

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE

SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA

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

JIUTEPEC, MORELOS, OCTUBRE DE 2015

Directorio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Felipe Arreguín Cortés
Director General del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Nahun Hamed García Villanueva
Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Distrito de Riego del Río Mayo, S. de R. L. de I. P. y C. V.

Ing. Francisco Navarro Esquer
Presidente del Consejo de Administración

M.C. Yamil Marcelino Bisher Álvarez
Gerente General

Inocente Aragón Figueroa
Gerente de Operación

Módulo de Riego 06

Héctor Manuel Gastélum Nebuay
Presidente

Carlos Ríos Franco
Tesorero

Ing. René Valenzuela Gutiérrez
Gerente

Distrito de Riego 038 Río Mayo

Ing. Benito Coronado López
Ing. en Jefe del Distrito de Riego



Evaluación de sistemas de drenaje parcelario y sistemas de bombeo con energía eólica para mitigar y controlar el ensalitramiento en suelos agrícolas



Ing. Rosa Imelda Luque Rodríguez
Jefe de Operación

Autores por parte del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

M.C. Leonardo Pulido Madrigal
Jefe de Proyecto

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Autores por parte del Distrito de Riego del Río Mayo, S. de R. L. de I. P. y C. V.

Ing. Yamil Bisher Álvarez
Gerente General

Inocente Aragón Figueroa
Gerente de Operación

Ing. Héctor Enrique Escalante Esquer
Apoyo técnico en trabajo de campo

Agradecimientos

Se agradece a las autoridades de la S. de R. L. de I. P. y C. V. del Distrito de Riego del Río Mayo y del Módulo de Riego 06 por su interés para la realización del presente estudio, y por las facilidades brindadas y los apoyos otorgados para llevar a cabo exitosamente el presente estudio.

Se agradece a las autoridades del Distrito de Riego 038 Río Mayo de la CONAGUA por las facilidades ofrecidas para la realización del presente estudio.

Se agradece la colaboración del Ing. Héctor Enrique Escalante Esquer por su apoyo en la ejecución del trabajo de campo.

Se agradece al propietario de la parcela piloto, Profr. Víctor Manuel Mendivil por las facilidades concedidas para llevar a cabo el presente estudio.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
METODOLOGÍA.....	4
Localización del proyecto	4
Muestreo de suelos y monitorización de la salinidad del suelo.....	5
Monitorización de niveles freáticos.....	7
Volumen de agua bombeado.....	7
Estimación del impacto de la salinidad en el rendimiento.....	
Registro de datos meteorológicos.....	10
RESULTADOS	12
Salinidad analizada	12
Variación espacial y temporal de la salinidad del suelo.....	17
Variación espacial y temporal del nivel freático.....	21
Correlación de la salinidad con la temperatura y con la evapotranspiración.....	22
Correlación de la salinidad del suelo con la profundidad del nivel freático.....	26
Impacto de la salinidad en el rendimiento de trigo.....	28
Volumen de bombeo.....	30
CONCLUSIONES.....	32
RECOMENDACIONES.....	34
BIBLIOGRAFÍA.....	35

INTRODUCCIÓN

La importancia de estudiar la salinidad del suelo en los distritos de riego del norte de México es por el impacto negativo que las sales en exceso causan en la producción de cosechas, ya que todas las especies cultivadas tienen un nivel de tolerancia a la salinidad, por arriba del cual disminuyen los rendimientos y la producción de cosechas. Por ejemplo en los distritos de riego 076 Valle del Carrizo, 038 Río Mayo y 041 Río Yaqui se estimó que por causas de la salinidad la disminución de producción de trigo fue de 104,100 ton, 8,900 ton en algodón y 28,100 ton de sorgo, lo cual da un total de 141,100 ton, equivalentes al 14% de la producción estimada: 1'010,200 toneladas (Pulido *et al.*, 2003). Además, los distritos de riego que están más afectados por la salinidad se localizan en las regiones áridas y semiáridas de México en las cuales la agricultura depende del agua captada en las presas existentes en la región, por lo que el análisis conjunto de la salinidad de suelos y el cambio climático es de gran importancia, y permitirá pensar y aplicar medidas preventivas para amortiguar su impacto negativo en la economía de las regiones y del país.

