chilluevar y C) Marmolejo. En cada panel se incluye la ecuación y el valor del coeficiente de determinación (R^2) correspondiente al ajuste lineal de los datos para todo el periodo considerado.

Como se observa en la **Figura 5**, en ningún caso existe un ajuste lineal significativo de la precipitación a lo largo del tiempo, aunque existe una ligera tendencia de descenso a largo plazo. Sin embargo, sí se observa un incremento de la variabilidad en las últimas décadas con valores máximos y mínimos más extremos. Para simular en el modelo RothC este incremento de la variabilidad se calculó el valor máximo y mínimo de todo el periodo y se generaron valores al azar dentro de estos límites proyectando la precipitación a los siguientes 100 años (200-2100), con valores promedio a largo plazo similares a los observados en los últimos 100 años (1900-2000). Este proceso de generación aleatorio se repitió 5 veces obteniéndose como valor final de precipitación el promedio de los 5 valores aleatorios.

2.4.3 Proceso iterativo de cálculo de modelo bajo los escenarios de cambio climático

Una vez que hemos decidido los cambios de precipitación y temperatura a lo largo de los 100 años del periodo 2000-2100 y se han calculado los valores de ambas variables así como los de la evapotranspiración, se ha seguido un proceso iterativo para el cálculo de los valores del C orgánico total en el suelo, las fracciones de que está constituido y el CO₂:

- **Temperatura:** Como tenemos 3 escenarios diferentes de temperatura para los próximos 100 años (2000-2100) y sabemos que la temperatura variará en esos años en; 1.5 °C, 3°C y 4.5°C, se ha considerado un incremento lineal de 0.15, 0.3 y 0.45 °C cada diez años, por lo que en el modelo se ha modificado el archivo entrada de clima en cuanto a la temperatura cada 10 años, acuerdo con este incremento.
- **Precipitación:** Se ha modificado el modificando el archivo de precipitación sustituyendo el valor promedio de los 5 valores aleatorios que ya se había generado.
- **Evapotranspiración:** Aplicando la ecuación de Turc, con los datos de precipitación y temperatura considerando la existencia de cambio

climático, se han recalculado los valores de evapotranspiración, teniendo en cuenta la modificación de la temperatura cada 10 años.

- Una vez generados todos los archivos de clima para cada intervalo de 10 años y cada escenario de cambio climático se ha corrido el modelo de manera iterativa de forma que los valores de salida de C orgánico y CO₂ para un momento de tiempo (por ejemplo, 2000-2020), repitiéndose este proceso hasta alcanzar el periodo final de 2090-2100. Esto implica que el proceso de modelado se ha realizado un total de 270 veces (3 localidades por 3 tipos de manejo x 3 escenarios de incremento de temperatura x 10 periodos de 10 años).

3. Resultados

3.1. Capacidad de secuestro de C en las distintas localidades y manejos

El principal objeto de este trabajo ha sido evaluar cómo varía la cantidad de C retenido en el suelo de cultivos de olivar de la provincia de Jaén, en función del tipo de manejo empleado, fundamentalmente en cuanto a la presencia o no de cubierta vegetal accesoria. Dentro de este objetivo se ha planteado también la evaluación de dicha capacidad de retención en un escenario de cambios de las condiciones climáticas como consecuencia del cambio global.

Como podemos observar en la **Figura 6**, el tipo de manejo es el principal factor determinante de la cantidad de C orgánico que es capaz de retener un suelo de olivar. Un suelo con cubierta vegetal es capaz de retener mucha más cantidad de C que un suelo que no presente dicha cubierta y un poco más que un suelo en el que se han utilizado fertilizantes químicos.

Otro factor que influye en la capacidad de retener carbono es la localidad, ya que a diferentes condiciones de clima y tipo de suelo, fundamentalmente por la textura, las cantidades de carbono (Tn C/Ha) son diferentes. Así, observamos en la **Figura 6A** que se superan 400 Tn C/Ha mientras que en las otras dos localidades, **Figura 6B** y **Figura 6C** no llegan a las 300 Tn C/Ha, a corto plazo

(10 años). Si consideramos un periodo a largo plazo (100 años) estas diferencias aumentan considerablemente, en torno a unos 350 Tn C/Ha más en Baeza respecto a las otras dos localidades.

Existe una clara tendencia a corto, medio y largo plazo en la cantidad de C orgánico retenido en el suelo. Así, el tipo de manejo en el que la cantidad de carbono retenido en el suelo a largo plazo (100 años) será mayor en presencia de cubierta vegetal (CC), encontrándose el mínimo en el manejo sin cobertura vegetal (SC) y valores intermedios cuando se emplean fertilizantes químicos (EQ), aunque a corto plazo (10 años) las cantidades de C retenido en el suelo fueran mayores usando fertilizantes (**Figura 6B y 6C**). La tendencia temporal del carbono retenido en el suelo por un manejo sin cobertura es mantenerse siempre estable a lo largo del tiempo.

De manera similar, como se puede apreciar en la **Figura 7**, la cantidad de CO₂ (Tn/Ha), tiene la misma tendencia en las 3 localidades, es decir, una clara tendencia ascendente a corto, medio y largo plazo, pero las cantidades de CO₂ (Tn/Ha) son diferentes también en función de la localidad y del manejo de suelo. Las cantidades de CO₂ dejado de emitir a la atmosfera son mayores con el manejo de una cubierta vegetal, seguido del manejo con uso de fertilizantes y por último el manejo sin cobertura. Estas diferentes cantidades para el mismo manejo en las 3 localidades se deben a las condiciones climáticas y tipo de suelo.

En la **Figura 6** se observa, como en el caso de retención de C orgánico en el suelo, que la localidad de Baeza (**Figura 7A**) es la que más CO₂ ha dejado de emitir (2000 Tn CO₂/Ha) a corto plazo a la atmosfera, llegando a ser aproximadamente el doble que las otras dos localidades en cuanto a corto plazo (10 años). A medida que aumentamos el plazo, esta diferencia de CO₂ dejado de emitir entre Baeza y Chilluévar y Marmolejo es cada vez mayor, por lo que está estrictamente relacionado el C orgánico total retenido en el suelo, con el CO₂ dejado de emitir a la atmosfera.

Y de igual manera que el C orgánico retenido, el CO₂ tiene una tendencia clara de mayor a menor cantidad en los manejos CC, EQ y SC, respectivamente.

