



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

SALINIDAD, DRENAJE Y REHABILITACIÓN DE SUELOS POR MEDIO DE ENERGÍA EÓLICA EN DISTRITOS DE RIEGO

Leonardo Pulido Madrigal^{1*}; Adán Jesús González Real²

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Mor. 62550.

lpulido@tlaloc.imta.mx (*Autor de correspondencia)

²Especialista en Tecnologías de la Información. Cuernavaca, Morelos. adangonzare@hotmail.com

Resumen

En una parcela piloto de drenaje parcelario subsuperficial de 4.3 ha que dispone de un aerogenerador para el bombeo del drenaje hacia la red de drenaje de apoyo del Distrito de Riego No. 038 Río Mayo, Sonora, en el periodo noviembre 2016-julio 2017, se estudió la variación espacial y temporal tanto de la salinidad como de niveles freáticos superficiales. Asimismo, se analizó el efecto del bombeo del drenaje en la disminución de la salinidad y de los niveles freáticos superficiales. Los niveles de salinidad más altos se observaron en el estrato subsuperficial. En el estrato superficial se analizó que los niveles de salinidad más bajos se observan en la parcela piloto y los más altos en el área de influencia de dicha parcela, en la cual no se dispone de drenaje parcelario. Asimismo, los niveles de salinidad más altos se estimaron antes del inicio del bombeo así como en el periodo enero-marzo, y en mayo al finalizar el calendario de riegos del distrito de riego. La correlación de niveles freáticos y de la salinidad permite establecer que los problemas de salinidad de la parcela piloto se derivan principalmente de los niveles freáticos superficiales. Se analizó que por la acción del bombeo los niveles de salinidad entre 2014 y 2017 tuvieron un descenso de 12 hasta 5 dS m⁻¹, por lo cual se concluye que el bombeo del drenaje impulsado por energía eólica permite la desalación de suelos, y es una medida que no genera gases de efecto invernadero y por ello es ambientalmente adecuada, aplicable a tierras bajas de las planicies costeras, localizadas por debajo de la cota cinco metros sobre el nivel medio del mar.

Palabras clave: Bombeo; desalinización; nivel freático; monitorización; análisis estadístico



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

Introducción

En las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación pluvial (PP) es menor que la evaporación, las sales se pueden acumular sobre la superficie del suelo cuando la profundidad del nivel freático superficial es menor de 1.5 m. La acumulación de sales en la superficie del suelo es consecuencia del movimiento ascendente del agua freática y del subsecuente transporte de sales en el perfil del suelo debidas a la capilaridad, impulsada por un proceso de evaporación. Sin embargo, la causa más común de la acumulación de sales es la evapotranspiración (ET), que aumenta la concentración de sales a medida que profundiza la zona radicular (Corwin *et al.*, 2012).

En México los distritos de riego (DR's) son las áreas agrícolas más productivas, y la salinidad (CE) es considerada un problema serio ya que aproximadamente un 47 % de las afectaciones a nivel nacional se localizan en DR's del noroeste del país; y es en esta región en la que se localiza el distrito de riego (DR) No. 038 Río Mayo, en el estado de Sonora. En este DR se tienen afectadas por CE un 32% y por un nivel freático superficial (MF) un 37% de la superficie (De la Peña, 1993; Pulido *et al.*, 2003 y 2010).

Las causas que dan origen al problema de CE y de MF en DR's de zonas áridas y semiáridas en México son: los métodos de riego ineficientes, los niveles freáticos superficiales, T, ET, PP, salinidad del agua freática, el mantenimiento deficiente de la red de drenaje, las pérdidas de agua por conducción, la falta de capacitación de usuarios, las condiciones de topografía, la ubicación y condiciones de descarga de la red de drenaje, la calidad del agua de riego y la intemperización química de los materiales terrestres, es decir minerales que son constituyentes de rocas y suelos (Pulido *et al.*, 2009; 2016; Tanji y Wallender, 2012).

Los principales tipos de estrés abiótico que se espera aumenten en respuesta al cambio climático son la T, sequía, CE, saturación del suelo e inundación (Reynolds y Cruz, 2010). Los efectos del calentamiento global en la disminución de producción agrícola ya se están observando; el IPCC (2014) expresa que el cambio climático ha afectado negativamente los rendimientos de trigo y maíz en muchas regiones y a nivel global. Los escenarios que indican el impacto del cambio climático en variables como temperatura (T) y PP son llamados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Según el escenario RCP8.5, se estima que para el periodo 2075-2099 en el sur del estado de Sonora la T máxima en primavera-verano aumentará entre 5.0 y 5.4 °C y la PP decaerá un 16.9% (Salinas *et al.*, 2015).

Con el propósito de aportar soluciones a los problemas de ensalitramiento de los suelos causados por mantos freáticos superficiales y por el incremento de T causada por el



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

calentamiento global en el DR 038 río Mayo, Sonora en 2014 se instaló una parcela piloto de 4.3 ha la cual dispone de un sistema de drenaje parcelario subsuperficial conectado a un cárcamo de bombeo; esta parcela se localiza en el ejido Moroncárit del municipio de Huatabampo, Son. Para realizar la extracción de agua y enviarla hacia la red de drenaje a cielo abierto del DR distante a 900 m, en 2014 se instaló un aerogenerador. Antes del inicio del bombeo en el periodo marzo-octubre de 2014 se estimó que los niveles medios de CE tuvieron un valor de 12 dS m^{-1} . Pero a partir de noviembre del mismo año coincidente con el inicio del bombeo, los valores de CE disminuyeron hasta 7 dS m^{-1} . Estos resultados muestran que el nivel de CE está disminuyendo por efecto del bombeo del agua freática, que está llevando a cabo un aerogenerador (Pulido y Saucedo, 2015).

Los objetivos del presente trabajo son:

1. Analizar la variación mensual de la salinidad y de niveles freáticos superficiales del área de una parcela piloto y su superficie de influencia, localizada en el Módulo de Riego 06 del Distrito de Riego 038 río Mayo, Son.
2. Estudiar el efecto del bombeo del drenaje parcelario subsuperficial accionado mediante energía eólica, en la disminución de la salinidad del suelo y de niveles freáticos superficiales, en una parcela piloto instalada en el Módulo de Riego 06 del Distrito de Riego 038 río Mayo, Son.

Materiales y métodos

El presente proyecto se realizó durante el año 2017 en el DR 038 Río Mayo, Son. mismo que se localiza entre los paralelos $26^{\circ}21'$ y $28^{\circ}31'$ N y meridianos $108^{\circ}26'$ y $110^{\circ}05'$, con una altura media de 40 msnm. El DR queda comprendido en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, en el sur del estado de Sonora; tiene una superficie de riego de 96,951 ha, la cual es regada por gravedad con agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines, y con agua de pozos de bombeo. Su clima es estepario semiárido, la $PP \bar{x}$ anual es de 388 mm, la $T \bar{x}$ anual es de 21.4° C , y la evaporación media anual es de 2,222 mm (Pulido *et al.*, 2009; 2010; 2016).