Alrededor del 32% del área del Distrito de Riego 038 río Mayo, Son. presenta afectaciones por salinidad, las cuales se localizan principalmente en los módulos de riego 05, 06, 01, 02, 03 y 07 que se ubican por debajo de la cota 10 msnm. Las afectaciones por sales impactan negativamente en la producción de cosechas, ya que en las parcelas con niveles más altos de sales no es posible obtener rendimientos con ventajas económicas, aún con la siembra de cultivos tolerantes.

En una investigación que está llevando a cabo el IMTA en el Distrito de Riego 038 sobre el impacto del calentamiento global en el ensalitramiento de los suelos, se reporta que los problemas de salinidad crecerán con el incremento de la temperatura, ligados a la disminución de precipitaciones pluviales, que están impactando en menores volúmenes de captación en la presa Adolfo Ruiz Cortines.

En el Módulo de Riego 05, cuya superficie de riego es de alrededor de 5,300 ha, se ha cuantificado que el 95% de su superficie presenta problemas de salinidad en diferente grado hasta una profundidad de 150 cm; asimismo, el 64% del área tiene problemas de niveles freáticos superficiales hasta 1.5 m de profundidad; en el 90% del área del módulo el agua freática contiene niveles altos de sales que inciden en el ensalitramiento del suelo, y también se ha observado que el agua de riego utilizada principalmente en los ciclos de cultivo de otoño-invierno, contienen niveles medios de sales que contribuyen en el ensalitramiento de los suelos. Es por ello que este módulo es posiblemente el que presenta mayores problemas de sales.

En modelos estadísticos desarrollados entre 2012 y 2014, se ha encontrado que en el ensalitramiento de los suelos del módulo 05, participan la temperatura, los niveles freáticos elevados, la salinidad del agua freática, la precipitación pluvial, la evapotranspiración y la salinidad del agua de riego. Específicamente, se ha observado que la variable concerniente a presencia de niveles freáticos superficiales contribuye en

gran medida con el ensalitramiento del suelo. El conocimiento de cómo afecta esta variable el ensalitramiento es fundamental ya que existen técnicas ingenieriles y agronómicas para abatir los niveles freáticos, y con su implementación es posible aumentar el potencial productivo de los suelos.

El origen de niveles freáticos superficiales tiene que ver con las aplicaciones de agua de riego en el módulo 05 y aguas arriba de éste; con la topografía y la textura arcillosa de los suelos. Asimismo, también se debe a las aportaciones de agua que se originan de filtraciones de agua en los canales de riego.

Con el propósito de aportar soluciones a los problemas de ensalitramiento de los suelos causados por mantos freáticos superficiales y por el incremento en la temperatura causada por el calentamiento global, en el año 2014 se seleccionó una parcela piloto de 4.3 ha que dispone de drenaje parcelario subsuperficial y de un cárcamo de bombeo, ubicada en el ejido Moroncarit del municipio de Huatabampo. En las condiciones iniciales, se observa que el sistema de drenaje no está operando adecuadamente debido a que el agua de riego. Para realizar la extracción de agua del cárcamo y así inducir el descenso drenada en el cárcamo no está siendo evacuada hacia la red de drenaje a cielo abierto del distrito del nivel freático, con lo que se rehabilitarían los suelos y se incrementaría el potencial productivo de la parcela piloto, se requiere del bombeo mismo que se decidió realizarlo con energía eólica. Por su cercanía con el mar que tiene el área de estudio, corren vientos de diferente intensidad a lo largo del año; capaces de generar energía para bombear el agua, por lo cual en julio de 2014 se instaló un molino de viento que incluye una torre de 10 m de altura, una hélice de 18 aspas de 3 m de diámetro y un pistón de 5", y se le dotó de un desagüe de PVC para llevar el agua desde el cárcamo hasta un dren a cielo abierto ubicado a 900 m al occidente de la parcela piloto.

