

## POTENCIAL DEL MODELO APEX PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA INDUSTRIA DE ADEREZO DE ACEITUNAS

**Estudiante: Ana García Rubio**

**Tutores: Gonzalo Martínez y Tom Vanwalleghem**

**Abstract:** Irrigation with reclaimed water from the olive table industry is an alternative source of water for semi-arid areas, as long as salinity does not affect seriously soil quality. Appropriate water management can be studied through modelling. The objective of this project is to study the potential of the APEX model to evaluate the evolution of salinity in soils irrigated with reclaimed water. Different irrigation doses with different salt concentrations are analyzed for three different types of soils (Sandy Loam, Silty Loam, Silty Clay Loam). The results show significant differences in soil salinity, ranging between  $0,60 \pm 0,02$  and  $12,57 \pm 0,38$  dS m<sup>-1</sup>. The soil quality limit is 6 dS m<sup>-1</sup>, this value is exceeded with some of simulated conditions, one of these it is when salt concentration in irrigation water is 3840 ppm. The main conclusion of this study is that the APEX model is a suitable tool as it could be adapted successfully to take into account these scenarios for olive orchards.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente es necesaria una gestión adecuada de los recursos hídricos, como consecuencia de (i) una mala distribución del agua en la Tierra y la escasez de estos recursos en muchas partes del mundo, (ii) el crecimiento excesivo de la población mundial y (iii) la necesidad de aumentar la eficiencia de los sistemas de producción [Chartzoulakis, 2005; Paranychianakis and Chartzoulakis, 2005; Petousi et al., 2015; Ayoub et al., 2016; Raveh and Ben-Gal, 2016; Acosta-Motos et al., 2017]. La agricultura es el sector que consume la mayor cantidad de agua; por lo tanto, se deben encontrar alternativas que permitan el riego en zonas áridas o semiáridas [Petousi et al., 2015], como es el empleo de aguas recuperadas después de su utilización [Chartzoulakis, 2005; Petousi et al., 2015; Ayoub et al., 2016; Raveh and Ben-Gal, 2016; Acosta-Motos et al., 2017].

Existen numerosos estudios que analizan los efectos del uso del agua regenerada como agua de riego en países Mediterráneos. De hecho, se han estudiado las consecuencias en algunos cultivos como mandarinas, limones, pepinos, nectarinas, pomelos,... [Nirit et al., 2006; Pedrero and Alarcon, 2009; Pereira et al., 2011; Pedrero, et al., 2013; Pilatakis et al., 2013; Vivaldi et al., 2013]. Sin embargo, el cultivo más característico de la zona Mediterránea es el olivo, por lo que, muchos trabajos se han dirigido a estudiar los efectos del agua regenerada en olivares [Chartzoulakis, 2005, Mufeed I. Batarseh et al., 2011; Petousi et al., 2015; Ayoub et al., 2016]. Los parámetros más analizados han sido la presencia de hidrocarburos poliaromáticos (PAH), metales pesados, nutrientes y patógenos, tanto en hojas como en aceitunas [Chartzoulakis et al., 2002; Chartzoulakis, 2005; Petousi et al., 2015; Ayoub et al., 2016].

En este sentido, el alto contenido en sales de las aguas recuperadas es una de las mayores preocupaciones en relación a su uso para riego. Por tanto, se hace evidente la especial vigilancia en el control de la acumulación de sales en la zona radicular cuando se emplea este sistema alternativo de riego [Ranatunga et al., 2010; Wang et al., 2017]. Al aumentar la salinidad del suelo, disminuye la disponibilidad de agua para las plantas como consecuencia del desarrollo del potencial osmótico en la matriz del mismo [Lamsal et al., 1999]. A su vez, una elevada salinidad del suelo causa la disminución de la evapotranspiración y la conductancia estomática [Katerji et al., 2000]. Todos estos factores afectan significativamente a los rendimientos del cultivo [Lamsal et al., 1999; Katerji et al., 2000; Ranatunga et al., 2010; Verma et al., 2012]. Sin embargo, cada cultivo tiene unos niveles específicos de tolerancia a la salinidad, presentando los cultivos oleaginosos una tolerancia al agua salina muy elevada [Ranatunga et al., 2010], circunstancia que determina que el olivo sea un cultivo que puede sobrevivir en ambientes hostiles respecto a la salinidad.

En cuanto a las técnicas de regadío, el riego por goteo es la técnica más adecuada cuando se emplea agua salina. Chen et al. (2014) afirma que este tipo de riego permite la aplicación de agua a un ritmo bajo y de alta frecuencia durante largos períodos de tiempo, de forma que la sal del suelo introducida durante las primeras etapas del riego puede lixiviarse eficazmente mediante las aplicaciones posteriores. Además, el riego por goteo proporciona humedad del suelo cerca de la capacidad de campo, como consecuencia se evita una elevada concentración de sales. Pero existen otros sistemas de riego que evitan la acumulación de sales en la zona radicular, éste es el caso de sistemas de drenaje subsuperficial, con ello se mantiene la capa freática por debajo de la zona de la raíz, lo que permite la lixiviación del exceso de sales desde la zona radicular [Letey et al., 2011].

Con el fin de evitar la acumulación de sal en la zona de la raíz, es necesaria una lixiviación periódica para mover hacia capas profundas la salinidad excesiva. La fracción de lixiviación (LF) es la cantidad de agua que drena más allá de la zona de la raíz en relación con la cantidad de agua de riego aplicada [Letey et al., 2011]. Según Letey et al. (2011), el término “leaching requirement” (LR) se define como el valor de LF mínimo que se requiere durante un período de crecimiento para una determinada calidad de agua y conseguir el rendimiento máximo de un cultivo dado. La siguiente ecuación calcula LR:

$$LR = \frac{EC_W}{5EC_e^* - EC_W}$$

donde  $EC_W$  es la conductividad eléctrica del agua de riego y  $EC_e$  es la conductividad eléctrica media en la zona radicular.