La parcela piloto se encuentra en el ejido Moroncárit, municipio de Huatabampo, Son. Pertenece al Módulo de Riego No. 6; se localiza según coordenadas geográficas: $24^{\circ}44'53.33''$ norte y $109^{\circ}37'11.61''$ oeste; su altitud aproximada es de 3 metros sobre el nivel del mar (msn).

El muestreo de suelos y la monitorización mensual de la salinidad se llevaron a cabo en una red de 60 sitios establecida en la parcela piloto. Se realizó un muestreo de suelo durante el ciclo de cultivo otoño-invierno, en la primera semana de mayo. Las muestras



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

se tomaron manualmente a 30 y 60 cm de profundidad. En cada muestra se analizaron el pH (en pasta), la conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos; con los contenidos de calcio, sodio y magnesio se calcularon la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI). En la red aludida, mensualmente se monitorizó la CE a las profundidades de 0-60 (estrato superficial) y 0-150 cm (estrato subsuperficial), con un sensor electromagnético EM-38 de Geonics Limited (Figura 1); y con los datos generados se elaboraron mapas de clases de salinidad. Para la realización de los mapas se utilizó el programa ArcGis.

En una red de 18 pozos de observación del manto freático superficial existente en la parcela piloto y su área de influencia, se llevaron a cabo monitorizaciones mensuales de la profundidad al nivel freático. Con los datos desarrollados se elaboraron mapas de isobatas mensuales. Para la realización de los mapas se utilizó el programa ArcGis. El volumen de drenaje bombeado durante el ciclo agrícola 2016-2017 se obtuvo de un medidor volumétrico instalado sobre la tubería de succión próxima al cárcamo de bombeo. La turbina eólica es un modelo de aparato del No. 12 constituido de una hélice de 18 aspas galvanizadas, una torre galvanizada de 10 m de altura, y pistón y cilindro de bronce de 5". La capacidad de bombeo es de 4,900 l/h con vientos de 24 km/h, aproximadamente.



Figura 1. Monitorización de la salinidad con un sensor electromagnético EM-38 de Geonics Limited®.

Para evaluar el impacto del bombeo del drenaje se sembró trigo en diciembre de 2016, el cual fue cosechado en mayo de 2017. La cosecha consistió en la toma de muestras



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

de espigas de trigo ubicadas dentro de la red de monitorización de la CE; la superficie de cada muestra fue de 1 m², y se colectaron tanto en la parcela piloto como en parcelas del área de influencia del bombeo.

Las condiciones de T, PP y ETP diarios registrados en el área del proyecto, se obtuvieron de una estación meteorológica ubicada en la Ciudad de Huatabampo, Sonora, distante 7 km de la parcela piloto, localizada según coordenadas geográficas 26.8167° de latitud norte y 109.6° de longitud oeste de Greenwich, y a 8 msnm.

Los datos agronómicos y climáticos desarrollados se analizaron estadísticamente por medio de un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias estadísticamente significativas entre mediciones mensuales y entre estratos de suelo; se calcularon las desviaciones estándar (DESV) y los coeficientes de variación (CV) tanto de datos agronómicos como de datos climáticos. Es así que la CE fue la variable dependiente, y como variables independientes MF, T, ET, PP, y volumen de bombeo. El análisis estadístico se hizo a través del programa Excel 2010. El bombeo se llevó a cabo entre los meses de noviembre de 2016 hasta abril de 2017; esto es, a lo largo del ciclo agrícola de otoño-invierno y tomando en cuenta que los riegos se suspendieron a fines de abril de 2017. El impacto del bombeo del drenaje en la desalinización de los suelos se determinó mediante análisis de regresión lineal simple, y por medio de mapas de salinidad e isobatas.

Resultados

Variación de la salinidad del suelo y de niveles freáticos superficiales

En \bar{x} en el estrato a 0-60 cm (estrato superficial) se calculó una salinidad de 7.1 dS m⁻¹, mientras que en el estrato a 0-150 cm (estrato subsuperficial) el \bar{x} fue de 24.3 dS m⁻¹; es así que se determinaron niveles de salinidad mayores en la profundidad 0-150 cm que en la de 0-60 cm. En el estrato superficial los coeficientes de variación (CV) fluctuaron entre 63.9% en enero y 84.0% en abril; los mayores CV se obtuvieron fuera del periodo de riegos, desde abril y hasta julio, cuando los niveles freáticos están más profundos y cuando la T tiende a aumentar. En el estrato subsuperficial los CV variaron entre 28.2% en abril hasta 40.0% en junio, y coincidieron con el estrato superficial por cuanto los mayores CV se calcularon después de concluir el ciclo agrícola de O-I. Estadísticamente hay diferencias entre estratos, ya que F calculada (F_c) = 274.38 > $F_{0.05}$ = 3.40. Entre meses en ambos estratos de suelo no hubo diferencias estadísticas significativas puesto que F_c = 2.95 < $F_{0.05}$ = 3.02. Los niveles de salinidad mensuales estimados en el estrato superficial entre sitios son estadísticamente diferentes, ya que los valores más altos se obtuvieron en el área de influencia donde no



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

hay drenaje subsuperficial; $F_c = 60.44 > F_{0.05} = 1.89$. Asimismo, en el estrato subsuperficial se encontró significancia estadística, con $F_c = 45.04 > F_{0.05} = 1.34$.

En la profundidad a 60 cm el nivel más alto se logró en noviembre; posteriormente en marzo y abril. En el estrato a 150 cm los niveles de salinidad más altos se observaron entre los meses de enero y febrero. La parcela piloto comprende una superficie de 4.3 ha. En el estrato a 60 cm en la parcela piloto los niveles de CE más altos (20.7 dS m^{-1}) se obtuvieron al inicio del bombeo que coincide con el inicio del ciclo agrícola de otoño-invierno ($\bar{x} = 8.2 \text{ dS m}^{-1}$), y en el periodo diciembre-mayo cuando los niveles freáticos están más superficiales, en coincidencia con el periodo de riegos; en verano en septiembre se observó un valor alto, en coincidencia con las altas temperaturas (figura 2a). En el estrato a 150 cm los niveles de CE más altos (en un sitio fue de 31.6 dS m^{-1} y en \bar{x} mensual fue de 31.1 dS m^{-1} en febrero) se obtuvieron durante el ciclo agrícola en coincidencia con los niveles freáticos superficiales y en septiembre, cuando se observaron las temperaturas más altas. La parcela piloto y su zona de influencia ocupan una superficie aproximada de 40 ha. En tres años de observaciones (noviembre de 2014-octubre de 2017) se distingue que a partir del inicio del bombeo la CE bajó de 12 dS m^{-1} hasta 5 dS m^{-1} ; durante noviembre de 2016-octubre 2017 el nivel de ce \bar{x} fue de 5 dS m^{-1} (figura 2b).