Según las predicciones existentes para el año 2050 se espera una reducción de disponibilidad de agua para riego en 30% aproximadamente, debido a la reducción de la precipitación y al crecimiento de la evapotranspiración en las cuencas hidrográficas. El análisis de los datos de monitoreo en la cuenca del Mar de Aral del Asia Central señala que una reducción de la disponibilidad de agua en un 22% en el transcurso de 30 años y la falta de la construcción del drenaje parcelario, originó que el área afectada por salinidad creciera dos veces: de 25 a 50% del área bajo riego. Estos datos se pueden considerar como un indicador de lo que puede suceder en muchas regiones bajo riego de México en el Siglo XXI, con relación a los problemas de salinidad y drenaje (Nikolskii *et al.*, 2011).

En el océano Atlántico norte, entre México y Estados Unidos, han aumentado los huracanes de mayor intensidad desde hace 40 años, por lo que se espera que cada vez haya más fenómenos de este tipo, reportan los más recientes estudios internacionales sobre cambio climático. En el volumen 1 del más reciente informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), divulgado hace unos días, se prevé

que a finales de siglo estos fenómenos incrementen su presencia, afecten ciudades costeras (La Jornada, 2013).

Este informe aporta mayores datos, pues cuenta con más elementos técnicos y apunta que hay 95 por ciento de certeza de que las causas del calentamiento de la atmósfera se deben a las emisiones de gases de efecto invernadero y al cambio de uso de suelo.

Se estima que la parte superficial del mar ha crecido 20 centímetros en cien años, pero lo que va a pasar a finales de siglo es que sea una elevación de 26 a 82 centímetros más, según el modelo, si el mar se incrementa medio metro desaparecerán ciudades costeras. No hay vuelta de hoja. Quizá desaparezcan las playas de Acapulco y Cancún, y habrá inundaciones más frecuentes en ciudades como Villahermosa. El impacto para México es que playas y ciudades desaparecerán (La Jornada, 2013).

Los pasados 30 años ha sido el periodo más caliente en mil 400 años y la temperatura se ha elevado 0.85 grados.

En un estudio llevado a cabo en 2012 y 2013 sobre el impacto del cambio climático en los problemas de salinidad y drenaje en el Distrito de Riego 038 se concluyó que se identificaron los parámetros que están relacionados con la salinidad del suelo, como son la temperatura ambiental, profundidad de los niveles freáticos, evapotranspiración, precipitación pluvial y salinidad del agua freática. Asimismo, se observó un efecto del clima en el contenido de sales tanto en el estrato superficial como en el estrato subsuperficial; por cuanto el aumento de la temperatura ambiental y la disminución de la humedad en el suelo incidieron en el ensaltramiento de los suelos (Pulido *et al.*, 2012; 2013).

El presente informe es continuación del estudio iniciado en 2012 sobre el impacto del cambio climático en los problemas de salinidad y drenaje en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, y presenta los resultados y conclusiones de las investigaciones llevadas a cabo durante el año 2014.

OBJETIVO

Evaluar agrohidráulicamente un sistema de drenaje agrícola accionado con energía eólica localizado en la parte baja de un distrito de riego del noroeste de México.

METODOLOGÍA

Localización del proyecto

El presente estudio se realizó durante el año 2012 en el DR 038 Río Mayo, Son. Éste 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 (ilustración 1); 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 extraída de pozos de bombeo. Su clima es estepario semiárido, la precipitación media anual es de 388 mm, la temperatura media anual es de 21.4° C, y la evaporación media anual es de 2,222 mm (Reyes, 1994).