El lixiviado natural, a consecuencia de las precipitaciones en otoño e invierno, es el que controla la acumulación de sales en el suelo de olivares cuando se emplea como agua de riego el agua regenerada del sistema de aderezo de aceitunas. Esta industria genera un agua residual con un elevado contenido de sales, siendo en la provincia de Sevilla donde

se localizan el mayor número de este tipo de empresas en Andalucía. Por tanto, el empleo de estas aguas regeneradas puede ser una alternativa a la escasez de agua en estas regiones. Al mismo tiempo, ofrece una manera de disminuir la generación de residuos y así contribuir a la economía circular y a la ecología industrial, en las cuales se tiene como perspectiva general la sostenibilidad. Sin embargo, será necesaria una buena gestión para la planificación del riego y evitar así problemas al cultivo del olivar. A pesar de haber estudios respecto al uso del agua regenerada para cultivos mediterráneos, en el ámbito del olivo y del agua residual de la aceituna de mesa no se ha avanzado demasiado, por tanto constituye un área de estudio con un gran potencial.

El objetivo de este trabajo es el estudio de la salinidad a lo largo del perfil del suelo cuando se usa agua regenerada de la industria de aderezo de aceitunas como agua de riego, y cuyo sistema de regadío es por goteo. El modelo Agricultural Policy/Environmental eXtender Model (APEX) es el empleado para simular la evolución de las sales en diferentes suelos a lo largo del tiempo. Con ello se puede establecer cuál es el potencial de la utilización de este modelo para analizar el riego con agua salina.

## **MATERIAL Y MÉTODO**

### **1.- Diseño experimental.**

En este proyecto se ha estudiado el efecto de diferentes variables (dosis de riego, concentración de sales en el agua de riego y textura del suelo) en la acumulación de sales en el terreno cuando éste es regado por goteo con agua regenerada de la industria de aderezo de aceituna.

Para ello es necesario considerar un diseño experimental que permita comparar las distintas situaciones simuladas. En la siguiente tabla se representan las distintas simulaciones junto con las variables estudiadas y sus valores.

Tabla 1. Diseño experimental de las simulaciones realizadas

Código simulación	Dosis de riego (mm día <sup>-1</sup> )	Concentración de sales en agua de riego (ppm)	Suelo
1	2	450	Franco arcilloso limoso
2	2	450	Franco limoso
3	2	450	Franco arenoso
4	5	450	Franco arcilloso limoso
5	5	450	Franco limoso
6	5	450	Franco arenoso
7	10	450	Franco arcilloso limoso
8	10	450	Franco limoso
9	10	450	Franco arenoso
10	2	3840	Franco arcilloso limoso
11	2	3840	Franco limoso
12	2	3840	Franco arenoso
13	5	3840	Franco arcilloso limoso
14	5	3840	Franco limoso
15	5	3840	Franco arenoso
16	10	3840	Franco arcilloso limoso
17	10	3840	Franco limoso
18	10	3840	Franco arenoso

Respecto a la dosis de riego, se han elegido tres posibles situaciones: 2, 5 y 10 mm, con objeto de analizar cómo afecta a la salinidad del suelo la cantidad de agua regenerada empleada para riego.

Por otra parte, se pretenden estudiar 2 valores distintos de salinidad en el agua de riego: un valor de 450 ppm (0,7 dS m<sup>-1</sup>), considerado como el límite superior de concentración para que no exista riesgo de salinización, y un segundo valor de 3840 ppm (6 dS m<sup>-1</sup>) correspondiente con la salinidad del agua regenerada procedente del aliño de aceituna, lo que se considera como agua con riesgo severo de salinización.

Por último, en las simulaciones, se estudian 3 texturas de suelos, cuyas características se muestran en la tabla 2, ya que la textura del suelo puede afectar a la acumulación de sales en el suelo.

Tabla 2. Características de los suelos estudiados

Textura del suelo			Denominación	Densidad aparente (t/m <sup>3</sup> )	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)
Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)			
17,85	52,15	30	Franco arcilloso limoso	1,13	6,3
21,81	70,69	7,5	Franco limoso	1,35	14
62,49	26,01	11,5	Franco arenoso	1,25	77

## 2.- Modelo APEX

Para realizar las simulaciones objeto de este estudio se ha empleado el modelo APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender Model), el cual es una extensión del modelo Environmental Policy Integrated Climate (EPIC). El modelo APEX [Williams et al., 2015] fue desarrollado para su uso en el manejo de pequeñas cuencas agrícolas, y más específicamente para evaluar distintas estrategias de manejo del suelo considerando su sostenibilidad, erosión (eólica e hídrica laminar y concentrada), economía, rendimiento de cultivos, calidad de agua y suelo, competencia entre plantas, clima y plagas. Este modelo resulta adecuado para simular el regadío con alto contenido en sales como la procedente de la industria de aderezo de aceituna, ya que APEX es un modelo que estudia la calidad del agua a escala de cuenca y que incluye una representación altamente detallada de la gestión agrícola [Williams et al., 2015; Hong et al. 2018]. Con APEX pueden estudiarse determinadas situaciones de riego y de laboreo, distintas prácticas de conservación y sistemas de cultivo, así como superficie de escorrentía y pérdidas de sedimento. Estas cualidades hacen del mismo una herramienta útil para el análisis de los nutrientes en el suelo, como es el objetivo de este proyecto.

Entre las entradas más importantes del modelo APEX se consideran: datos meteorológicos, propiedades del suelo, datos del cultivo y de su manejo.

### 2.1.-Datos meteorológicos.

Para la realización de la simulación se han empleado los datos meteorológicos de los últimos 15 años de la estación agroclimática de Puebla de Cazalla [RIA, 2017]. Esta estación está próxima a una de las principales industrias de aderezo de aceitunas y a una zona amplia de cultivo de aceituna para verdeo.

El archivo de entrada al modelo APEX contiene 25 series sintéticas de meteorología las cuales se han obtenido a partir de los datos de los últimos 15 años de la estación meteorológica. La información que contiene estas series es la radiación solar ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ), temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación (mm), humedad relativa y velocidad y dirección del viento (m/s). Más detalles sobre los algoritmos de generación de variables meteorológicas pueden encontrarse en Richardson et al., 1981; Nicks et al., 1989; Williams et al., 2015.