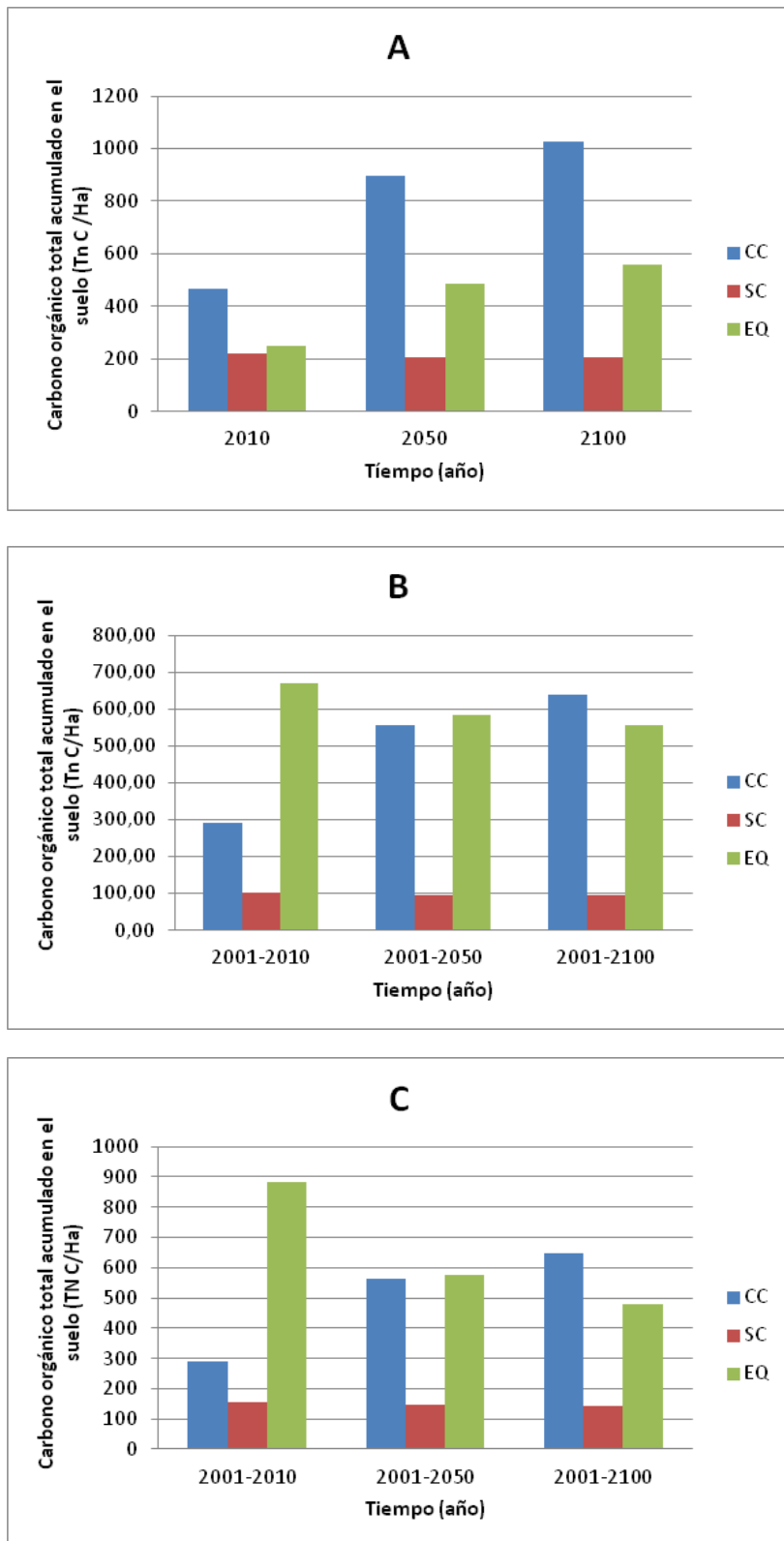


Figura 6. Cantidad de C orgánico total secuestrado en el suelo en las 3 zonas, con sus 3 respectivos manejos de suelo. A) Baeza, B) Chilluévar y C) Marmolejo.

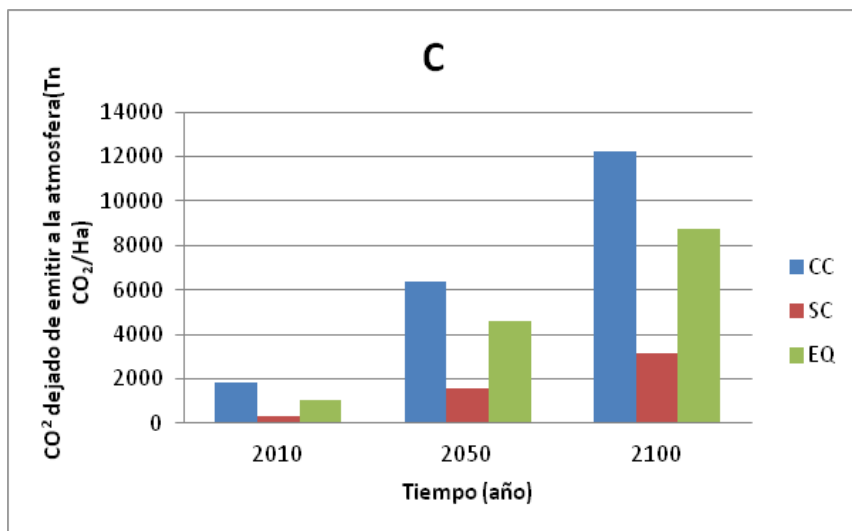
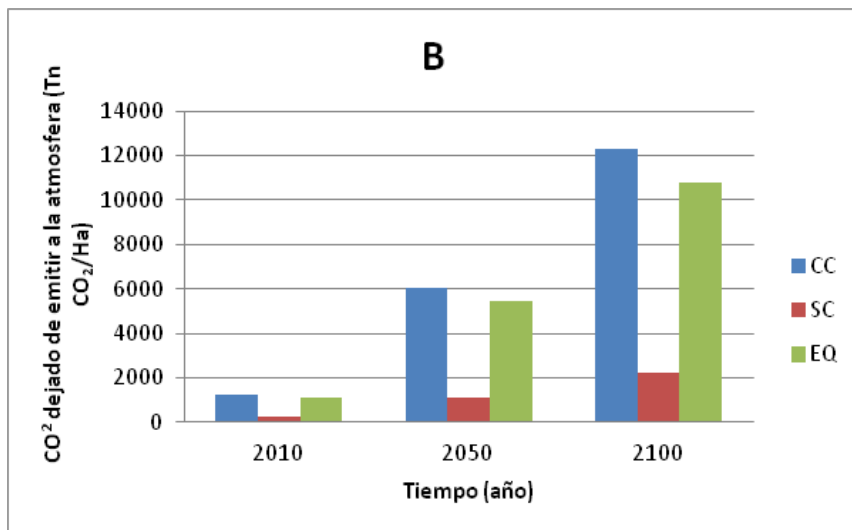
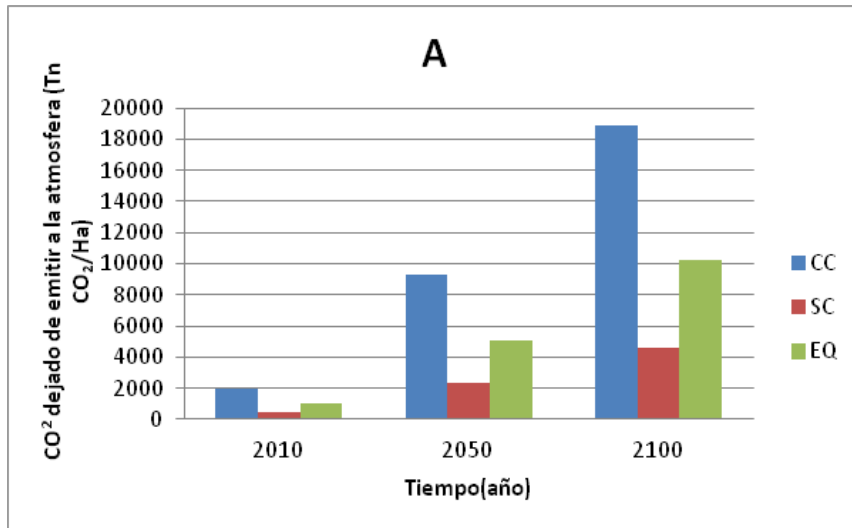


Figura 7. CO₂ (Tn/Ha) que se ha dejado de emitir en las 3 zonas, con sus 3 respectivos manejos, desde el año 2000, al cabo de 10, 50 y 100 años. A) Baeza, B) Chilluívar y C) Marmolejo.

En cuanto a una evolución temporal más detallada en la **Figura 8**, observamos cómo evoluciona el C orgánico total en las diferentes localidades, según el manejo empleado en periodos de 10 años a lo largo de un siglo completo, considerando las condiciones climáticas actuales como constantes durante ese periodo. Todas siguen la misma tendencia, que es la de estabilizarse llegado unos años, cuando se alcanza la máxima capacidad de retención de C en un suelo concreto. Cuando se estabilizan, el C contenido en el manejo dejando cubierta vegetal (CC) es siempre superior a los otros dos tipos de manejo, en la localidad de Baeza llega a superar los 1000 Tn/Ha cuando se estabiliza (CC) pero no llega a superar las 600 Tn/Ha para un manejo con fertilizantes químicos (EQ). Mientras que en las localidades de Chilluévar y Marmolejo la cantidad para el manejo CC se encuentra en un valor superior a 600 Tn/Ha cuando se estabiliza, pero con el manejo EQ no llega a 600 Tn/Ha en la localidad de Chilluévar (**Figura 8B**) y en la localidad de Marmolejo (**Figura 8C**) no llega a 500 Tn/Ha. Si hablamos de un manejo de suelo sin cubierta (SC), en el caso de Baeza (**Figura 8A**) se mantiene constante en un valor aproximado a 200 Tn/Ha, en Chilluévar (**Figura 8B**) 100 Tn/Ha y en Marmolejo 150 Tn/Ha (**Figura 9C**)

Esto quiere decir que en periodos cortos de tiempo si hacemos un uso mayor de fertilizante (manejo EQ), este, retendrá mayor cantidad de C durante los primeros años, como es el caso de las localidades de Chilluévar (**Figura 8B**) y Marmolejo (**Figura 8C**). En el caso de emplear un manejo cuyo fin es no tener una cubierta vegetal, la cantidad de C siempre se mantendrá estable durante el paso de los años y muy por debajo de lo encontrado en los casos en que se deja cubierta vegetal (CC y EQ)

Como ya hemos visto anteriormente en la **Figura 6** la cantidad de C orgánico total (Tn/Ha) varía en función de las localidades, por sus diferencias climatológicas y por el tipo de suelo. Este patrón se repite cuando se evalúa la tendencia temporal aunque las dinámicas son distintas ya que, en general, en el manejo CC siempre hay un incremento de la cantidad de C retenido que se va saturando con el tiempo hasta que se alcanza la máxima capacidad de

retención de C en el suelo (**Figura 8A**), mientras que la fertilización química provoca un rápido incremento del C orgánico retenido debido al rápido aporte de nutrientes aunque la cantidad de C retenido disminuye a lo largo del tiempo. Finalmente, la ausencia de cubierta vegetal justifica la tendencia sin variaciones y con bajos valores (entre 100 y 200 Tn/Ha) en todas las localidades y para el manejo SC.