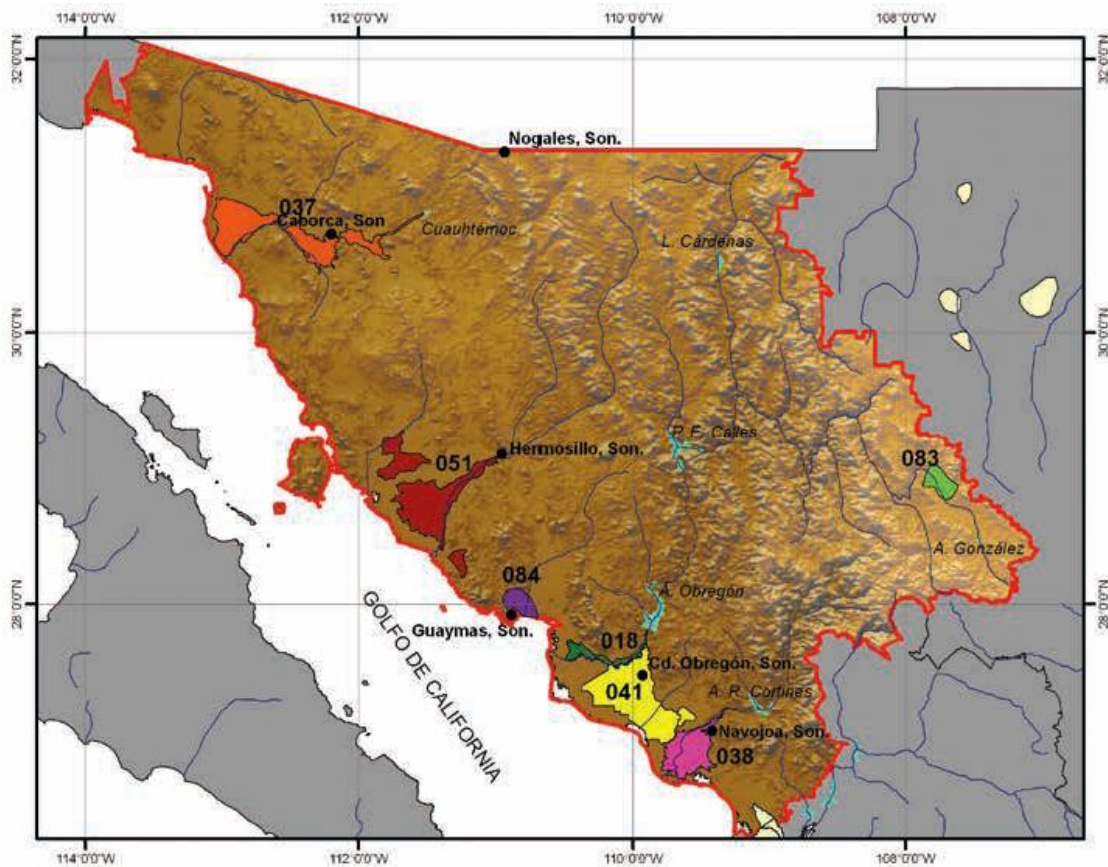


Ilustración 1. Localización del distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora

El área de estudio se encuentra en el ejido Moroncarit, municipio de Huatabampo, Sonora. Pertenece al Módulo de Riego No. 6, y es propiedad del agricultor cooperante Víctor Manuel Mendivil. Sus coordenadas geográficas son: $24^{\circ}44'53.33''$ norte y $109^{\circ}37'11.61$ oeste; su altitud aproximada es de 2 msnm (ilustración 2).