### 2.2.-Propiedades del suelo.

Para poder hacer las simulaciones con APEX, es necesario crear un archivo de entrada con las propiedades del suelo estudiado. En este proyecto se simulan tres suelos distintos, cada uno con una textura diferente (Tabla 2) y con unas conductividades hidráulicas diferentes. Estas características son homogéneas para los 10 horizontes en los que se dividen los suelos estudiados, ya que de esta manera se puede realizar una mejor interpretación de los resultados, sin que estos dependan de la heterogeneidad que suelen tener los suelos.

Por tanto, al modelo APEX se le introducen 10 horizontes homogéneos para cada tipo de suelo, y cuya profundidad es de 20 cm cada horizonte, siendo, por lo tanto, 2 m la profundidad total de los suelos.

### 2.3.-Datos del cultivo.

APEX puede simular el crecimiento de cultivos anuales y perennes, así como plantaciones mixtas de hasta diez cultivos distintos. En el caso del presente proyecto, se estableció un cultivo de olivar con un marco de plantación de 7 m x 7 m. Para realizar la simulación es necesario establecer los valores de los parámetros requeridos por el modelo, entre los que se encuentran parámetros de crecimiento potencial, uso del agua y consumo de nutrientes. Estos valores se recogen en el anexo 1.

### 2.4.-Datos de la subcuenca.

Debido a que el objetivo principal del proyecto es estudiar la aplicabilidad de este modelo en el análisis de las concentraciones de sales en el suelo, se plantea como área de estudio una superficie hipotética con una longitud de transporte de 0,112 km, 1 ha de superficie y de pendiente prácticamente llana (Tabla 3).

Tabla 3. Características de la cuenca estudiada

<b>Parámetros</b>	
Elevación de la subcuenca (m)	200,8
Área de la cuenca (ha)	1
Distancia desde el punto de salida al punto más distante de la cuenca (km)	0,112
Pendiente del canal principal	0,034
Constante de Manning para el canal	0,015
Pendiente media de ladera (m/m)	0,01
Longitud promedio de ladera (m)	9
Constante de Manning para superficie ladera	0,15
Longitud del canal (km)	0,112

### 2.5.-Datos de manejo del cultivo.

APEX permite simular distintas situaciones de regadío (aspersión, surcos, goteo,...) con aplicaciones programadas o automáticas. A través de las aplicaciones programadas, se permite establecer las fechas y las láminas de aplicación de agua.

En el archivo de entrada que regula estas condiciones, se han establecido una serie de operaciones en el cultivo para que el modelo funcione correctamente. En primer lugar, se indica que se establece un cultivo leñoso con una cierta edad de plantación. Esto se consigue introduciendo la operación de plantación del olivar que se realiza 30 años antes del período en el que se analizará el manejo de riego con agua salina. En segundo lugar, desde el año 30 y durante 10 años, hay que indicarle al modelo que la plantación va a ser regada diariamente por el sistema de goteo. En cada entrada diaria se establece la dosis de riego, que tal como se indica en la tabla 1, se estudian 2, 5 y 10 mm. En cuanto a las concentraciones estudiadas de salinidad en el agua de riego (Tabla 1), éstas deben ser introducidas en el modelo APEX a través de su archivo de control

### 3.- Implantación y análisis de resultados

Una vez desarrollado todo a partir de APEX, se han ejecutado las simulaciones a través de MATLAB. Esto permite simular cada uno de los 18 escenarios reflejados en la tabla 1 tantas veces como escenarios meteorológicos, los cuales fueron de un total de 25. Bajo esta perspectiva es posible tener datos promediados con sus errores, lo que permite determinar la fiabilidad de los datos obtenidos.

A lo largo de los resultados que se muestran a continuación, se analiza la conductividad eléctrica del agua que se filtra hacia el subsuelo, una vez que se han simulado los 18 escenarios distintos de regadío (Tabla 1). El modelo empleado para realizar las simulaciones, determina resultados de conductividad eléctrica, por lo que serán estos los utilizados para estudiar la evolución de la salinidad en el subsuelo, ya que la conductividad eléctrica (CE) se relaciona con la concentración de sales en ppm (TDS) a través de la siguiente expresión [Allison *et al.*, 1954; Melgar *et al.*, 2009; Peragón *et al.*, 2016]:

$$TDS (mg L^{-1}) = CE_W (dS m^{-1}) \cdot 640$$

Se asume que el agua que se filtra al subsuelo se encuentra en equilibrio con la solución del suelo, de ahí que puedan compararse los resultados de la salinidad del agua filtrada obtenidos por el modelo, con datos de salinidad del suelo, los cuales se obtienen mediante extractos de suelo-agua de 1:5 [Visconti *et al.*, 2010].

## RESULTADOS

En la tabla 4 se muestran los valores promedios, junto con el error estándar, de la conductividad eléctrica en los tres primeros horizontes (H 1, H 2 y H 3) de cada suelo y al final del periodo simulado, es decir a los 50 años del inicio de la simulación. Las profundidades de estos horizontes son de 20, 40 y 60 cm respectivamente.

Tabla 4. Valores promedios de conductividad eléctrica ( $dS m^{-1}$ ) al final del periodo simulado en función de la dosis de riego, concentración de sales en el agua de riego y el tipo de suelo.