En la parcela piloto y su área de influencia en el estrato a 60 cm los niveles de CE más altos se encontraron en noviembre, en el inicio del bombeo, durante el ciclo agrícola (enero-mayo), y en septiembre. En el estrato a 150 cm los mayores niveles se determinaron en febrero, durante el ciclo agrícola que es el único en que se aplica agua de riego a lo largo del año, y en septiembre, cuando no hay riegos pero sí hay lluvias que aportan humedad, en coincidencia con las mayores temperaturas anuales.

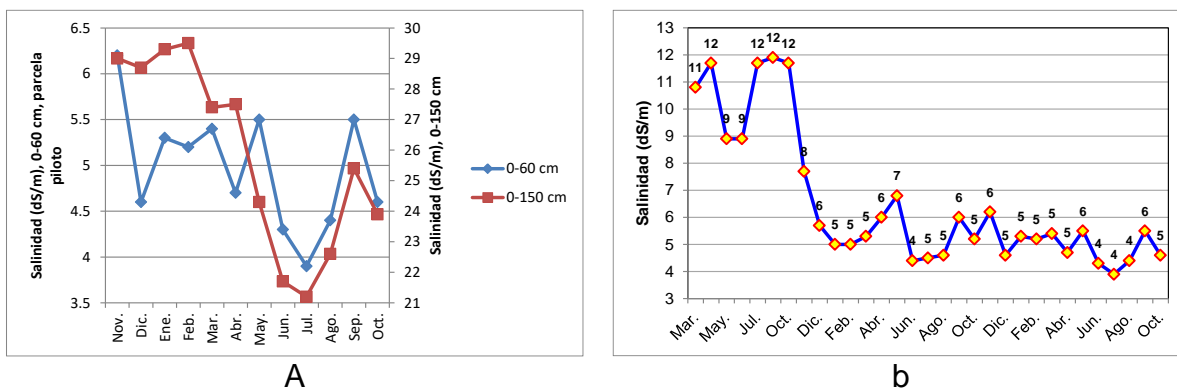


Figura 2. (a) Variación mensual de la salinidad en las profundidades a 0-60 y 0-150 cm, en el área de la parcela piloto, y (b) variación de la salinidad en el área de la parcela piloto durante 2014-2017.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

Los resultados de laboratorio del análisis químico de 120 muestras de suelo, correspondientes a los estratos 0-30 y 30-60 cm de profundidad revelaron que en la parcela piloto se analizaron valores de salinidad inferiores que en el área total de estudio de 43 ha. En el estrato de 30 cm de la parcela piloto el nivel medio fue de 6.5 dS m^{-1} y en el estrato de 60 cm el nivel fue de 12.8 dS m^{-1} , mientras que en la parcela piloto y su área de influencia resultaron de 13.2 y 19.3 dS m^{-1} , respectivamente. Las diferencias se deben a la influencia del bombeo del drenaje donde se lleva a cabo un proceso de lavado de sales solubles que es más intenso en la parcela piloto, que es la única parcela que dispone de drenaje subsuperficial, en la zona de estudio de 43 ha.

Los niveles de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) calculados en la parcela piloto también resultaron superiores que en la zona de influencia. En la parcela piloto en el estrato de 30 cm el PSI fue de 8.6 y en el subsuperficial fue de 11.4; por su parte en la zona de influencia los niveles fueron de 10.7 y 13.5, respectivamente. En ambos estratos de suelo se determinaron suelos normales, salinos y salino-sódicos; no se analizaron suelos sódicos. Se determinó que no es requerida la aplicación de mejoradores del suelo en virtud de que los niveles de calcio y magnesio son superiores al del sodio; esto significa que con el lavado de sales, bombeo del drenaje, y un manejo adecuado del cultivo y del suelo, la rehabilitación de los suelos es viable.

Se desarrollaron mapas mensuales de salinidad para clasificar el área de estudio, a las profundidades de 0-60 y 0-150 cm. Al comparar la superficie ensalitrada ($\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$) de la parcela piloto y de su área de influencia, se encontró que hay más afectaciones por sales en la parcela piloto y su área de influencia. Del mismo modo, en ambas áreas se determinó mayores afectaciones en el estrato subsuperficial que en el estrato superficial.

En el estrato superficial de la parcela piloto se estimaron suelos de 2^a ($4-8 \text{ dS m}^{-1}$) y 3^a clases ($8-12 \text{ dS m}^{-1}$) en noviembre, en diciembre 50% del suelo fue de 1^a clase ($<4 \text{ dS m}^{-1}$) y el otro 50% de 2^a clase (figura 3), en enero el 96% resultó de 2^a clase, en febrero el 95% de 2^a clase, en marzo el 94% con suelos de 2^a clase, en abril el 52% de 1^a clase y el 48% de 2^a clase, en mayo el 100% de 2^a clase, en junio el 65% de 1^a clase y el 35% de 2^a clase, y en julio el 82% de 1^a clase y el 18% de 2^a clase; las mayores afectaciones se estimaron en el periodo enero-marzo coincidiendo con los niveles freáticos más superficiales, y en mayo, al finalizar el ciclo agrícola y con el inicio de la temporada de calor cuyos meses más cálidos en el año son entre junio y octubre. Los niveles más bajos se estimaron en diciembre, por la acción del bombeo; en abril cuando terminaron las aplicaciones de agua de riego en el DR y en consecuencia las aportaciones de humedad al manto freático superficial; y en junio y julio debido a que entre mayo y noviembre de cada año los niveles freáticos están más profundos porque prácticamente no hay riegos (figura 3).



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

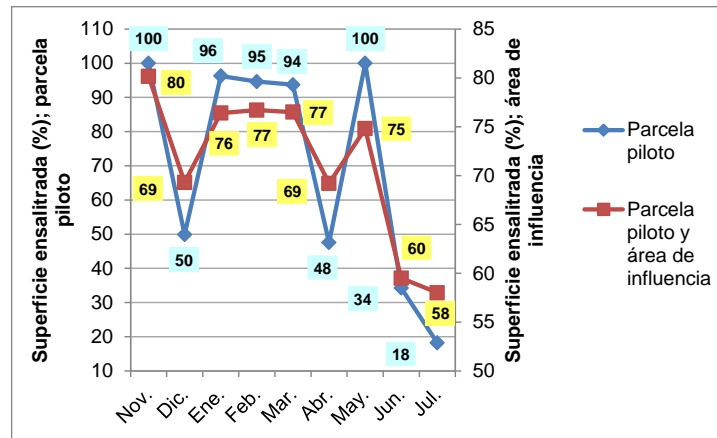


Figura 3. Superficie mensual ensalitrada en el estrato superficial en la parcela piloto y en la parcela piloto y su área de influencia.