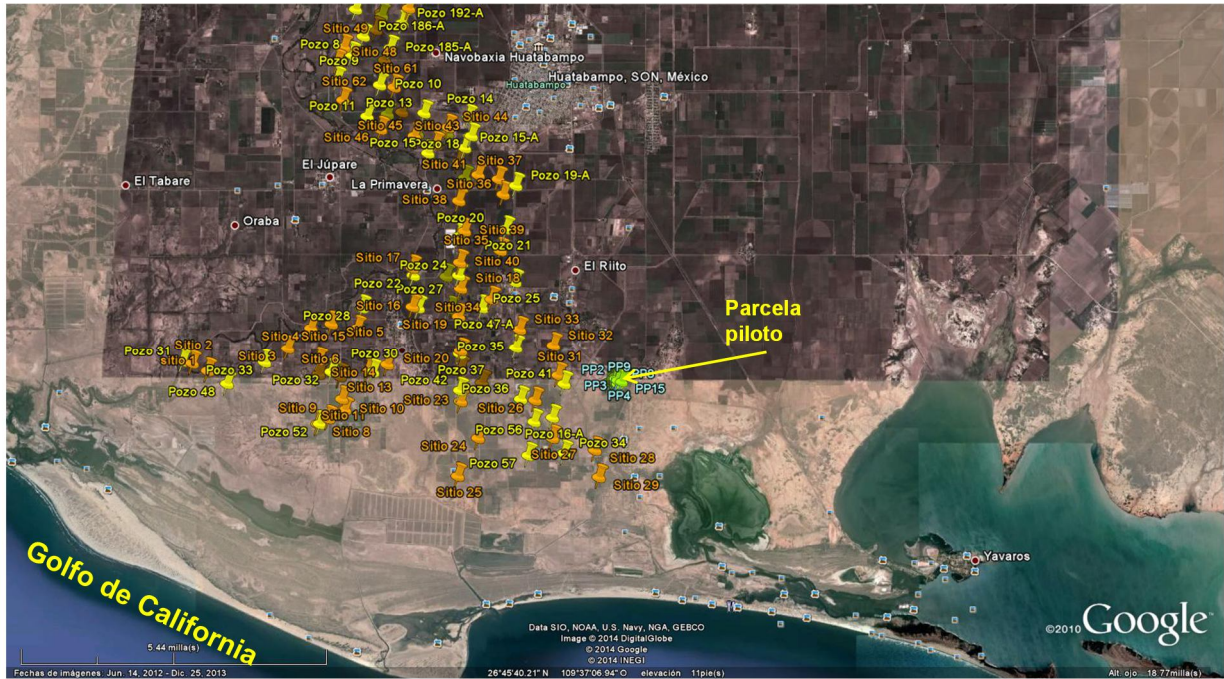


Ilustración 2. Localización de la parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Muestreo de suelos y monitorización de la salinidad del suelo

El muestreo de suelos y la monitorización mensual de la salinidad se llevó a cabo en una red de 61 sitios establecida en la parcela piloto (ilustración 3). La ubicación geográfica de los sitios de monitorización, con marcadores en amarillo, se obtuvo mediante un receptor GPS.

Se realizó un muestreo de suelo en la época de riego durante en el ciclo de cultivo otoño-invierno, a principios de mayo (ilustración 4). Las muestras se tomaron con una barrena agrológica, con la cual se colectaron muestras a 30 y 60 cm de profundidad, haciendo un total de 70 muestras. Éstas fueron enviadas para su análisis al laboratorio de suelos de la empresa Agroinsumos de Huatabampo, en la Ciudad de Huatabampo, Sonora. 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 referida, mensualmente se monitorizó la salinidad o conductividad eléctrica (CE) a las profundidades de 0-60 y 0-150 cm, para lo cual se utilizó un sensor electromagnético EM-38 de Geonics Limited (ilustración 5). Se utilizó un receptor GPS para obtener las coordenadas geográficas de cada sitio de medición, y así poder ubicarlos geográficamente en un sistema de información geográfica (SIG) que se elaboró; y de este modo se generaron mapas de grados de salinidad mensuales georeferenciados tanto del Módulo de Riego No. 05 como de la parcela piloto.



Ilustración 3 Distribución de sitios para la monitorización de la salinidad del suelo, y de pozos para medir el nivel freático, en una parcela piloto de drenaje con energía eólica y su área de influencia.



Ilustración 4. Muestreo de suelos el 01 de mayo de 2014 en la parcela piloto



Ilustración 5. Estimación de la salinidad con un sensor electromagnético EM-38 en la parcela piloto

Monitorización de niveles freáticos

En una red de 12 pozos de observación del manto freático superficial distribuida en la parcela piloto y su área de influencia, incluido el cárcamo de bombeo, se llevaron a cabo mediciones de la profundidad al nivel freático (ilustraciones 3 y 6); con estos datos se elaboraron mapas de isobatas mediante el SIG referido en el párrafo anterior. Posteriormente se amplió a 18 pozos la red de monitorización del nivel freático (ilustración 7).

Volumen de agua bombeado

Desde que el molino empezó a bombear en noviembre de 2014, se han estado haciendo aforos cada tercer día aproximadamente, entre las 13-17 horas, en la descarga de la línea de conducción; para aforar se utiliza un recipiente de volumen conocido y un cronómetro (ilustración 76). El periodo de aforos concluyó en mayo de 2015, a la par de finalización del ciclo de cultivo otoño-invierno 2014-2015.