En la **Tabla 4**, observamos en las 3 localidades que la tasa anual de carbono acumulado es menor a medida que aumenta el número de años transcurridos, esto quiere decir que los suelos tienen una mayor capacidad de acumular C los primeros años hasta que con el paso del tiempo tiende a estabilizarse, disminuyendo gradualmente la velocidad de acumulación. Así, las tasas de acumulación de C van bajando a lo largo de los 100 años en el manejo CC de 46.65 hasta 10.25 en Baeza, de 29.23 a 6.39 en Chilluévar y de 28.92 a 6.49 en Marmolejo. Dicha tasa, en ese periodo también disminuye en el manejo EQ de 25.17 a 5.57 en Baeza, de 67.05 a 5.55 en Chilluévar y de 88.2 a 4.79 en Marmolejo. Para el manejo SC, sigue con la misma dinámica de descenso en los 100 años, siendo el descenso de 22.03 A 2.06 en Baeza, de 10.14 a 0.94 en Chilluévar y de 15.52 a 1.45 en Marmolejo

El C orgánico retenido en el suelo en las tres localidades y los tres manejos se distribuye de distinta manera en las distintas fracciones en que puede encontrarse en el suelo y que considera el modelo. Así, en la **Tabla 5**, se observa que la mayor parte del C, se encuentra en todos los casos (localidades y tipos de manejo) en la fracción húmica y con el paso del tiempo, la importancia de esta fracción en las cantidades de C va incrementando, tanto a medio como a largo plazo. Este incremento provoca que las demás fracciones del C disminuyan a lo largo del tiempo. Como es el caso de Baeza para un manejo con cubierta vegetal (CC) en la que la cantidad de carbono en la fracción HUM es de 58.59% y con el paso del tiempo aumenta hasta ser del 81.01%, mientras que la fracción RPM sufre un descenso del 30.39% al 13.76%. Con el manejo de suelo EQ los aumentos y descenso en las fracciones son prácticamente idénticos. El manejo de suelo sin cubierta (SC) es el que menos variación, la fracción HUM varía de un 82.29% a un 81,06%,

mientras que la fracción RPM varía de un 12.21% a 13.08%, esto se debe a que no recibe una aportación de C del exterior.

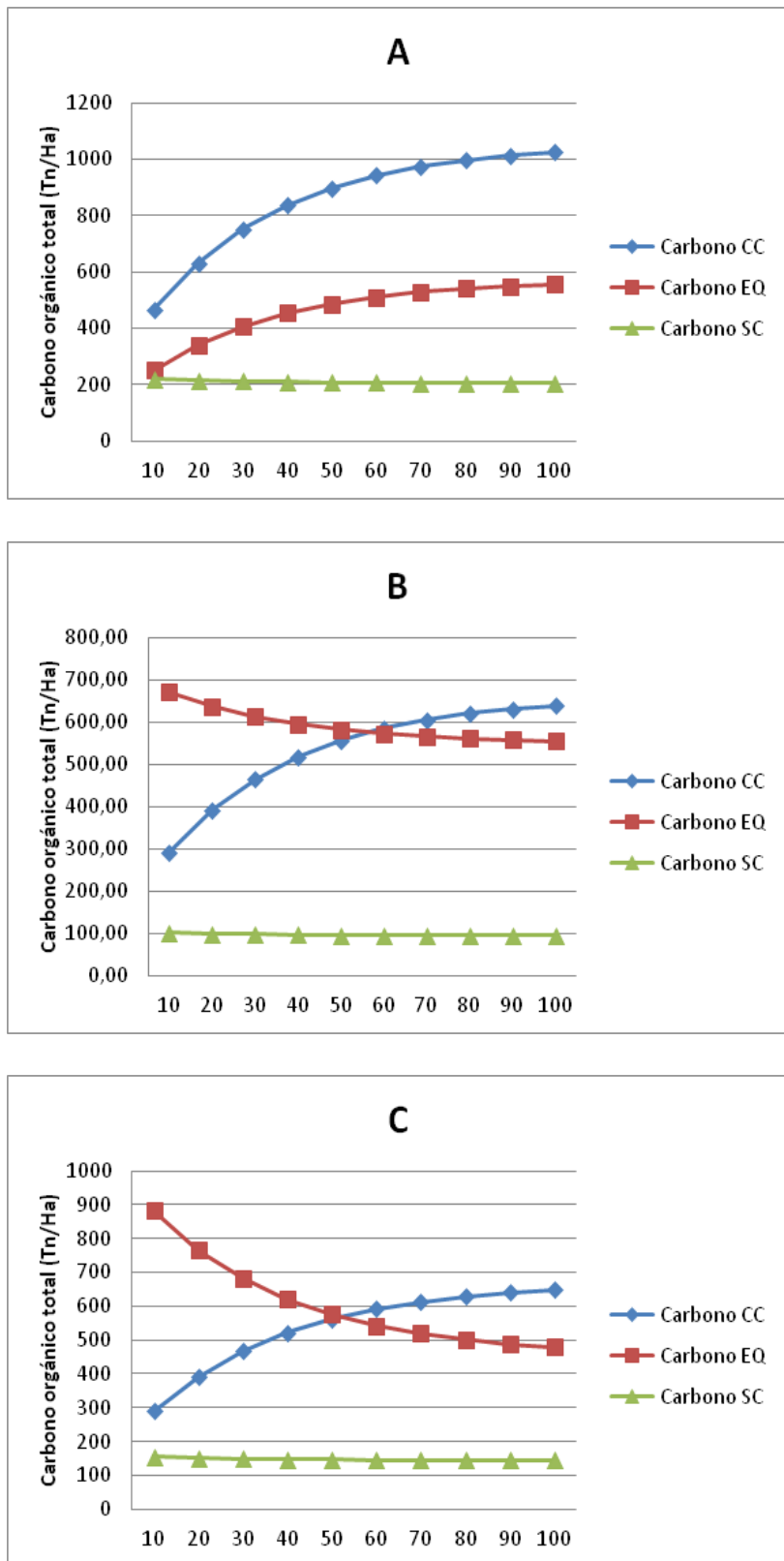


Figura 8. Evolución a lo largo de 100 años del C acumulado en el suelo en las 3 zonas con sus 3 respectivos manejos. A) Baeza, B) Chilluévar y C) Marmolejo.

Tabla 4 Cantidad de C orgánico (Tn C/ha) presente en el suelo al inicio y al final de periodo considerado de 100 años, C total acumulado (Tn C/ ha) y tasa de acumulación anual (Tn C/ha año) al cabo de 10, 50 y 100 años en los tres tipos de manejo y las tres localidades estudiadas, tasa anual de carbón acumulado en 10, 50 y 100 años. A) Baeza, B) Chilluévar y C) Marmolejo

A

C orgánico total en el suelo						
Manejo	Inicial	Final	C orgánico acumulado	Tasa de acumulación		
				10 años	50 años	100 años
CC	45,9	148	102,1	46,65	17,96	10,25
EQ	45,9	59,9	14	25,17	9,74	5,57
SC	45,9	45,9	0	22,03	4,17	2,06

B

C orgánico total en el suelo						
Manejo	Inicial	Final	C orgánico acumulado	Tasa anual carbón acumulado		
				10 años	50 años	100 años
CC	21,9	104,2	82,3	29,23	11,13	6,39
EQ	21,9	33,6	11,7	67,05	11,64	5,55
SC	21,9	21,9	0	10,14	1,92	0,94

C

C orgánico total en el suelo						
Manejo	Inicial	Final	C orgánico acumulado	Tasa anual carbón acumulado		
				10 años		100 años
				10 años	50 años	
CC	31,4	87,9	56,5	28,92	11,24	6,49
EQ	31,4	49,4	18	88,2	11,52	4,79
SC	31,4	31,4	0	15,52	2,93	1,45

Tabla 5. Distribución del C secuestrado en el suelo en las distintas fracciones, en porcentajes respecto al total en 10, 50 y 100 años para las 3 zonas y sus 3 respectivos manejos. A) Baeza, B) Chilluévar y C) Marmolejo

A CC

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	3,38	30,39	4,52	58,59	3,11
2050	1,76	15,71	2,54	78,38	1,62
2100	1,54	13,76	2,28	81,01	1,42

A SC

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	1,71	12,21	2,05	82,29	1,74
2050	1,81	12,92	2,15	81,29	1,84
2100	1,83	13,08	2,17	81,06	1,86

A EQ

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	3,51	30,62	4,55	59,26	2,06
2050	1,81	15,74	2,54	78,84	1,06
2100	1,59	13,78	2,28	81,43	0,93