	2 mm-450 ppm			5 mm-450 ppm			10 mm-450 ppm		
	Franco Arenoso	Franco Limoso	Franco Arcilloso-Limoso	Franco Arenoso	Franco Limoso	Franco Arcilloso-Limoso	Franco Arenoso	Franco Limoso	Franco Arcilloso-Limoso
H 1	1.09±0.04	0.76±0.03	0.65±0.02	1.38±0.05	0.95±0.04	0.83±0.03	1.47±0.04	1.02±0.03	0.88±0.02
H 2	1.01±0.04	0.69±0.03	0.60±0.02	1.28±0.05	0.87±0.03	0.77±0.02	1.36±0.03	0.93±0.02	0.81±0.02
H 3	0.99±0.04	0.68±0.03	0.60±0.02	1.25±0.04	0.85±0.03	0.77±0.02	1.33±0.03	0.91±0.02	0.81±0.02
	2 mm-3840 ppm			5 mm-3840 ppm			10 mm-3840 ppm		
	Franco Arenoso	Franco Limoso	Franco Arcilloso-Limoso	Franco Arenoso	Franco Limoso	Franco Arcilloso-Limoso	Franco Arenoso	Franco Limoso	Franco Arcilloso-Limoso
H 1	9.31±0.38	6.46±0.28	5.52±0.21	11.80±0.45	8.07±0.33	7.09±0.25	12.57±0.38	8.68±0.27	7.48±0.21
H 2	8.58±0.33	5.92±0.24	5.12±0.18	10.88±0.39	7.40±0.28	6.58±0.21	11.59±0.30	7.95±0.21	6.94±0.17
H 3	8.42±0.30	5.78±0.22	5.09±0.16	10.67±0.35	7.23±0.25	6.53±0.19	11.38±0.26	7.78±0.18	6.90±0.15

Los resultados recogidos en la tabla 4, se muestran en las siguientes figuras, donde se puede visualizar la evolución de la salinidad a lo largo de todo el periodo simulado (50 años) cuando la plantación comienza a ser regada a partir del año 30. En cada una de las figuras se representa la evolución de la conductividad eléctrica (EC) con respecto al tiempo para cada uno de los tres suelos estudiados, para los tres horizontes analizados, y para las distintas concentraciones de sal en el agua de riego. En dichas figuras, la línea continua corresponde con el valor promedio de los 25 escenarios meteorológicos distintos, y las líneas discontinuas representan el error estándar de ese valor promedio.

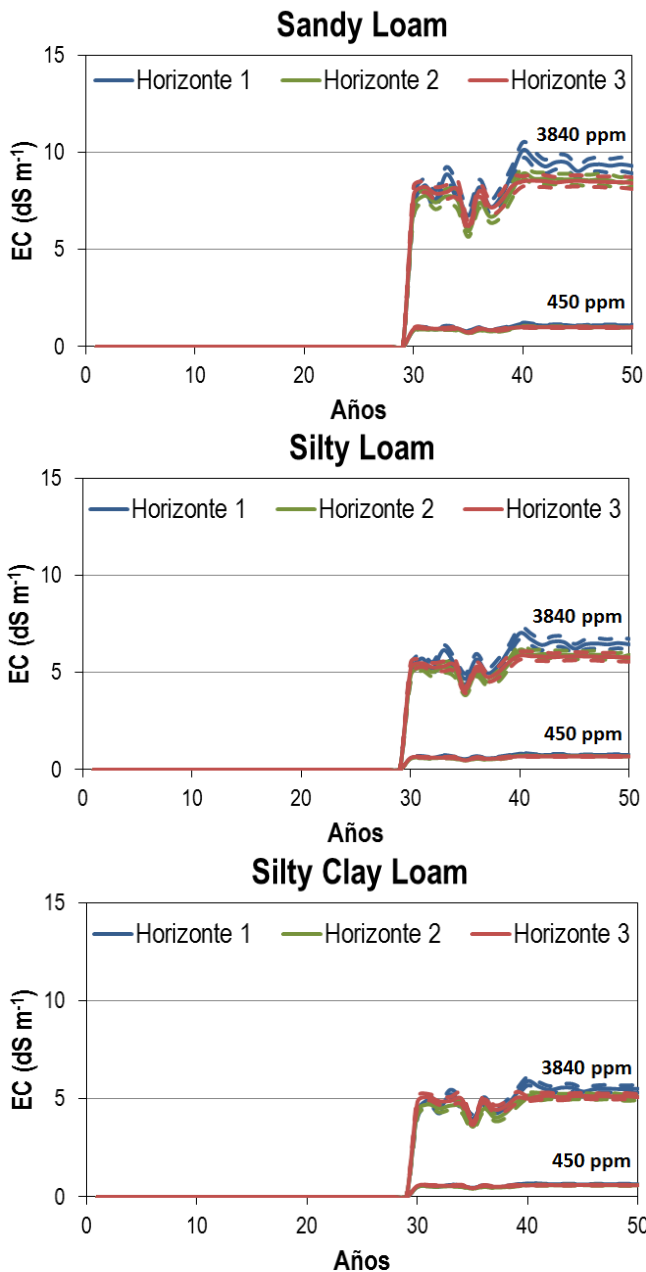


Figura 1. Conductividad eléctrica respecto al tiempo para los tres tipos de suelos, dosis de 2 mm y concentración de sales de 450 ppm y 3840 ppm. Profundidades: horizonte 1= 20 cm; horizonte 2= 40 cm; horizonte 3= 60 cm.