Ilustración 6. Monitoreo mensual del nivel freático en el cárcamo de bombeo.



Ilustración 7. Instalación de pozos de observación para la monitorización del nivel freático.



Ilustración 8. Aforo del gasto bombeado por el molino de viento.

Estimación del impacto de la salinidad en el rendimiento

Para evaluar el impacto del bombeo del drenaje en el rendimiento se sembró trigo en diciembre de 2014 (ilustración 9); la cosecha se realizó en mayo de 2015.



Ilustración 9. Trigo en etapa vegetativa en la parcela piloto.

Se tomaron muestras de 1 m² de espigas de trigo en la parcela piloto y en parcelas del área de influencia del bombeo que se sembraron de trigo; las espigas se trillaron y cada

muestra se pesó en una balanza granataria. En los mismos sitios donde se tomaron las muestras de espigas, se tomaron muestras de suelo para analizar la salinidad en laboratorio y así estimar el impacto de la salinidad en la disminución de cosechas, mediante un análisis de regresión lineal (ilustración 10).



Ilustración 10. Muestreo de trigo para evaluar su rendimiento.

Registro de datos meteorológicos

Las condiciones de temperatura, precipitación pluvial y evaporación diarios registrados en el área del Módulo de Riego No. 05 durante 2014, se obtuvieron en la estación climatológica ubicada en la Ciudad de Huatabampo, Son., localizada según coordenadas geográficas 26.8167° de latitud norte y 109.6° de longitud oeste de Greenwich, y a 8 msnm (ilustración 11).



Ilustración 11. Estación meteorológica utilizada para el registro y análisis de condiciones del clima en el área de estudio.

RESULTADOS

Salinidad analizada

Los resultados de pH y salinidad, y el cálculo del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se presentan en el cuadro 1. El nivel del pH varió de 7.3, que lo clasifican como neutro hasta 8.5 que corresponde a un rango de fuertemente alcalino (Vázquez, 1999). En los 13 sitios de muestreo se determinó que los suelos son salinos (10 sitios) y salino sódicos (3 sitios); la salinidad en el estrato a 30 cm varió de 4.2-11.6 dS/m, mientras que en el estrato a 60 cm varió de 7.0 a 25.2 dS/m. En promedio en el estrato superficial la salinidad media fue de 6.6 dS/m y en el estrato subsuperficial fue de 11.8 dS/m (ilustración 12). Los valores de salinidad medidos son limitativos para la obtención de altos rendimientos de trigo, principal cultivo en la región, ya que su salinidad umbral es de 6.0 dS/m. Con el mayor valor de salinidad medido en el estrato superficial, de 11.6 dS/m, se podría esperar una disminución del 50% de la producción de trigo (Ayers y Westcot, 1987). Es por esto que los suelos de la parcela piloto presentan un nivel de salinidad restrictivo, que obliga a realizar acciones de rehabilitación de suelos, para que el nivel de salinidad sea inferior a 4 dS/m con lo que sería un suelo normal.