En el estrato superficial de la parcela piloto y su área de influencia las afectaciones por salinidad ocuparon mayor superficie que en la parcela piloto. Esto se debió a que dentro de la zona de influencia existen parcelas abandonadas con altos niveles de salinidad, y en su mayoría las parcelas cultivadas exhiben manchones de sales. En las parcelas de la zona de influencia el descenso de la salinidad es menos rápido que en la parcela piloto debido a que no cuentan con drenaje parcelario; sin embargo existe un flujo del agua subsuperficial hacia el cárcamo de bombeo debido a diferencias de presión en el agua subsuperficial. La evolución mensual de las afectaciones tuvo un patrón semejante al de la parcela piloto (figura 3). Entonces es claro que los niveles freáticos superficiales y las condiciones meteorológicas influyen en las afectaciones por salinidad.

En noviembre en el estrato superficial se clasificaron suelos de primera a cuarta clases; con predominio de los suelos de 2^a, 3^a y 1^a clases; en este orden (figura 4a). Los suelos de 3^a y 4^a clases se delimitaron en parcelas abandonadas. La parcela piloto señalada en un recuadro en el centro de la figura 6 exhibe suelos de 2^a clase; en esta figura los suelos de primera clase se delimitaron hacia el sur y sureste del área de estudio. En el estrato subsuperficial predominaron suelos de 5^a clase, y se estimaron menores áreas de suelos de 3^a y 4^a clases; estas dos clases se definieron hacia el este y sureste de la parcela piloto, en concordancia con los suelos del estrato superficial (figura 4b). Los menores niveles de CE se encontraron en parcelas próximas a un canal de riego sin revestir del noreste hacia el sureste junto a la zona de estudio; es evidente que dicho canal presenta filtraciones que aportan humedad al nivel freático. El movimiento de la humedad es hacia el cárcamo de bombeo.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

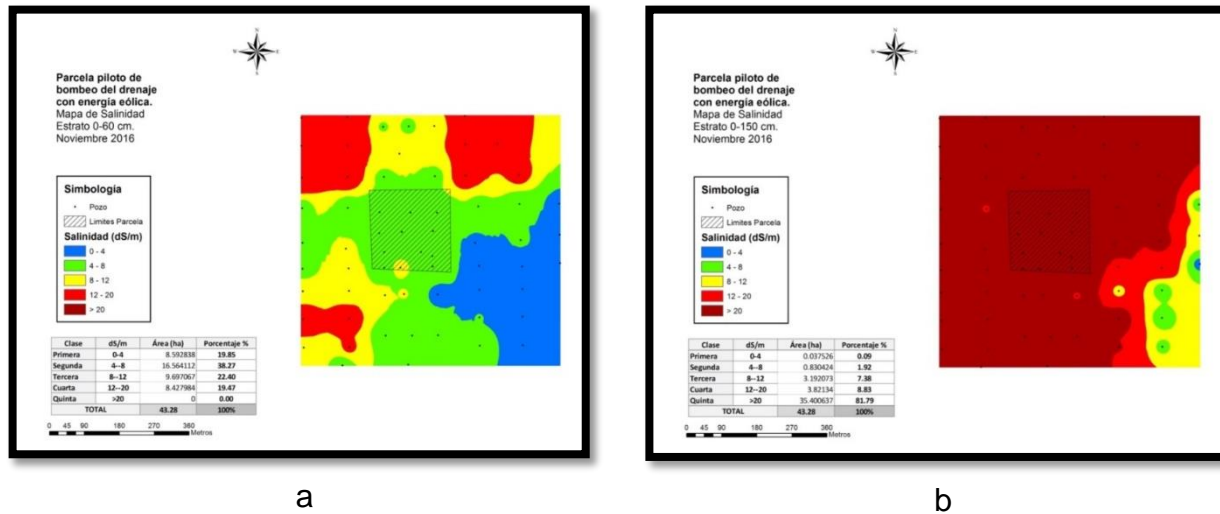


Figura 4. Mapas de salinidad de noviembre en (a) estrato superficial, y (b) estrato subsuperficial.

Históricamente en el DR No. 038 Río Mayo entre enero y marzo se tienen los más altos niveles freáticos, en correspondencia con el ciclo agrícola donde se aplican altos volúmenes de riego (Pulido *et al.*, 2009 y Pulido, 2016); este patrón se repitió en el presente estudio. En consecuencia en febrero y marzo al igual que en enero, en los dos estratos de suelo se observaron altos niveles de salinidad. En el estrato superficial el 77% de la superficie se clasificó con suelos de las clases 2^a a 4^a (12-20 dS m⁻¹), con predominio de suelos de 2^a clase (ilustraciones 18 y 20). En el estrato subsuperficial el 85% (febrero) y 82% (marzo) fue ocupado con suelos de 5^a clase (>20 dS m⁻¹). Se observó que a pesar del bombeo, los problemas de salinidad subsisten, por lo cual el volumen de drenaje evacuado por la turbina eólica es insuficiente.

En mayo se presentó una resalinización debida al ascenso de sales por capilaridad, asociada al aumento de T; del mismo modo el aumento se debió a la suspensión del bombeo alrededor del 25 de abril por descompostura de la turbina eólica. El 75% de la superficie de las 43 ha que incluye la parcela piloto y su área de influencia presentó diferentes niveles de CE en el estrato superficial, mientras que en el estrato subsuperficial el 99% de la superficie se clasificó como ensalitrada. En las 4.3 ha de la parcela piloto los suelos se clasificaron de 2^a clase en el estrato superficial. En junio y julio, ya sin el bombeo, en el estrato superficial los niveles de salinidad bajaron hasta ocupar el 60 y 58% de la superficie total, respectivamente; en el estrato subsuperficial en ambos meses los niveles de salinidad también bajaron.

Los niveles freáticos medios mensuales en la parcela piloto y su área de influencia variaron según se observa en la figura 5. Los meses que tuvieron MF menos profundos



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

fueron desde diciembre hasta abril, con un \bar{x} entre 1.02-0.96; los meses críticos son enero-marzo, dentro del ciclo agrícola de otoño-invierno. Cuando terminó el ciclo agrícola en mayo los niveles freáticos bajaron, y en julio el MF fue de 1.89 m. Entre noviembre y abril la DESV calculada con datos mensuales fue de 0.27 m, mientras que entre mayo y julio fue de 0.42 m; en este caso debido a la relativamente nula aportación de humedad por la conclusión del ciclo agrícola de otoño-invierno. Los CV variaron de 21.6% en noviembre cuando inició el ciclo agrícola y de 35.4% en marzo, cuando el MF se observó más somero.