B CC

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	3,98	33,44	4,41	54,84	3,33
2050	2,09	17,45	2,49	76,22	1,75
2100	1,82	15,20	2,22	79,24	1,52

B SC

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	1,89	13,46	2,00	81,02	1,63
2050	1,99	14,24	2,09	79,95	1,72
2100	2,02	14,44	2,12	79,68	1,75

B EQ

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	1,47	12,11	1,84	84,18	0,40
2050	1,70	13,92	2,06	81,86	0,46
2100	1,78	14,61	2,15	80,98	0,48

C CC

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	3,78	32,00	4,58	56,87	2,77
2050	1,94	16,37	2,54	77,72	1,43
2100	1,68	14,18	2,26	80,64	1,24

C SC

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	0,94	6,71	1,09	44,05	0,86
2050	0,48	3,45	0,56	21,15	0,44
2100	2,99	0,48	18,02	0,38	22,29

C EQ

Año final	DPM (%)	RPM (%)	BIO (%)	HUM (%)	IOM (%)
2010	2,58	21,62	4,06	275,26	1,44
2050	1,33	11,06	1,86	87,49	0,74
2100	1,55	60,93	0,64	73,85	0,64

3.2. Capacidad de secuestro de C bajo condiciones de cambio climático

Las condiciones climáticas son, junto con el tipo de suelo, los principales factores que modulan la capacidad de secuestro de C en el suelo. La existencia de cambios de clima a escala global debería modificar, por tanto, las condiciones climáticas y la cantidad de C secuestrado en cultivos de olivar de la provincia de Jaén. Así, como se observa en la **Figura 9, 10 y 11**, la cantidad de C retenido ha variado en gran medida en función de los cambios simulados en la temperatura a largo plazo, durante el próximo siglo. A medida que se ha aumentado la temperatura (su incremento durante los próximos 100 años) de acuerdo con los distintos escenarios de cambio climático considerados, la cantidad de C retenido en el suelo se ha reducido aunque sin separarse de la tendencia general anteriormente vista (**Figura 8**) de estabilización con el tiempo, es decir, de saturación de la capacidad de retención (independientemente del manejo de suelo usado). Esta tendencia general de descenso es común para todas las localidades y manejos, de manera que lo que provoca una variación en las cantidades de C retenido (Tn/Ha), es el tipo de manejo que se realiza sobre el suelo y la localidad, como ya pudimos observar en la **Figura 6**.

Se puede observar que en la localidad de Baeza (**Figura 9**), los valores obtenidos en CC (superior a 800 Tn/Ha) y SC (superior a 150 Tn/Ha) son superiores con una condición de cambio climático de un aumento de temperatura de 4.5°C a los valores de las localidades de Chilluévar (**Figura 10**) y Marmolejo (**Figura 11**) sin condiciones de cambio climático, por lo que podemos destacar la especial importancia de la textura del suelo en cuanto al C orgánico retenido. En cuanto al manejo EQ, no es superior pero si se encuentra muy próximo, bajo las condiciones anteriormente dichas.

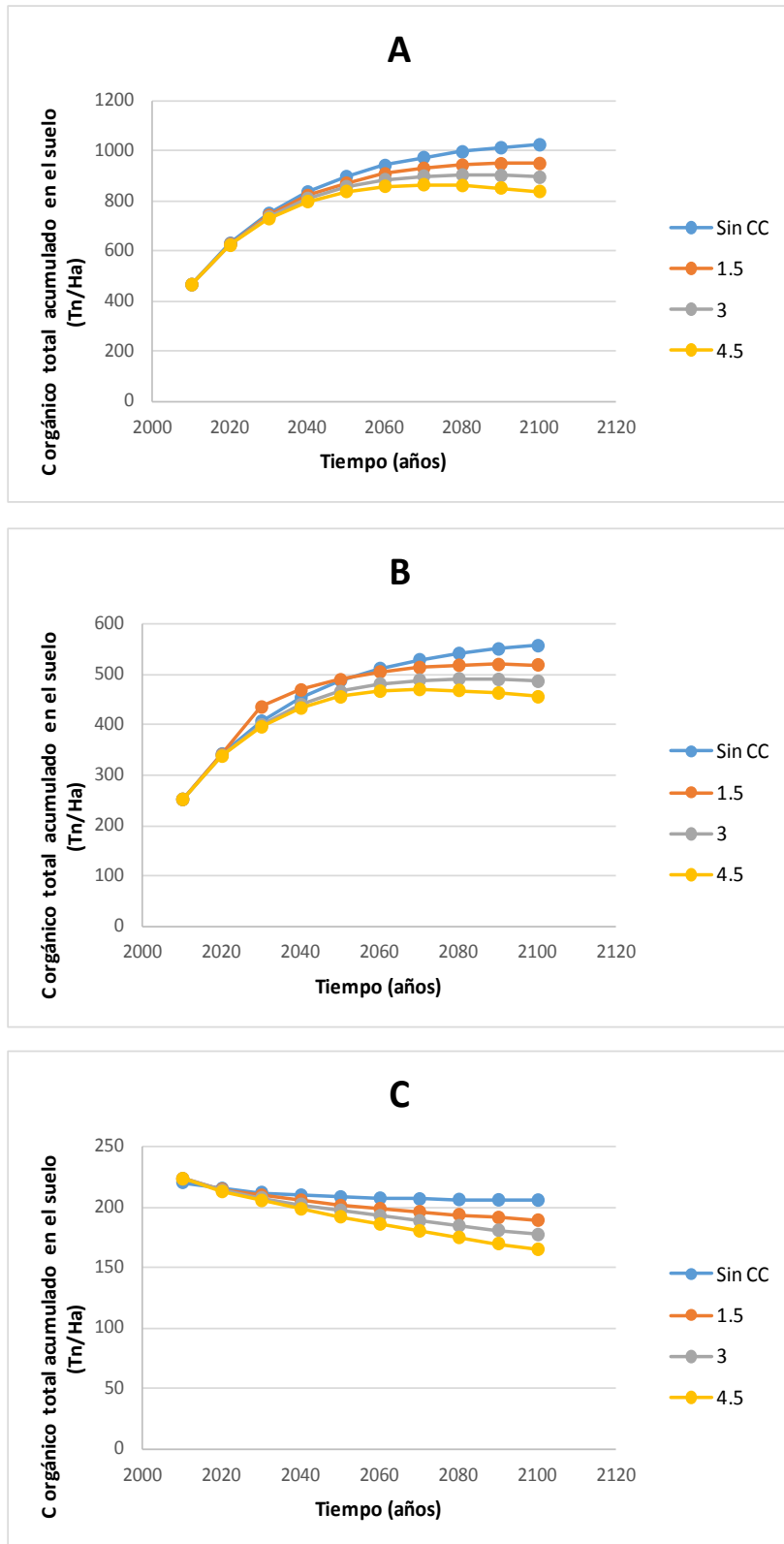


Figura 9.C orgánico total secuestrado en el suelo en Baeza, en los tres tipos de manejo de suelo en los próximos 100 años bajo 3 escenarios distintos de incremento de temperatura y un escenario de variabilidad en las precipitaciones, comparado con el modelo sin incluir el cambio climático.