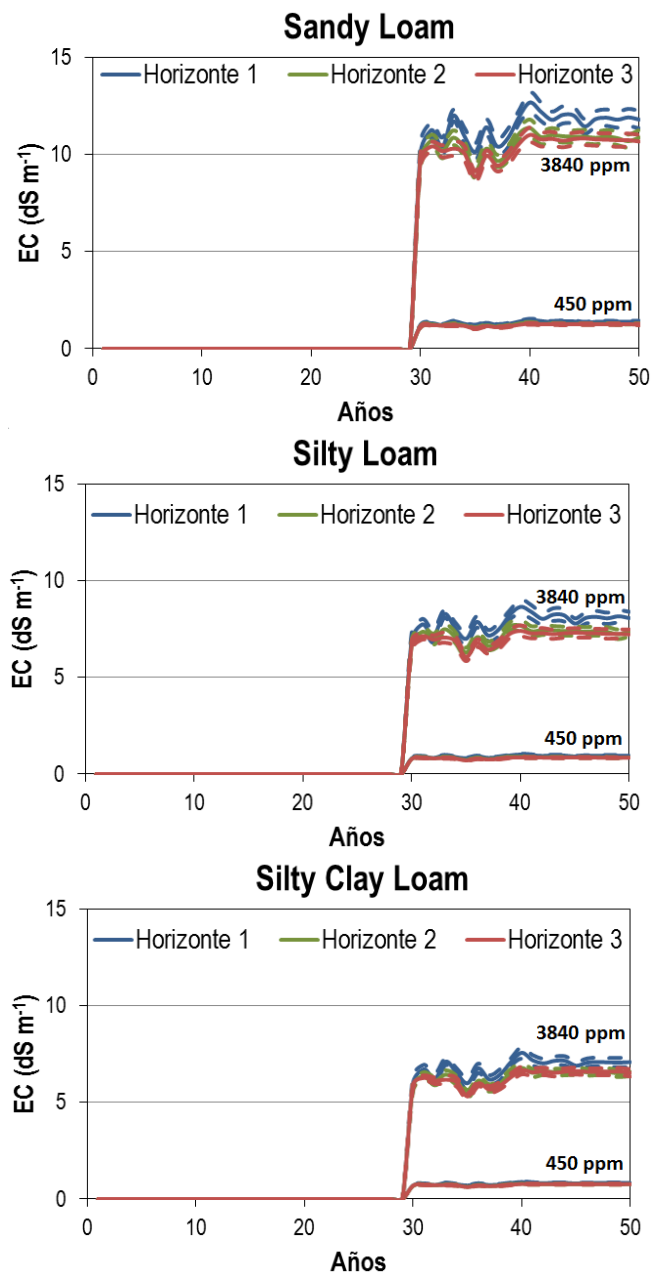


Figura 2. Conductividad eléctrica respecto al tiempo para los tres tipos de suelos, dosis de 5 mm y concentración de sales de 450 ppm y 3840 ppm. Profundidades: horizonte 1= 20 cm; horizonte 2= 40 cm; horizonte 3= 60 cm.

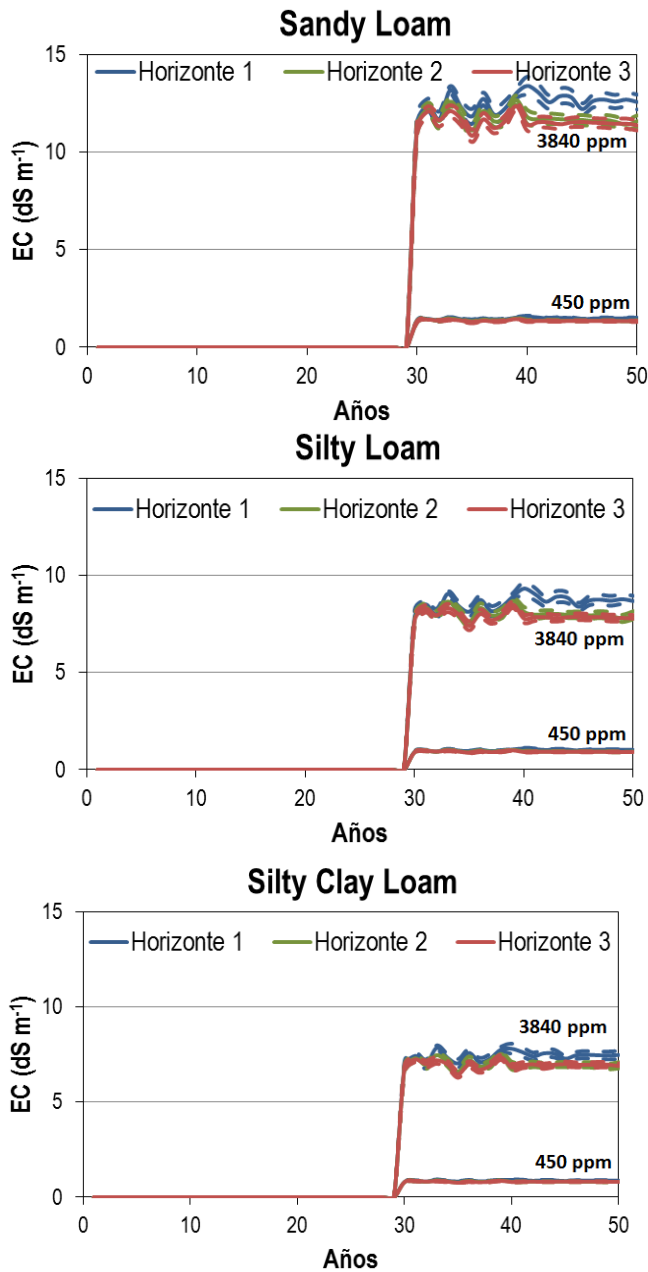


Figura 3. Conductividad eléctrica respecto al tiempo para los tres tipos de suelos, dosis de 10 mm y concentración de sales de 450 ppm y 3840 ppm. Profundidades: horizonte 1= 20 cm; horizonte 2= 40 cm; horizonte 3= 60 cm.

Además se ha realizado un análisis de la varianza para obtener información acerca de las diferencias significativas que existen al comparar resultados con un nivel de confianza de un 95 % y 60 grados de libertad ( $n=60$ ). En las tres tablas siguientes se muestran los resultados de estos análisis, donde  $F$  es la estimación de la varianza poblacional, pero basada en la variabilidad existente dentro de cada grupo, y  $p$  es el nivel crítico asociado a  $F$ , el cual si es menor de 0,05, se rechazará la hipótesis de igualdad de medias, es decir, que no todas las medias poblacionales comparadas son iguales.

Tabla 5. Valores de los estadísticos obtenidos en el análisis de la varianza cuando se comparan las distintas dosis de riego para cada uno de los distintos tipos de suelos y para cada una de las concentraciones de sales en el agua de riego (Horizonte 1).

Suelos	Concentración sales	F	p
Franco arenoso	450 ppm	147.665023	<0,05
	3840 ppm	147.639407	<0,05
Franco Limoso	450 ppm	138.567948	<0,05
	3840 ppm	138.696451	<0,05
Franco limoso-arcilloso	450 ppm	164.337652	<0,05
	3840 ppm	164.080824	<0,05

Tabla 6. Valores de los estadísticos obtenidos en el análisis de la varianza cuando se comparan los distintos tipos de suelos para cada una de las distintas dosis de riego y para cada una de las concentraciones de sales en el agua de riego (Horizonte 1).