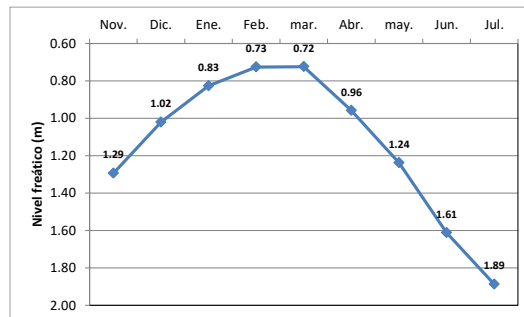


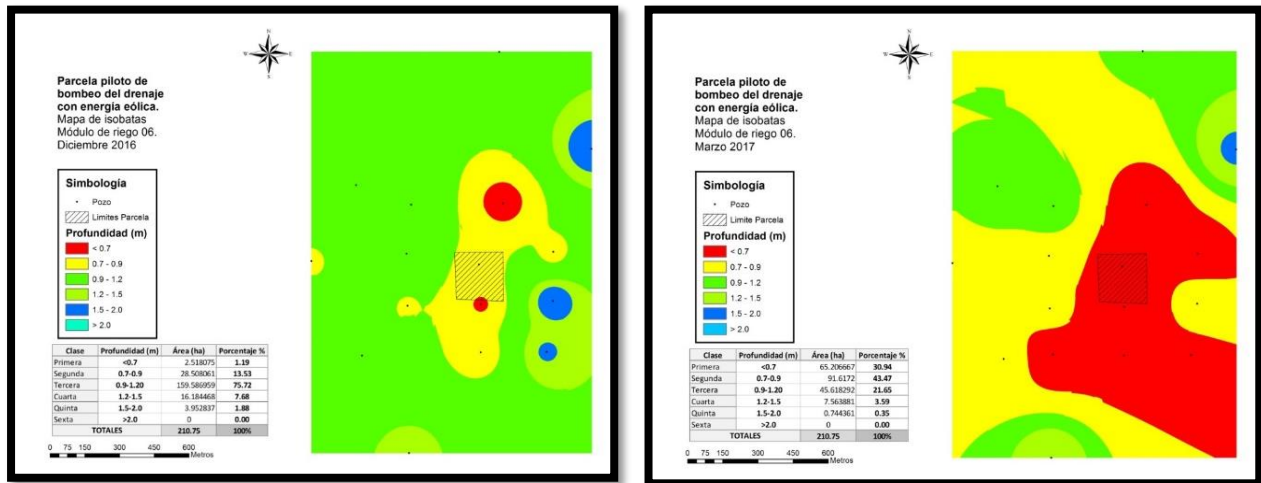
Figura 5. Variación media mensual de niveles freáticos.

Con el uso del programa ArcGis se produjeron mapas mensuales de isobatas. Las mayores afectaciones se demarcaron entre los meses de enero-marzo, periodo en el cual los niveles freáticos estuvieron más superficiales (colores rojo y amarillo, con profundidades menores de 0.9 m). La parcela piloto se muestra en recuadro en el centro de la figura 6. Se determinó que el flujo del agua subterránea es del noreste hacia la parcela piloto; probablemente por filtraciones del canal ubicado del lado oriente y que tiene una dirección de norte a sur. Las áreas más afectadas coinciden con las áreas más afectadas por salinidad. La superficie total que cubren los mapas de isobatas es de 211 ha, debido a que la red de pozos de observación del nivel freático cubre mayor superficie que la de la parcela piloto y su zona de influencia. Así se pudo observar que las aportaciones al nivel freático se originan del lado noreste de la zona de estudio de 43 ha, por existir un canal sin revestir. Las zonas más afectadas, de colores rojo y amarillo se localizan en el área de la parcela piloto, que es el sitio de menor altitud considerando las 43 ha del área de estudio.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018



a b
Figura 6. Mapa de isobatas de (a) diciembre, y (b) marzo.

Los MF medidos en el periodo noviembre 2016-julio 2017 mostraron diferencias estadísticas significativas entre los meses $F_c=40.26 > F_{0.05}=1.93$, de acuerdo con el ANOVA llevado a cabo, lo que indica que los MF tienen por origen las aportaciones del agua de riego que ocasionan pérdidas por percolación profunda; que son aplicadas a parcelas que no tienen drenaje natural, y en consecuencia se acumulan en el centro del área de estudio, donde se localiza el cárcamo de bombeo que es el punto topográfico más bajo.

Se determinó una estrecha relación entre la salinidad y los niveles freáticos superficiales medidos en el periodo diciembre-julio, $r^2= 0.84$; $F_c=27.82 > F_{0.05}=6.60$ (figura 7a), que explica la presencia de superficies ensalitradas en el estrato superficial en la parcela piloto. Los niveles de CE más altos se observaron entre enero y marzo, cuando los niveles freáticos estuvieron más superficiales (figura 7b). Por otra parte, se analizó estadísticamente según el ANOVA que los MF tienen efecto en el ensalitramiento en el estrato subsuperficial, ya que éste tiene mayor contacto con el manto freático superficial; $r^2= 0.96$, $F_c=56.94 > F_{0.05}=18.51$. Los niveles de CE son mayores que en el estrato superficial, y en abril cuando han concluido las aportaciones de humedad por la culminación del periodo de riegos, el MF profundiza y el nivel de CE baja (figura 8a,b) Dado que en el área experimental no existe drenaje natural que facilite la salida de escurrimientos debido a las condiciones topográficas, edafológicas, y de la baja altitud del área, se analizó el efecto del bombeo del agua de drenaje que es descargada en un cárcamo de bombeo, por el sistema de drenaje.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

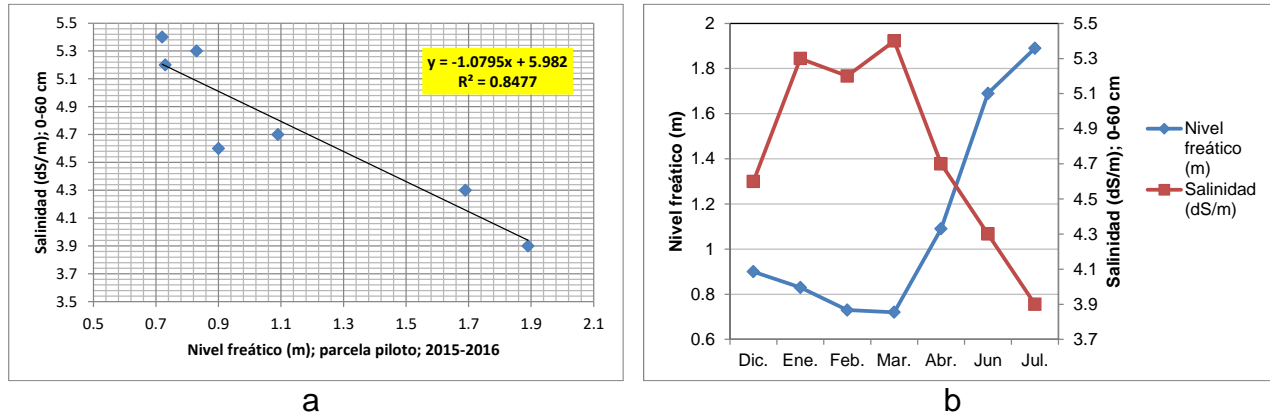


Figura 7. (a) Correlación entre la salinidad del estrato a 0-60 cm y niveles freáticos superficiales en el periodo diciembre-julio; y (b) variación de la salinidad y de niveles freáticos.