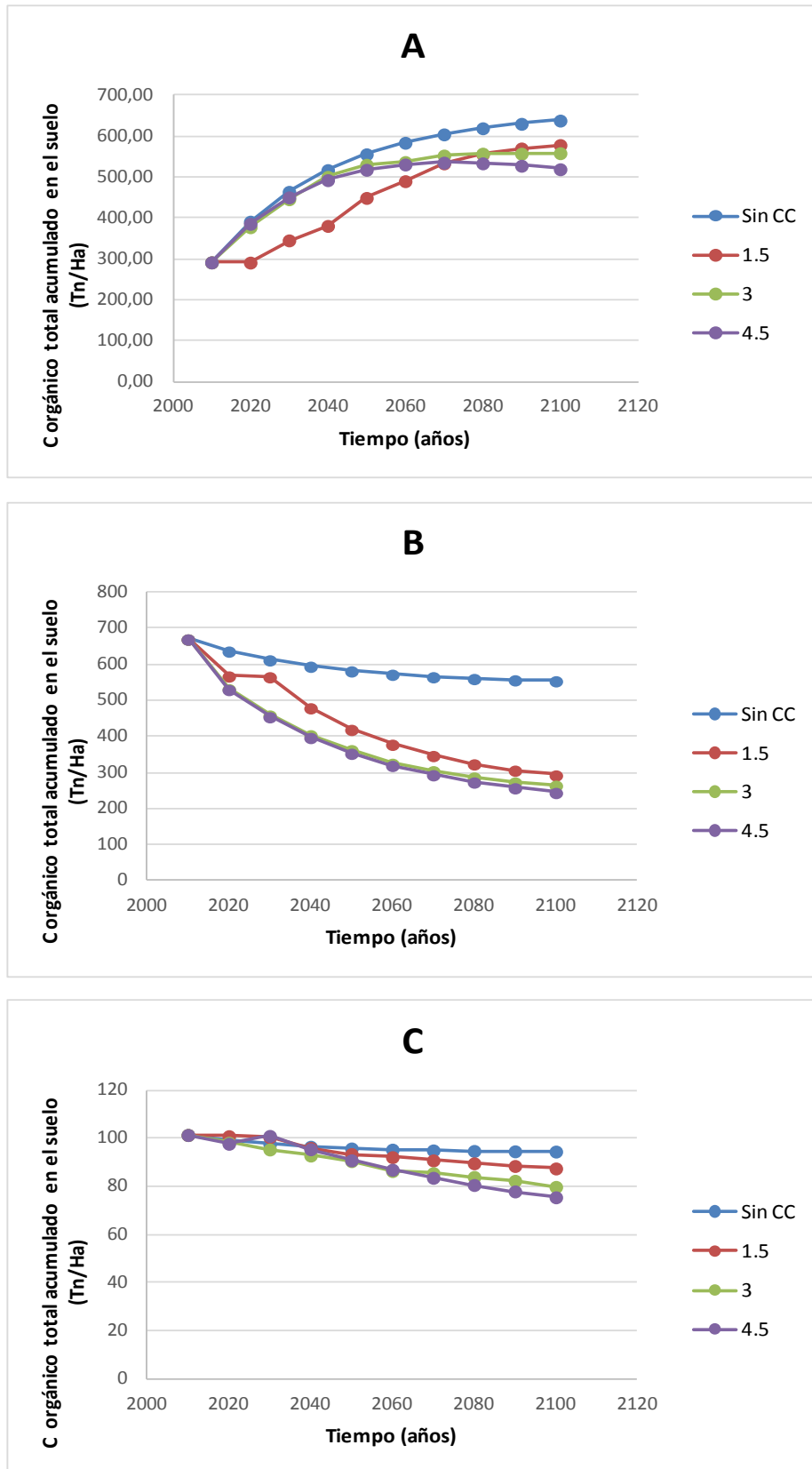


Figura 10. C orgánico total secuestrado en el suelo en Chilluévar, en los tres tipos de manejo de suelo en los próximos 100 años bajo 3 escenarios distintos de incremento de temperatura y un escenario de variabilidad en las precipitaciones, comparado con el modelo sin incluir el cambio climático.

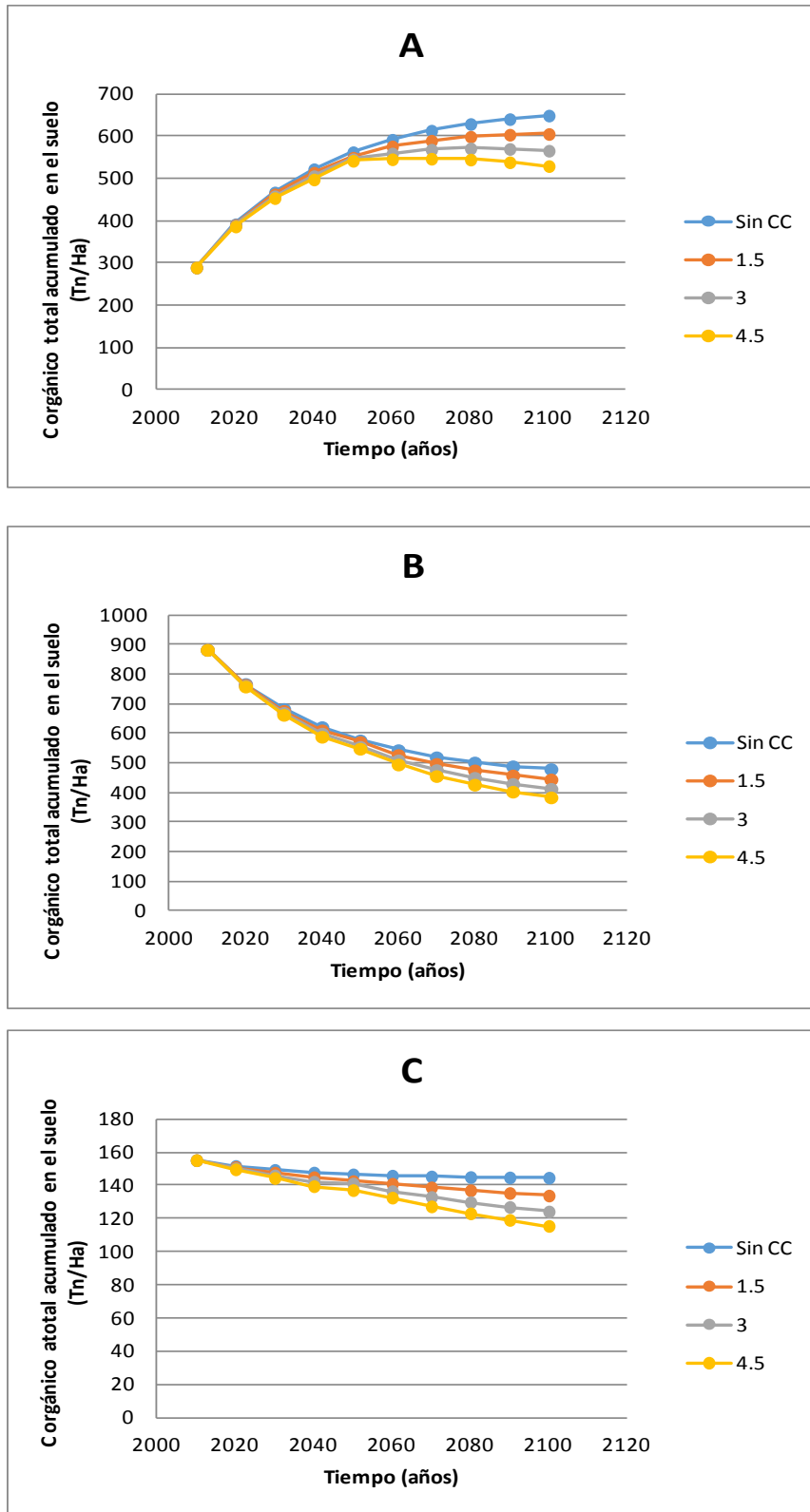


Figura 11. C orgánico total secuestrado en el suelo en Marmolejo, en los tres tipos de manejo de suelo en los próximos 100 años bajo 3 escenarios distintos de incremento de temperatura y un escenario de variabilidad en las precipitaciones, comparado con el modelo sin incluir el cambio climático.

También bajo diferentes escenarios de cambio climático, el CO₂ dejado de emitir a la atmosfera, disminuye considerablemente en las localidades Baeza (**Figura 12**) y Chilluévar (**Figura 13**) cuando se produce un aumento a largo plazo de la temperatura, aunque la disminución de la capacidad de retención (CO₂ no emitido) es independiente del incremento de temperatura. En el caso de Marmolejo (**Figura 14**) esa disminución es mucho menor aplicando los mismos incrementos de temperatura (mismos escenarios de cambio climático), lo que sugiere que dicha disminución está provocada por el tipo de suelo de dicha localidad.

En Baeza los valores a largo plazo (100 años) se reducen de algo menos de 200 Tn CO₂/Ha a aproximadamente 25 Tn CO₂/Ha para un manejo CC, para un manejo EQ esta variación es de un valor de 120 Tn CO₂/Ha a entorno 10 Tn CO₂/Ha. En cuanto al manejo SC la variación es de un valor entorno a Tn CO₂/Ha a menos de 5 Tn CO₂/Ha.

La localidad de Chilluévar en el mismo plazo sufre estas grandes variaciones, siendo para el manejo CC de 125 Tn CO₂/Ha a algo más de 10 Tn CO₂/Ha. Para un manejo de suelo EQ la variación es prácticamente la misma que para el manejo CC, mientras que en el manejo SC se produce una variación de entorno 23 Tn CO₂/Ha a un valor aproximado de 3 Tn CO₂/Ha

La localidad de Marmolejo, siguiendo en el mismo plazo, sufre menores variaciones, llegando incluso a estabilizarse en un valor prácticamente idéntico.