Dosis	Concentración sales	F	p
2 mm	450 ppm	132.313538	<0,05
	3840 ppm	132.156317	<0,05
5 mm	450 ppm	396.528714	<0,05
	3840 ppm	396.267607	<0,05
10 mm	450 ppm	1014.79042	<0,05
	3840 ppm	1015.28917	<0,05

Tabla 7. Valores de los estadísticos obtenidos en el análisis de la varianza cuando se comparan los distintos horizontes de cada suelo y para cada una de las distintas dosis de riego y para cada una de las concentraciones de sales en el agua de riego.

	Dosis	Concentración sales	F	p
Franco Arenoso	2 mm	450 ppm	4.771645647	<0,05
		3840 ppm	4.753934021	<0,05
	5 mm	450 ppm	18.66206154	<0,05
		3840 ppm	18.64004066	<0,05
	10 mm	450 ppm	33.37446856	<0,05
		3840 ppm	33.3779812	<0,05
Franco Limoso	2 mm	450 ppm	6.163355078	<0,05
		3840 ppm	6.178162963	<0,05
	5 mm	450 ppm	24.6224376	<0,05
		3840 ppm	24.66167983	<0,05
	10 mm	450 ppm	34.81936192	<0,05
		3840 ppm	34.87513651	<0,05
Franco Limoso-Arcilloso	2 mm	450 ppm	3.324433841	<0,05
		3840 ppm	3.336642692	<0,05
	5 mm	450 ppm	12.1500948	<0,05
		3840 ppm	12.14601248	<0,05
	10 mm	450 ppm	28.63859542	<0,05
		3840 ppm	28.65550563	<0,05

## DISCUSIÓN

Como se puede observar en los resultados, los valores de conductividad eléctrica cuando la concentración de sales en el agua de riego es de 450 ppm, son de un orden de magnitud menor que cuando se emplea agua con una salinidad de 3840 ppm. Asimismo, puede verse como, para una concentración salina de 450 ppm en el agua de riego, el aumento del nivel de irrigación establece incremento de la salinidad en los tres tipos de suelo como consecuencia del mayor aporte de sal. Tal circunstancia también puede observarse cuando se emplea la concentración de sal de 3840 ppm. Esto se corrobora con los datos obtenidos por el análisis de varianza, donde se establece que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) al emplear distintas dosis de riego para un mismo tipo de suelo y de concentración salina.

En cuanto al tipo de suelo, se observa cómo la salinidad del suelo es mayor en suelos arenosos y menor en los limosos-arcillosos. Todo ello es consecuencia de la permeabilidad que presenta el suelo, que depende directamente de la textura. Así un suelo arenoso, al ser más permeable, facilita la infiltración alcanzando niveles más profundos, mientras que un suelo arcilloso, de baja permeabilidad, dificulta la infiltración y percolación del agua de riego, permaneciendo ésta más próxima a la

superficie del terreno, por lo que la mayor concentración de sal se encontrará en la capa más superficial.

Asimismo, puede verse que existen diferencias significativas entre la salinidad que se acumula en los tres horizontes de cada uno de los suelos, esto se corrobora con el análisis de la varianza realizado (Tabla 7). Si se observan las gráficas, cuando la salinidad es de 3840 ppm, sí se aprecia estas diferencias de concentración entre los tres horizontes.

Con respecto a la concentración de sales en el agua de riego, se ven grandes diferencias entre la concentración de 450 ppm y la de 3840 ppm. En el segundo caso, se observan mayores fluctuaciones entre los horizontes y dentro de cada horizonte a lo largo del tiempo. En esta situación afectan de una mayor manera las variaciones meteorológicas, influenciando en el lixiviado de sales y en la acumulación de las mismas.

Debe tenerse en cuenta que la mayor concentración salina en el agua de riego es la que se corresponde con el agua regenerada a la salida del proceso de aderezo de aceituna, pero en la práctica, esta agua se mezcla con agua pluvial, acumulada en balsas, para de esta manera, disminuir su contenido en sales. A este respecto, hay que tener en cuenta que los efectos de la salinidad en el rendimiento de los olivares dependen de la concentración, aunque el olivo es un cultivo que tolera adecuadamente un rango de amplio de salinidad [Melgar *et al.*, 2009; Ghrab *et al.*, 2013; Peragón *et al.*, 2016], correspondiendo con una CE de entre 3 y 6 dS m<sup>-1</sup> en el extracto de saturación del suelo [Aragüés *et al.*, 2005; Melgar *et al.*, 2009; Ghrab *et al.*, 2013], sin que su crecimiento y productividad se vean disminuidos notoriamente. Estos valores son los que se suelen obtener en la cuenca mediterránea, ya que presenta escasos recursos de agua dulce y a menudo el riego se realiza con agua salina (CE 5-10 dS m<sup>-1</sup>) [Melgar *et al.*, 2009; Ghrab *et al.*, 2013]. Por tanto, se establece que el mejor rendimiento del olivo se produce cuando la CE en la zona de la raíz es inferior a 6 dS m<sup>-1</sup> [Weissbein *et al.*, 2008; Ghrab *et al.*, 2013].

La profundidad máxima de las raíces del olivo es de 2 m (anexo 1). No obstante la mayor densidad de raíces activas se encuentra en el primer metro de profundidad, teniendo en cuenta que los resultados se han mostrado para los primeros 60 cm del perfil del suelo, se puede deducir que la salinidad mostrada en los resultados se encuentra en la zona de la raíz. Como se ha visto anteriormente, cuando se emplea agua de riego con 3840 ppm de salinidad, se supera el nivel crítico de salinidad (6 dS m<sup>-1</sup>) en los primeros 60 cm de profundidad, por tanto el agua que procede del proceso de aderezo de aceitunas debe ser diluida con agua pluvial, en mayor o menor proporción dependiendo del tipo de suelo. Las dos únicas situaciones en las que no sería necesaria su dilución, sería cuando la dosis de riego es de 2 mm y el suelo es limoso o limoso-arcilloso.