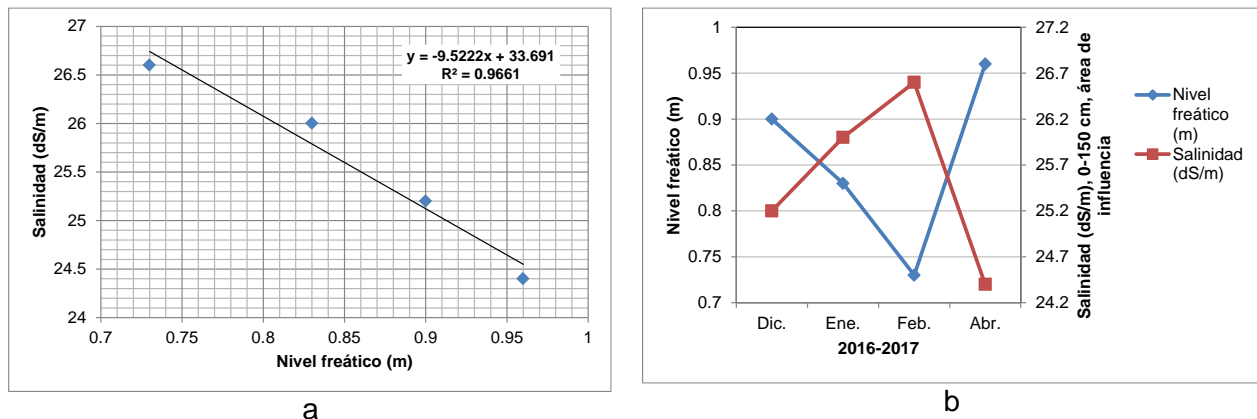


Figura 8. (a) Correlación entre la salinidad del estrato a 0-150 cm y niveles freáticos superficiales en el periodo diciembre-abril; y (b) variación de la salinidad y de niveles freáticos.

Efecto del bombeo del drenaje en la salinidad del suelo y en el nivel freático superficial

Se examinó que con el incremento del bombeo mensual se redujo la salinidad en la parcela piloto (figura 9a). Se encontró diferencia estadística significativa con 95% de confianza, ya que $r^2=0.97$; $F_c=68.86 > F_{0.05}=18.51$. Los niveles de salinidad más altos se determinaron en febrero y marzo, coincidentes con los menores volúmenes de bombeo (figura 9b). Este resultado muestra lo necesario que es la extracción del agua de drenaje del cárcamo para reducir el nivel freático y a su vez bajar el nivel de salinidad en la parcela piloto. Asimismo, el efecto del bombeo en la reducción de la salinidad en la parcela piloto y su área de influencia resultó estadísticamente significativo, dado que $F_c=16.10 > F_{0.05}=10.12$ (figura 10a,b). Esto es, el bombeo del agua de drenaje que lleva



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

a cabo el aerogenerador desde el cárcamo de bombeo hasta el sitio de descarga del agua en la red de drenaje a cielo abierto distante 900 m, reduce los niveles de salinidad del suelo tanto en la parcela piloto, como en su área de influencia. De esta manera, la desalinización de los suelos crea mejores condiciones para el desarrollo del cultivo de trigo que fue sembrado en la parcela piloto en diciembre de 2016.

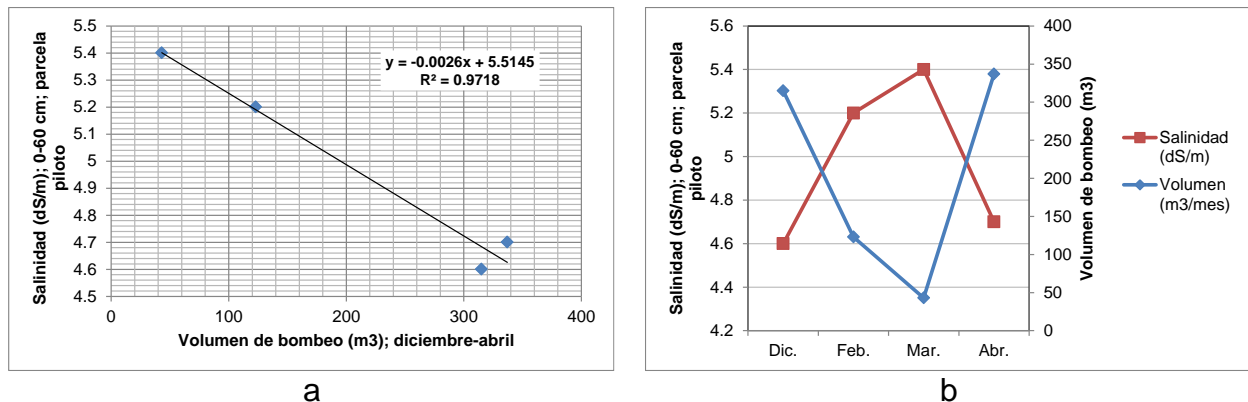


Figura 9. (a) Correlación entre el volumen de bombeo y la salinidad en el estrato superficial de la parcela piloto, y (b) variación mensual del volumen de bombeo y la salinidad.

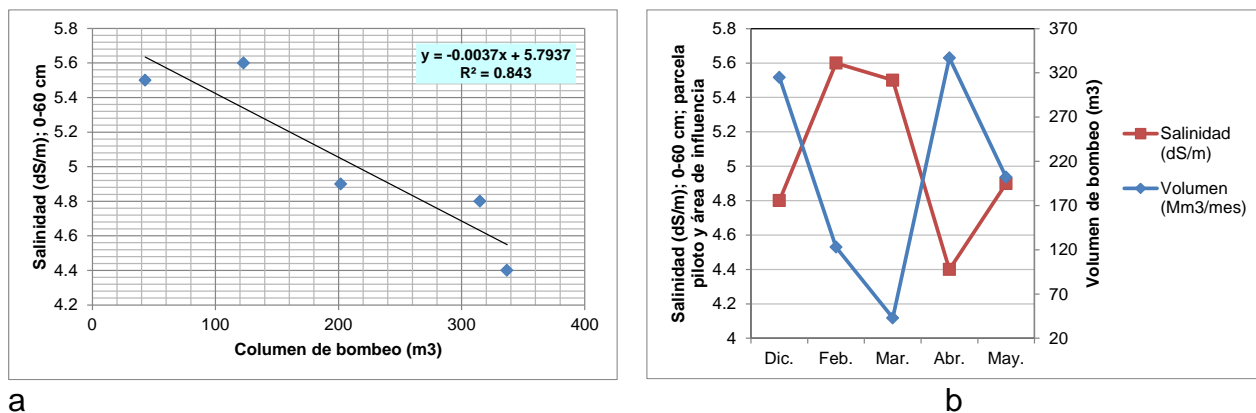


Figura 10. Correlación entre el volumen de bombeo y la salinidad del estrato superficial en la parcela piloto y su área de influencia, periodo diciembre-abril.