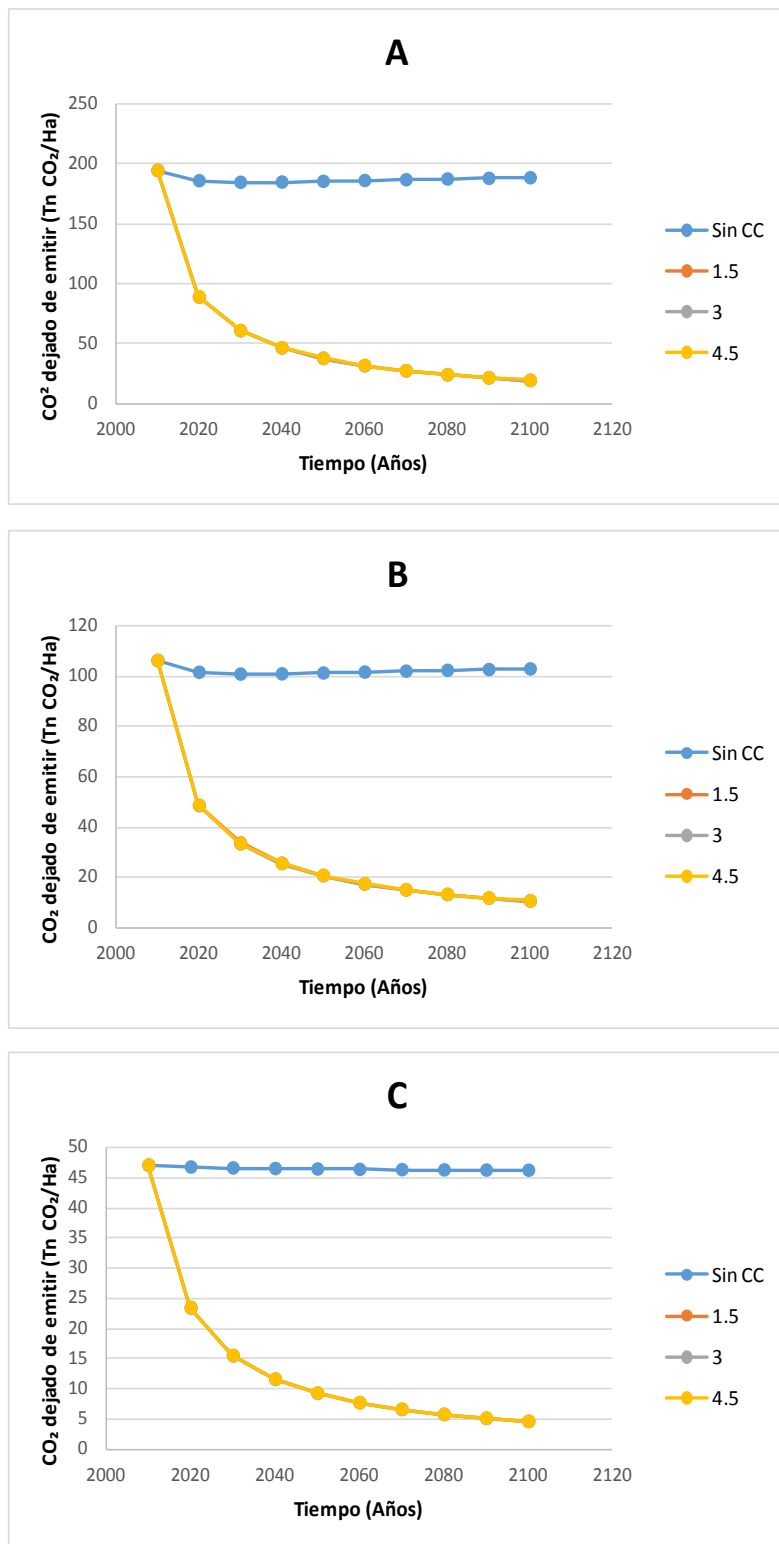


Figura 12. CO₂ dejado de emitir a la atmosfera como consecuencia del secuestro de C orgánico en el suelo de Baeza en los tres tipos de manejo de suelo en los próximos 100 años bajo 3 escenarios distintos de incremento de temperatura y un escenario de variabilidad en las precipitaciones, comparado con el modelo sin incluir el cambio climático.

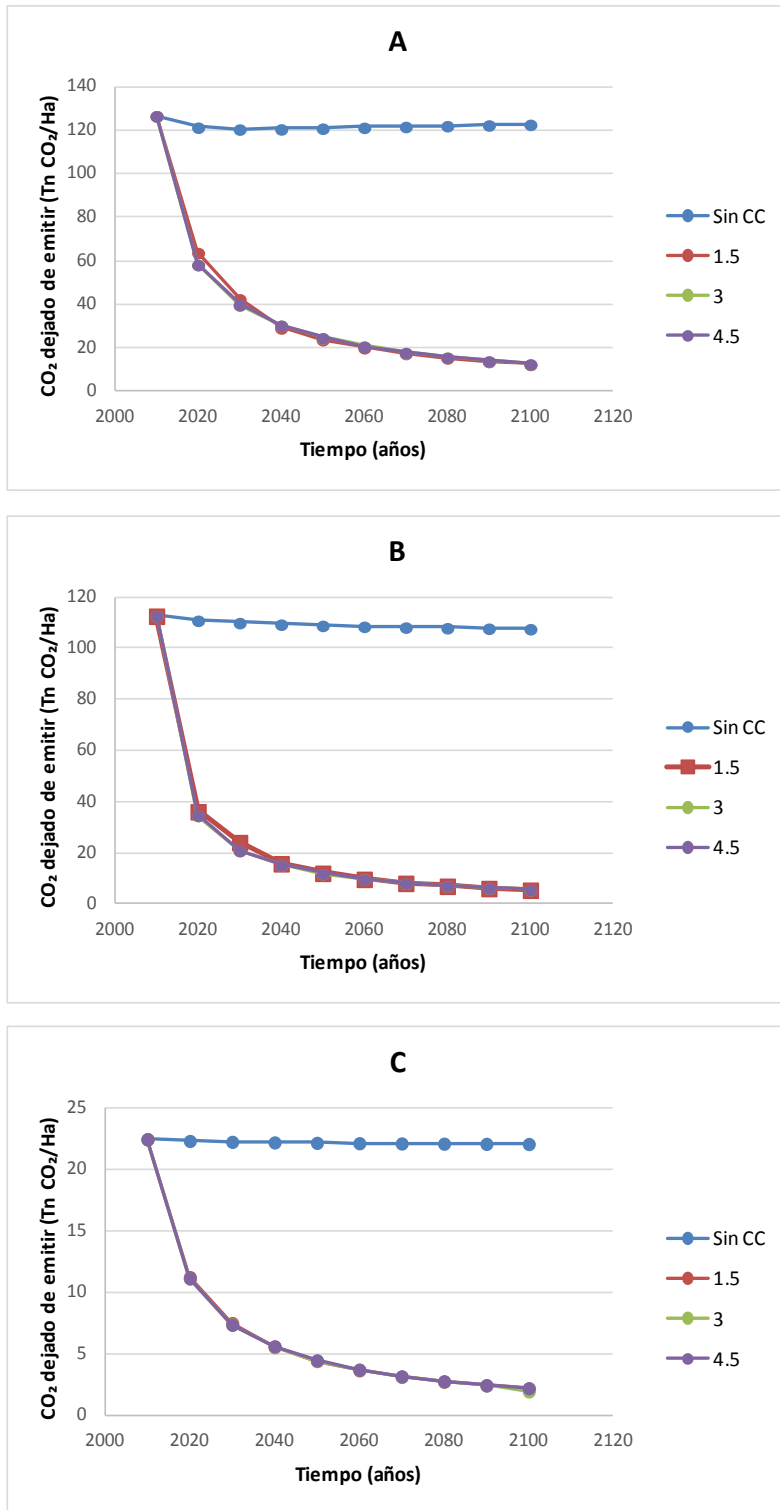


Figura 13. CO₂ dejado de emitir a la atmosfera como consecuencia del secuestro de C orgánico en el suelo de Chilluévar en los tres tipos de manejo de suelo en los próximos 100 años bajo 3 escenarios distintos de incremento de temperatura y un escenario de variabilidad en las precipitaciones, comparado con el modelo sin incluir el cambio climático.