## CONCLUSIÓN

Las simulaciones indican que el riego con agua de 3840 ppm no es sostenible a largo plazo, ya que para todas las dosis de riego y para casi todos los suelos (salvo limoso) se han obtenido valores de salinidad del suelo por encima del límite establecido. Asimismo este modelo podría emplearse en futuras investigaciones para calcular las dosis riego de lavado necesarias para situar la salinidad del suelo por debajo del límite admisible. Los resultados de este proyecto permiten concluir que este modelo, u otro de características similares, es una herramienta muy útil para realizar una buena gestión en cuanto al regadío en olivar y otros cultivos.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha podido ser realizado gracias al trabajo y apoyo de mis tutores, el profesor Gonzalo Martínez y el profesor Tom Vanwallegem. A la profesora María José Polo, le agradezco el ánimo con el que me alentó a realizar este Máster. También un agradecimiento especial al profesor Juan Vicente Giráldez, por su dedicación, por su comprensión, sus consejos y ánimos. Al resto de profesores del Máster de Hidráulica Ambiental, les agradezco su tiempo y dedicación y los conocimientos que me han enseñado. Por último, agradezco a mi familia, a los cuales les he robado mucho tiempo para poder realizar este proyecto.

## REFERENCIAS

- Acosta-Motos, J.R., Hernández, J.A., Álvarez, S., Barba-Espín, G., Sánchez-Blanco, M.J. The long-term resistance mechanisms, critical irrigation threshold and relief capacity shown by *Eugenia myrtifolia* plants in response to saline reclaimed water. *Plant Physiology and Biochemistry* 111 (2017) 244-256.
- Allison, E.L. et al. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Published by United States Department of Agriculture (1954).
- Aragüés, R., Puy, J., Royo, A., Espada, J.L.. Three-year field response of young olive trees (*Olea europaea* L., cv. Arbequina) to soil salinity: trunk growth and leaf ion accumulation. *Plant Soil* 271 (2005) 265–273.
- Ayoub, S., Al-Shdiefat, S. a, Rawashdeh, H. b, Bashabsheh, I.b Utilization of reclaimed wastewater for olive irrigation: Effect on soil properties, tree growth, yield and oil content. *Agricultural Water Management* 176 (2016) 163–169.
- Chartzoulakis, K.S. Salinity and olive: Growth, salt tolerance, photosynthesis and yield. *Agricultural Water Management* 78 (2005) 108–121.

- Chartzoulakis, K., Loupassaki, M., Bertaki, M., Androulakis, I. Effects of NaCl salinity on growth, ion content and CO<sub>2</sub> assimilation rate of six olive cultivars. *Scientia Horticulturae* 96 (2002) 235–247
- Chen, L.J., Feng, Q., Li, F.R., Li, C.S. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water. *Agricultural Water Management* 146 (2014) 24–33
- Ghrab, M., Gargouri, K. Bentaher, H. Chartzoulakis, K., Ayadi, M., Ben Mimoun, M., Masmoudi, M.M., Ben Mechlia, N., Psarras, G. Water relations and yield of olive tree (cv. Chemlali) in response to partial root-zone drying (PRD) irrigation technique and salinity under arid climate. *Agricultural Water Management* 123 (2013) 1– 11
- Hong, E.M., Park, Y., Muirhead, R., Jeong, J., Pachepsky, Y.A. Development and evaluation of the bacterial fate and transport module for the Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model. *Science of the Total Environment* 615 (2018) 47–58
- Katerji, N., van Hoorn, J.W., Hamdy, A., Mastrorilli, S. Salt tolerance classification of crops according to soil salinity and to water stress day index. *Agricultural Water Management* 43 (2000) 99-109.
- Lamsal, K., Paudyal, G.N., Saeed, M. Model for assessing impact of salinity on soil water availability and crop yield. *Agricultural Water Management* 41 (1999) 57–70.
- Letey, J., Hoffman, G.J., Hopmans, J.W., Grattan, S.R., Suarez, D., Corwin, D.L., Oster, J.D., Wu, L., Amrhein, C.. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agricultural Water Management* 98 (2011) 502–506
- Melgar, J.C., Mohamed, Y., Serrano, N., García-Galavís, P.A., Navarro, C., M.A. Parra, M.A., Benlloch, M., Fernández-Escobar, R. Long term responses of olive trees to salinity. *Agricultural Water Management* 96 (2009) 1105-1113
- Mufeed I. Batarseh, Aiman Rawajfeh, . Kalavrouziotis K. Ioannis, Koukoulakis H. Prodromos. Treated Municipal Wastewater Irrigation Impact on Olive Trees (*Olea Europaea* L.) at Al-Tafilah, Jordan. *Water, Air and Soil Pollution* 217 (2011) 185–196.
- Nicks, A.D., L.J. Lane. 1989. Chapter 2. Weather Generator. Pp. 2.1-2.19. Profile Model Documentation. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Version. NSERL Report No. 2, USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab., West Lafayette, Indiana 47907.