Se determinó estadísticamente la influencia del bombeo en la reducción del nivel freático en la parcela piloto y su área de influencia, en el periodo diciembre-abril. Los niveles freáticos más someros coincidieron con los volúmenes de bombeo más bajos. La relación es estadísticamente significativa; $r^2 = 0.92$, $F_c = 23.86 > F_{0.05} = 18.51$ (figura 11a,b). Este análisis prueba que por medio del bombeo con energía eólica disminuyen los niveles freáticos. Según el modelo de regresión de la figura 12a por cada 100 m³ bombeados el nivel freático desciende 12 cm.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

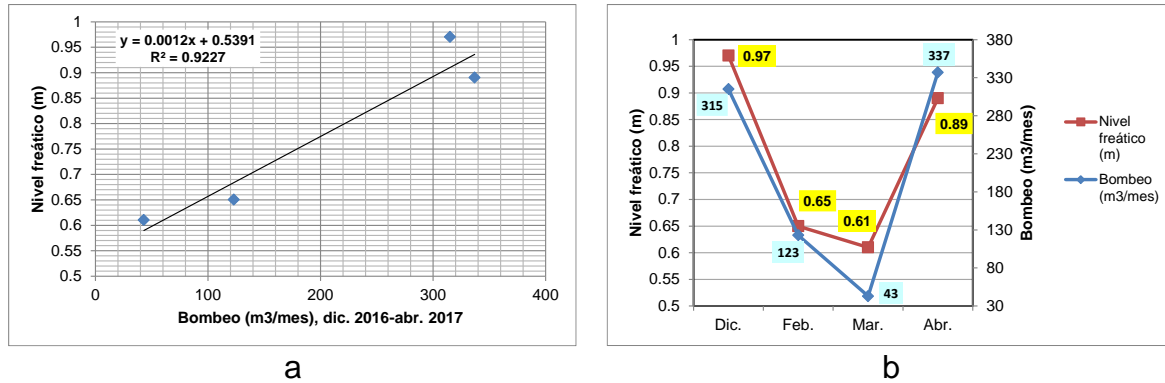


Figura 11. (a) Correlación entre el volumen de bombeo y niveles freáticos, y (b) variación mensual del volumen de bombeo y niveles freáticos, durante diciembre-abril.

A partir de que se inició con el bombeo en la parcela piloto en noviembre de 2014 en un periodo de tres años (2015-2017), se determinó que éste influyó en la reducción de la salinidad en el estrato superficial, tanto en la parcela piloto como en su área de influencia (figura 12). En 2015 el nivel \bar{x} de salinidad de 7.0 dS m^{-1} se redujo a 5.2 dS m^{-1} en 2017; del mismo modo, el volumen de bombeo tuvo un incremento de $1,175 \text{ m}^3$ en 2015 hasta $1,304 \text{ m}^3$ en 2016; en 2017 se registró un volumen de $1,282 \text{ m}^3$. El incremento de volúmenes de bombeo correlacionó con los volúmenes de riego aplicados en el Módulo de Riego 06 durante los ciclos agrícolas de otoño-invierno 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017 (figura 13).

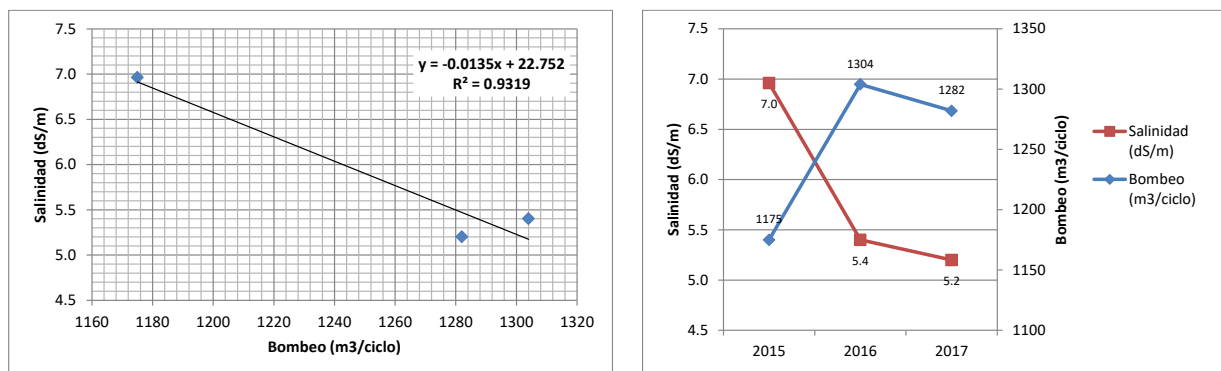


Figura 12. Impacto del bombeo anual en la salinidad del suelo de la parcela piloto, profundidad 0-60 cm, periodo 2015-2017.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

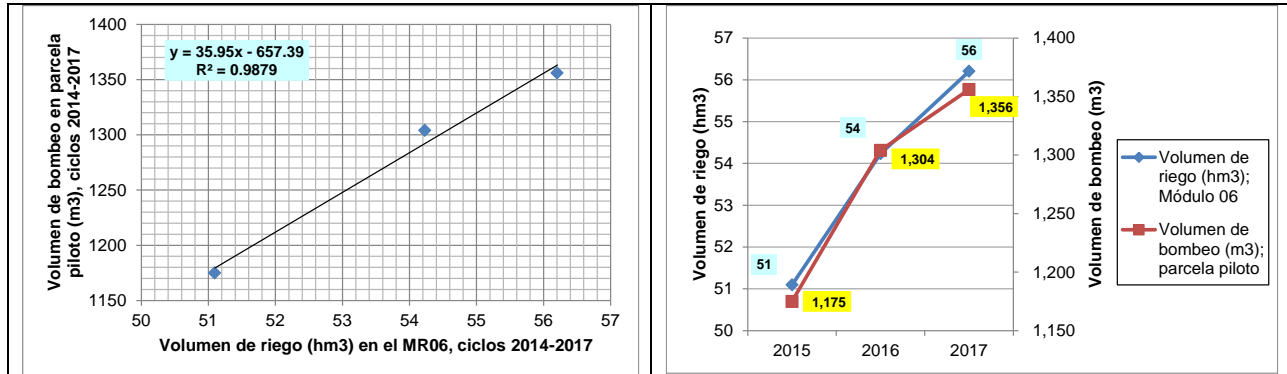


Figura 13. Correlación de volúmenes de bombeo en la parcela piloto y su área de influencia y volúmenes de riego aplicados en el Módulo de Riego 06.