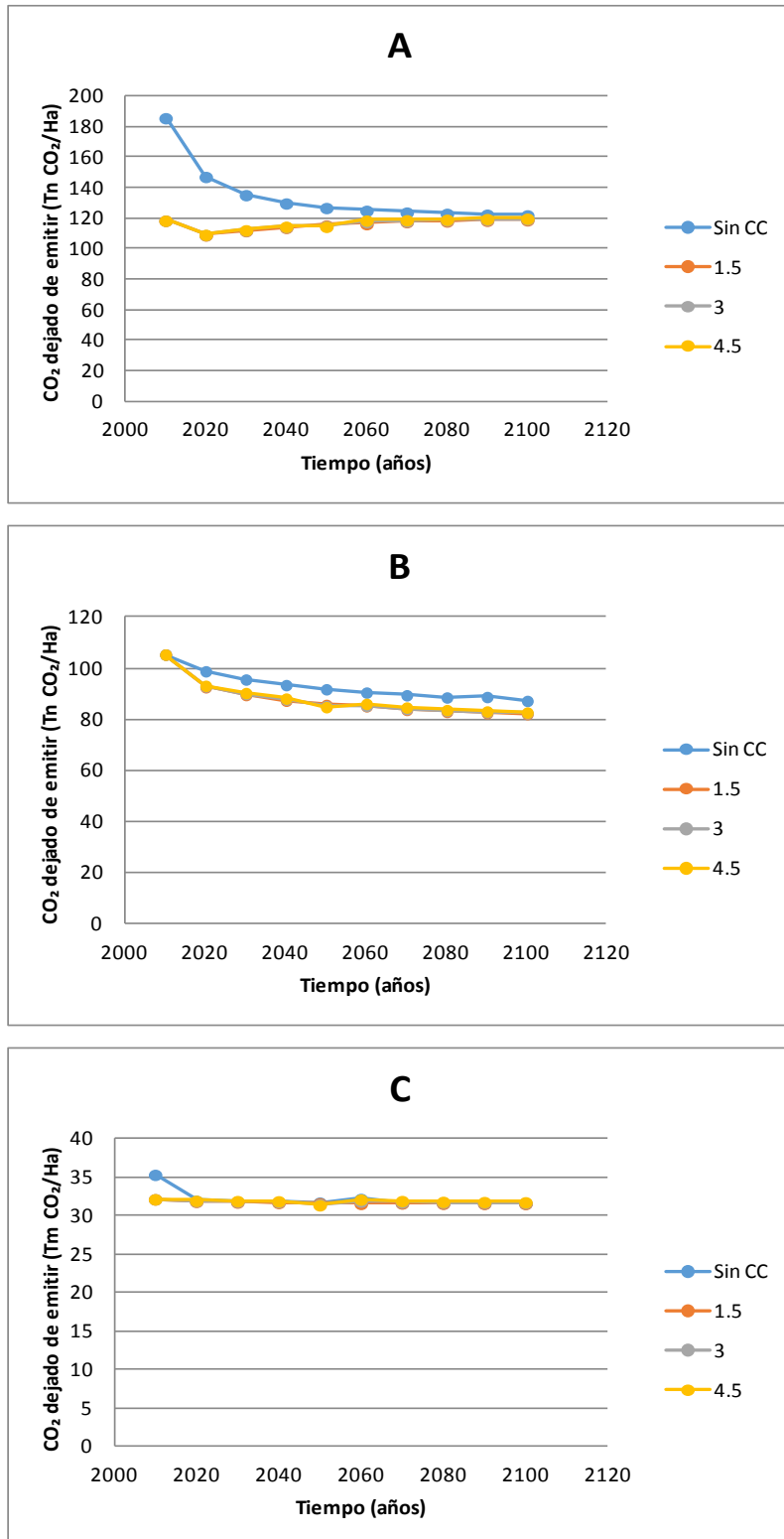


Figura 14. CO₂ dejado de emitir a la atmosfera como consecuencia del secuestro de C orgánico en el suelo de Marmolejo en los tres tipos de manejo de suelo en los próximos 100 años bajo 3 escenarios distintos de incremento de temperatura y un escenario de variabilidad en las precipitaciones, comparado con el modelo sin incluir el cambio climático.

Finalmente, como hemos visto anteriormente el incremento de temperatura provoca un descenso de la cantidad de C retenido en el suelo. En la **Tabla 6**, se muestra en porcentajes ese descenso en la capacidad de retención de C orgánico, con valores que varía en función de la localidad y sobre todo el tipo de manejo. En todo caso es siempre mayor ese descenso cuanto mayor es el incremento de temperatura. Para un manejo sin cubierta vegetal (SC) se puede llegar a un 20% reducción en la capacidad de retención de C y para un manejo CC se puede llegar hasta un 18.5%. En el caso de EQ la variación puede llegar a ser mucho mayor, hasta un 56%.

Tabla 6. Porcentaje del C que se ha dejado de retener en el suelo en el periodo 2000-2100 como consecuencia del incremento de temperatura asociado a procesos de cambio climático a escala global para los tres tipos de manejo y las tres localidades bajo diferentes escenarios de incremento de temperatura.

	Baeza			Chilluévar			Marmolejo		
ΔT (°C)	1.5	3	4.5	1.5	3	4.5	1.5	3	4.5
CC	7.30	12.65	18.17	9.36	12.47	18.61	6.72	12.82	18.42
EQ	6.83	12.68	18.21	47.04	52.17	55.79	7.31	13.96	19.98
SC	8.06	13.86	19.77	7.43	15.53	20.10	7.46	14.11	20.13

4. Discusión

La influencia del ser humano sobre el clima a escala global se ha incrementado de forma radical a partir del periodo de desarrollo industrial, contribuyendo a estos cambios especialmente la quema de combustibles fósiles y evidenciándose los impactos del cambio climático especialmente sobre los sistemas naturales aunque hay crecientes evidencias de un efecto cada vez mayor sobre los sistemas humanos (IPCC2014)

A los cambios del clima, tanto a escala global como local, ha contribuido también el aumento de la superficie dedicada a la agricultura, gracias a los

procesos de deforestación de ecosistemas forestales, lo que ha supuesto importantes cambios en el uso del territorio y ha disminuido la capacidad de secuestro de C por parte de los mismos. Además, el incremento del uso de recursos en la actividad agrícola moderna, fundamentalmente en el proceso de producir, almacenar, elaborar, envasar, transportar, preparar y servir los alimentos que consumimos, se ve reflejado, asimismo, en procesos de cambio climático global.

Sin embargo, los cultivos también tienen una determinada capacidad de secuestrar C atmosférico mediante la producción primaria y especialmente mediante el secuestro en el compartimento del suelo, que suele estar especialmente desprovisto de C en determinados cultivos donde se elimina cualquier vegetación adventicia, como es el caso de los cultivos de olivar convencionales. Así, la agricultura también puede jugar un papel muy importante como sumidero de C, ya que el CO₂ que fijan las plantas se almacenan en el suelo a través de los exudados de sus raíces, comportándose como un sumidero a largo plazo, mientras que el C contenido en la cosecha y subproductos se comporta como un sumidero temporal. Por tanto este sumidero temporal puede tener un importante papel en las políticas de mitigación del cambio climático, ya que, la fijación por la planta y por lo tanto la retirada de CO₂ de la atmósfera se renueva año a año en los cultivos.

Como se puede observar en la **Figura 6**, el tipo de suelo y los diferentes manejos de suelo, dejando una cubierta vegetal o no dejándola influye directamente en la cantidad de C que puede retener dicho suelo. El tipo de manejo en que se deja una cubierta, tradicionalmente una actividad exclusiva de la agricultura ecológica, se está extendiendo cada vez más a otros tipos de manejos (convencionales, integrados) y cada uno está más en aumento en Europa gracias especialmente a subvenciones.

Aunque la presencia de cubierta parece ser el principal factor que favorece el secuestro de C en cultivos de olivar no hay que olvidar que las propias características del suelo también contribuyen. Así, un suelo con una mayor cantidad de arcilla en su composición, va a retener más C que un suelo con una

menor cantidad de arcilla. Por lo tanto la textura es muy importante a tener en cuenta a la hora de evaluar la capacidad de retención de C de un cultivo. Si se permite la presencia de cubierta vegetal (cultivos denominados CC en este trabajo), el suelo retendrá una mayor cantidad de C a largo plazo (100 años) que un suelo en el que se han usado fertilizantes (EQ), aunque a corto plazo este sea mayor gracias al mayor desarrollo a corto plazo de la cubierta asociada a la presencia de nutrientes inorgánicos, como podemos observar en la **Figura 6B** y **6C**. En un suelo en el que la cubierta sea inexistente (SC), la cantidad de C retenido siempre va a ser mucho menor que un suelo que sí posea dicha cubierta.

Confirman estos resultados la importancia de la agricultura ecológica, en la que se deja una cubierta vegetal, que juega un papel muy importante a la hora de luchar contra el cambio climático, dejando de emitir mayores cantidades de CO₂ a la atmosfera como se puede observar en la **Figura 7**.

En la **Figura 8**, se observan las dinámicas que presenta cada manejo de suelo, en función de la localidad. En las 3 localidades se observan dos tendencias claras. En el manejo del suelo con cubierta vegetal (CC), a lo largo del tiempo va incrementando hasta estabilizarse a largo plazo (100 años), debido a que el suelo alcanza su máxima capacidad de retención de C, es decir, se alcanza saturación de esa capacidad. La otra tendencia clara es que un manejo de suelo sin cubierta vegetal (SC) se mantiene estable, reteniendo la misma cantidad de C, a lo largo del tiempo, ya que no estamos añadiendo ese C adicional que presenta la cubierta vegetal.