- Nirit, B., Asher, B.T., Haya, F., Pini, S., Ilona, R., Amram, C., Marina, I., 2006. Application of treated wastewater for cultivation of roses (*Rosa hybrida*) in soil-less culture. *Scientia Horticulturae* 108 (2006) 185–193.
- Paranychianakis, N.V., Chartzoulakis, K.S. Irrigation of Mediterranean crops with saline water: from physiology to management practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2005) 171–187.
- Pedrero, F., Alarcon, J.J. Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees. *Desalination* 246 (2009) 631–639.
- Pedrero, F., Mounzer, O., Alarcon, J.J., Bayona, J.M., Nicolas, E. The viability of irrigating mandarin trees with saline reclaimed water in a semi-arid Mediterranean region: a preliminary assessment. *Irrigation Science* 31 (2013) 759–768.
- Peragón, J.M., Delgado, A., Rodríguez Díaz, J.A., Pérez-Latorre, F.J. A GIS-based decision tool for reducing salinization risks in oliveorchards. *Agricultural Water Management* 166 (2016) 33–41
- Pereira, B.F.F., He, Z.L., Stofella, P.J.. Reclaimed wastewater: effects on citrus nutrition. *Agricultural Water Management* 98 (2011) 1828–1833.
- Petousi, I., Fountoulakis, M.S., Saru, M.L., Nikolaidis, N., Fletcher, L., Stentiford, E.I., Manios, T. Effects of reclaimed wastewater irrigation on olive (*Olea europaea* L. cv. ‘Koroneiki’) trees. *Agricultural Water Management* 160 (2015) 33–40.
- Pilatakis, G., Manios, T., Tzortzakis, N. The use of primary and secondary treated municipal wastewater for cucumber irrigation in hydroponic system. *Water Practice Technology*. 8 (2013) 433–439.
- Ranatunga, K., Nation, E.R., Barodien, G. Potential use of saline groundwater for irrigation in the Murray hydrogeological basin of Australia. *Environmental Modelling & Software* 25 (2010) 1188-1196.
- Raveh, E., Ben-Gal, A. Irrigation with water containing salts: Evidence from a macro-data national case study in Israel. *Agricultural Water Management* 170 (2016) 176–179.
- RIA, 2017. Red de Información Agroclimática, IFAPA-CAP. <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/>.
- Richardson, C.W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Res.* 17 (1981) 182-190.



- Sáenz de Rodríguez, M., Peña, A., Vanwalleghem, T., Ayuso, P., Laguna, A., Vanderlinden, K., Ordoñez, R., Giráldez, J.V., Martínez, G. Exploración del uso de agua regenerada en el riego de olivar bajo clima mediterráneo. Estudios en la zona no saturada del suelo. Vol XIII. (2017) 337-346
- Verma, A.K., Gupta, S.K., Isaac, R.K. Use of saline water for irrigation in monsoon climate and deep water table regions: simulation modeling with SWAP. *Agricultural Water Management* 115 (2012) 186–193.
- Visconti, F., de Paz, J.M., Rubio, J.L. What information does the electrical conductivity of soil water extracts of 1 to 5 ratio (w/v) provide for soil salinity assessment of agricultural irrigated lands? *Geoderma* 154 (2010) 387–397.
- Vivaldi, G.A., Campese, S., Rubino, P., Lonigro, A. Microbial impact of different types of municipal wastewaters used to irrigate nectarines in Southern Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 181 (2013) 50–57.
- Wang, X., Liu, G., Yang, J., Huang, G., Yao, R. Evaluating the effects of irrigation water salinity on water movement, crop yield and water use efficiency by means of a coupled hydrologic/crop growth model. *Agricultural Water Management* 185 (2017) 13–26
- Weissbein, S., Wiesman, Z., Ephrath, Y., Silberbush, M. Vegetative and reproductive response of olive cultivars to moderate saline water irrigation. *HortScience* 43 (2008) 320–327.
- Williams, J.R., R.C. Izaurralde, and E.M. Steglich. 2015. *Agricultural Policy/Environmental eXtender Model theoretical documentation*. Version 0806. Blackland Research and Extension Center, Temple, TX. 134pp.
- [www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?action=Static&url=listadoEstaciones.jsp&c\\_provincia=41](http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?action=Static&url=listadoEstaciones.jsp&c_provincia=41)

**Anexo 1: Valores de parámetros del olivo utilizado en APEX**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Relación Biomasa-Energía	16,10
Índice de cosecha	0,05
Temperatura óptima para el crecimiento de la planta (°C)	30
Temperatura mínima para el crecimiento de la planta (°C).	10
Índice de área foliar	0,80
Índice de área foliar en época de senescencia	0,99
Primer punto en la curva óptima de desarrollo del área foliar	15,01
Segundo punto en la curva óptima de desarrollo del área foliar	50,95
Parámetro de tasa de disminución del índice de área foliar.	1
Parámetro de tasa de disminución de la razón biomasa-energía.	1
Índice de tolerancia de aluminio	4
Conductancia estomática máxima (m s <sup>-1</sup> ).	5
Factor de aireación crítico	0,85
Peso de la semilla (kg ha <sup>-1</sup> )	90
Altura máxima de cultivo (m)	3
Profundidad de raíz máxima (m)	2
Fracción de nitrógeno en rendimiento (g g <sup>-1</sup> )	0,015
Fracción de fósforo en rendimiento (g g <sup>-1</sup> )	0,0003
Fracción de potasio en rendimiento (g g <sup>-1</sup> )	0,0042
Límite inferior del índice de cosecha	0,21
Factor de plagas (insectos y enfermedades).	0,60
Fracción de agua en rendimiento.	0,12
Parámetro de captación de nitrógeno (fracción N en planta en emergencia).	0,06
Parámetro de captación de nitrógeno (fracción N en planta a 0.5 madurez).	0,0230
Parámetro de captación de nitrógeno (fracción N en la planta en la madurez)	0,134
Parámetro de captación de fósforo (fracción P en planta a 0.5 de madurez).	0,0032
Parámetro de captación de fósforo (fracción P en la planta en la madurez).	0,0019
Parámetro de captación de fósforo (fracción P en planta en emergencia).	0,0084
Factor de erosión eólica en vivo	3,390
Factor de erosión del viento muerto	3,390
Factor de erosión eólica para residuos	3,390
Número de categoría de cultivo	5
Primer punto en la curva de daño por helada	5,01
Segundo punto en la curva de daño por helada	15,10
Umbral VPD (KPA)	0,50
Valor VPD (KPA)	4,75
Fracción del peso de la raíz en la emergencia	0,40
Fracción del peso de la raíz en la madurez	0,20
Unidades de calor para la germinación.	100
Población de plantas para cultivos y pasto: primer punto en la curva.	125,60
Población de plantas para cultivos y pasto: 2do punto en la curva	250,95
Salinidad que afecta al rendimiento (mmoh/cm)	0,07
Umbral de salinidad (mmoh/cm)	6
Fracción de lignina en la planta a 0,5 de madurez	0,01
Fracción de lignina en planta en plena madurez	0,10