El bombeo anual que realizó el aerogenerador en el periodo 2015-2017 impactó en la reducción de niveles freáticos medios anuales, tanto en la parcela piloto como en su área de influencia (figura 14). Los volúmenes de bombeo más altos registrados en 2016 y 2017 coincidieron con los niveles freáticos más profundos en los mismos años. Por lo tanto, el bombeo del agua del sistema de drenaje parcelario instalado en la parcela piloto en 1998, realizado por medio de un aerogenerador, profundiza el nivel freático con lo cual disminuye la salinidad del suelo, hasta niveles que permiten un mejor desarrollo del cultivo de trigo. Sin embargo, los suelos de la parcela piloto llegaron a un nivel de salinidad de 5.2 dS m^{-1} que los ubica en segunda clase. Es necesario entonces incrementar el volumen de bombeo para que en consecuencia los niveles de salinidad desciendan a $<4 \text{ dS m}^{-1}$ para ser suelos de primera clase agrícola. Esto permitiría la siembra de cultivos moderadamente sensibles y sensibles a la salinidad como maíz para grano y frijol que se siembran extensivamente en el DR 038.

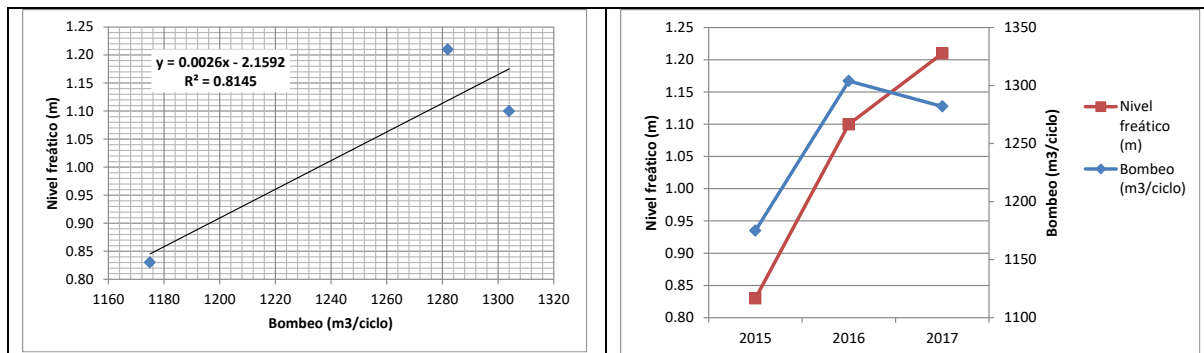


Figura 14. Impacto del bombeo anual en los niveles freáticos de la parcela piloto, periodo 2015-2017.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

Conclusiones

1. Los mayores niveles de salinidad se analizaron en las parcelas aledañas a la parcela piloto que carecen de un sistema de drenaje subsuperficial. El estrato de suelo más afectado es el subsuperficial, porque está en mayor contacto con el nivel freático superficial. Las mayores afectaciones en la parcela piloto y su área de influencia se observaron cuando no existe bombeo, y entre enero y marzo, coincidiendo con los niveles freáticos más superficiales.
2. Los niveles freáticos superficiales aumentan los niveles de salinidad en los suelos, tanto en la parcela piloto que dispone de un sistema de drenaje subsuperficial, como de su zona de influencia que no cuenta con drenaje parcelario; las mayores afectaciones se analizaron en la parcela piloto que se localiza en la zona topográfica más baja, ya que la dirección del movimiento del agua subsuperficial es hacia el sitio del bombeo en el cual se forma una especie de cono o sumidero.
3. Con el bombeo del drenaje impulsado por energía eólica disminuyó la salinidad del suelo y se desalinizaron los suelos, hasta un nivel que permitiría obtener de buenos a altos rendimientos de trigo. Por lo tanto, el bombeo del drenaje impulsado por energía eólica es una medida de adaptación al calentamiento global, aplicable a tierras bajas de las planicies costeras, localizadas por debajo de la cota cinco metros sobre el nivel medio del mar.

Referencias bibliográficas

- Corwin, D. L.; Lesch, S.M y Lobell, D.B. (2012). Laboratory and field measurements. En Wallender, W.W. y Tanji, K.K (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (pp.295-341). Reston, VA: ASCE.
- De la Peña, I. (1993). Problemas de salinidad y drenaje en México. Documento de circulación interna. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en el Noroeste, Subgerencia de Riego y Drenaje, Cd. Obregón, Sonora.
- IPCC. (2014). Climate Change (2014): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (ed.)]. IPCC, Geneve, Switzerland, 151 p.



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

- Maas, E. V. (1990). Crop Salt Tolerance: Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71.
- Pulido M., L., Wiegand, C.L., González Meraz, J., Robles Rubio, B.D, Cisneros Estrada, X. y Lemus Ramírez, O. (2003). La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. *Ingeniería Hidráulica en México*, 18, 2, 83-97.
- Pulido, M., L.; González Meraz, J. y Villarreal, M. (2009). Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24, 1, 55-72.
- Pulido, M. L.; González Meraz, J. Wiegand, C.J, Infante Reyes, J. y Delgado, J.M. (2010). Monitoreo de la salinidad mediante sensores remotos. *Terra Latinoamericana*, 28, 1, 15-26.
- Pulido, M. L. y H. E. Saucedo Rojas. (2015). Informe final del Proyecto RD-1506.1 Evaluación de sistemas de drenaje parcelario y sistemas de bombeo con energía eólica para mitigar y controlar el ensalitramiento en suelos agrícolas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor., México.
- Pulido, M. L. (2016). Cambio climático, ensalitramiento de suelos y producción agrícola en áreas de riego. *Terra Latinoamericana*, Vol. 34, núm. 2, pp 2017-218.
- Reynolds, M. P. y R. Cruz. (2010). Adapting crops to climate change: a summary. In: *Climate change and crop production*. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). Editado por M. P. Reynolds. CAB International 2010. www.cabi.org.
- Salinas, P, J. A., Colorado Ruiz, G. y Maya Magaña, M.E. (2015). Escenarios de cambio climático para México. En: *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Tanji, K.K. y Wallender, WW. (2012). Nature and extent of agricultural salinity and sodicity. En W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp 1-25). Reston, VA: ASCE.