Respecto al suelo que presenta un manejo de suelo aplicando fertilizantes químicos, se observa en la misma **Figura 8B**, que la cantidad de C retenido en el suelo en los primeros años es mayor que en presencia de cubierta vegetal (manejo CC), pudiendo ser esto debido a la presencia de fertilizantes químicos que aportan nutrientes a corto plazo. Para el manejo EQ, la cantidad de C retenido aumenta o disminuye en función de la cantidad de fertilizantes químicos que se hayan usado a corto plazo, aunque al igual que en el caso del manejo CC, se estabiliza a lo largo del tiempo, alcanzándose la saturación,

siendo menor el C retenido que en el caso de con cubierta vegetal (CC) ya que en este último, se aportan nutrientes a largo plazo.

Este patrón de incremento a corto plazo y estabilización a largo plazo ha sido ampliamente descrito ya que llega un momento en que se compensan las cantidades del C retenido en el suelo y del CO₂ emitido, es decir, los inputs de C al ecosistema son idénticos a los outputs de C desde el mismo, por lo que el pool de C del suelo permanece constante. Por tanto, el C se acumula de forma más eficiente durante los primeros años de un tipo de manejo (Six et al., 2002; Stewart et al., 2007).

Por otro lado, no hay que olvidar que el modelo que se ha empleado en este trabajo ha sido diseñado para ecosistemas y cultivos de zonas templadas, por lo que puede no estar adaptado de forma correcta para los ecosistemas mediterráneos, sobreestimando las tasas de descomposición al considerar mayores disponibilidades hídricas que las que se dan de forma habitual en nuestras latitudes, como ya ha sido señalado previamente por Vicente (2017). Esto puede ser especialmente importante cuando se consideran eventos de cambio climático, como se ha intentado en este trabajo. Así, como se observa en la **Figura 9, 10 y 11**, independientemente de la localidad y del manejo de suelo que usemos, el cambio climático influye significativamente en el secuestro de C. Cuanto mayor sea el aumento de la temperatura con respecto a la actual, la cantidad de C retenido disminuye, con la consecuencia de una mayor cantidad de CO₂ en la atmósfera, y este CO₂ conlleva un aumento de temperatura, provocando así feedback negativo que magnifica el proceso a largo plazo. El efecto de la temperatura se debe a un incremento en las tasas de descomposición y mineralización de la materia orgánica del suelo, lo que provoca un incremento en las tasas de respiración y una reducción en el contenido de C secuestrado (Vicente, 2017)

Por último, si consideramos el papel como sumidero de C que pueden ejercer las explotaciones agrícolas, la disminución de esta capacidad debida al cambio en las condiciones climáticas, puede incluso suponer de tipo económico.

En el año 1990, en el que se realizó la cumbre de Kioto, España emitía 285.9 millones de toneladas de CO₂. España emite actualmente 328.7 millones de toneladas de CO₂ (www.publico.es/sociedad/emisiones-co2-espana-reduce-emisiones.html) en este contexto la provincia de Jaén juega un papel muy importante en que esa cantidad de CO₂ emitido no sea superior, ya que el suelo del olivar (586173 Ha en la provincia de Jaén) (www.europapress.es) estaría actuando actualmente como sumidero de C y por lo tanto contribuyendo a que se reduzcan las emisiones de CO₂. Esta cantidad de C retenido en el suelo podría ser superior si toda la superficie de olivar, fuera de olivar ecológico (actualmente 9380 Ha en la provincia de Jaén) (www.diariojaen.es), o al menos dejara una cubierta vegetal, aumentando así la capacidad de retención de C. Pero la realidad es otra, y es que según los cambios de temperatura que se prevén (IPCC 2014), y de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se producirá un descenso del C retenido en el suelo, independientemente del manejo de suelo que practiquemos, y por lo tanto una mayor emisión de CO₂, disminuyendo así la posible rentabilidad económica con el tiempo.

5. Conclusiones

Como hemos observado a lo largo de todo este proyecto, la cantidad de C orgánico presente en el suelo depende de diferentes variables, entre ellas, se encuentran:

- El clima; Concretamente la temperatura y la precipitación, y por lo tanto la evapotranspiración, provoca que varíe la cantidad de C orgánico en el suelo por lo que habrá que darle una especial importancia en este ámbito al cambio climático
- En cuanto al suelo; La cantidad de arcilla que disponga el suelo influirá directamente en la cantidad de C orgánico que es capaz de retener el suelo. Así, a mayor cantidad de arcilla mayor será el contenido de C en el suelo, por lo que en el futuro deberemos tener en cuenta la importancia de este, evitando los problemas de erosión, que es la principal causa de la pérdida de suelo y por lo tanto arcilla.

- La presencia de cubierta vegetal; Este es, sin duda, el factor más importante a la hora de evaluar cómo varía la cantidad de C orgánico en el suelo. Un suelo que contenga una cubierta vegetal retiene cantidades mucho mayores que un suelo en el que no esté presente dicha cubierta, incluso cuando se han utilizado fertilizantes químicos. Esto nos lleva a la importancia que tendrá la agricultura ecológica en el futuro, a la hora de frenar el cambio climático.

Pero por mucho C orgánico que se aporte al suelo, habrá un momento en el que el suelo no pueda almacenar más carbono porque llegue a su punto de saturación, es decir, que a largo plazo las tasas de respiración y secuestro se igualarán, independientemente del aporte de C orgánico que realicemos a corto plazo. La mejor opción es de disponer un suelo con cubierta vegetal, ya que a largo plazo será el que más carbono retenga. El aporte de los fertilizantes químicos estimula el crecimiento de la cubierta vegetal a corto plazo por lo que se verá superado por un manejo de suelo con cubierta vegetal en un largo plazo. Un suelo con un tipo de manejo en el que no se emplee una cubierta vegetal ni un uso de fertilizantes químicos se mantendrá estable pero en valores muy por debajo de su capacidad máxima a lo largo del tiempo en cuanto a C orgánico retenido en el suelo. Por lo anteriormente dicho, reiteramos que la mejor opción es el uso de una agricultura ecológica, en la que la cubierta vegetal es permanente a lo largo del año. Además del beneficio obtenido en cuanto a cantidad de C orgánico retenido en el suelo, una cubierta vegetal evita la erosión, y por lo tanto así, la disminución de las cantidades de arcilla en el suelo.

Con todo este C orgánico que retenemos en el suelo estamos evitando que se emita a la atmósfera en forma de CO₂, y por lo tanto luchando contra el cambio climático, ya que este está considerado el principal gas con efecto invernadero. Por lo tanto si usamos un manejo de suelo con cubierta vegetal y con un suelo de textura arcillosa podremos influir directamente en el cambio climático, ya que se emitirá menos CO₂ a la atmósfera. Este CO₂ que se deja de emitir gracias al secuestro de C sigue el mismo patrón que el mencionado anteriormente para el C orgánico retenido.

En un futuro, con el aumento de la temperatura provocada por el más que evidente cambio climático, provocará un descenso en las cantidades de C orgánico retenido en el suelo, es decir, a medida que se aumente la temperatura, la cantidad de C orgánico retenido en el suelo será menor y por lo tanto habrá más emisión de CO₂ a la atmosfera, provocando un aumento de temperatura. Por lo que podemos decir, que este proceso actuará como un feedback negativo.

Como conclusión general, podemos decir gracias a este proyecto que la mejor opción para luchar contra el cambio climático dentro del campo de la agricultura es la de usar un cultivo ecológico, es decir, con la presencia permanente de una cubierta vegetal. Esta cubierta vegetal, a largo plazo, retendrá mayor cantidad de C orgánico en el suelo, disminuirá la erosión del suelo y evitará reducir las emisiones de CO₂ a la atmosfera. Todo esto influirá positivamente en la lucha contra el cambio climático.

6. Bibliografía

- Six, J., Conant, R., Paul, E., Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation. *Plant and Soil*, 241:155-176.
- Turc, L: 1961, 'Estimation of Irrigation Water Requirements, Potencial Evapotranspiration: A Simple Climatic Formula Evolved Up to Date', *Annals Agronomy* 12, 13-49.
- Stewart, C., Paustian, K., Conant, R., Plante, A., Six, J., 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biochemistry*, 86:19-31.
- Coleman K., Jenkinson D. 1996. RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. In D. Powlson, P. Smith, J. Smith (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-Term Datasets*, Vol. 38, pp. 237–246. NATO ASI Series I.

- Vicente, J.L 2017. Soil organic carbon sequestration in olive groves of Andalusia: effect of the managements on soil organic carbon dynamics. Tesis doctoral. Universidad de Jaén, 406 pp.
- Falloon, P., Smith, P., Coleman, K., Marshall, S., 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry*, 30:1207-1211
- Coleman K., Jenkinson D. 1999. RothC-26.3, A Model for the Turnover of Carbon in Soil: Model Description and User's Guide. From: <http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/carbon/rothc.htm>
- IPCC. 21014. Fifth assessment report. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.