Cuadro 1. Resultados del análisis químico de muestras de suelo obtenidas en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Sitio	Prof. (cm)	pH (extracto pasta)	C. E. (dS/m)	R.A.S.	P.S.I	Clasificación por sales	
PP11	0-30	8.2	4.2	2.7	2.7	N	
	30-60	8.2	12.8	4.6	5.6	S	S
PP10	0-30	8.3	5.4	2.2	2.0	S	
	30-60	8.2	7	6.6	8.6	S	S
PP9	0-30	8.2	7.4	3.0	3.2	S	
	30-60	8.5	10.4	11.9	16.5	SS	SS
PP8	0-30	8.4	11.6	8.9	12.0	S	
	30-60	8.4	16.4	15.1	21.2	SS	SS
PP7	0-30	8.2	5	2.2	2.0	S	
	30-60	8.1	9.4	7.2	9.5	S	S
30	0-30	7.9	5	2.3	2.1	S	
	30-60	8	12.4	7.5	9.9	S	S
PP6	0-30	8	5	2.4	2.4	S	
	30-60	7.9	8	3.7	4.2	S	S
PP5	0-30	8.1	6	6.1	7.9	S	
	30-60	8	7.9	5.1	6.4	S	S
PP4	0-30	8.1	8.1	6.5	8.3	S	
	30-60	8.3	11.2	11.2	15.4	SS	SS
PP3	0-30	7.9	6.6	2.3	2.1	S	
	30-60	8.1	10.2	6.3	8.2	S	S
PP2	0-30	7.8	5.9	2.6	2.7	S	
	30-60	7.9	11.6	6.5	8.4	S	S
PP1	0-30	7.3	6.2	2.0	1.7	S	
	30-60	7.6	11	3.0	3.2	S	S
PP14	0-30	8	9.4	5.8	7.3	S	
	30-60	8.1	25.2	5.9	7.6	S	S

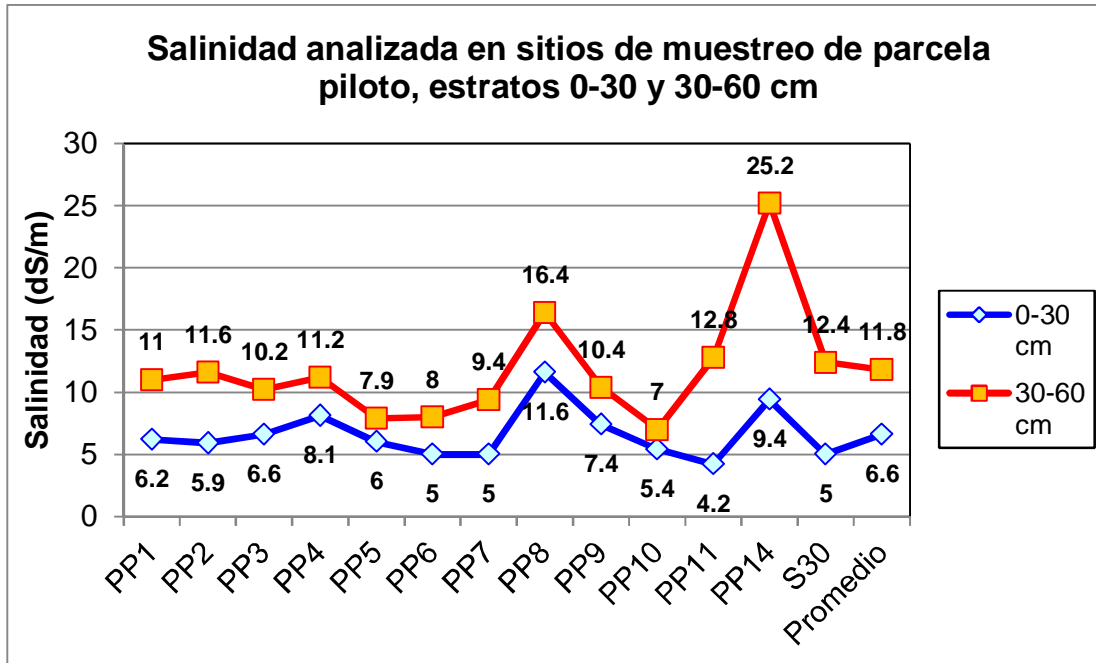


Ilustración 12. Variación espacial de la salinidad del suelo en los estratos a 30 y 60 cm de profundidad.

En los suelos salino sódicos analizados el valor de salinidad es superior a 4 dS/m y el PSI es mayor que 15%. Esta clase de suelos es el resultado de la combinación de los procesos de salinización y acumulación de sodio. Su apariencia general es similar a la de los suelos salinos, especialmente cuando su contenido de sales solubles es muy alto pueden encontrarse también manchas oscuras en los suelos. En la mayor parte de estos suelos cuando son lixiviados los excesos de sales, el valor del pH puede cambiar así como las propiedades; y en gran parte de las veces originan suelos sódicos, dado que parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxido de sodio, que a su vez se convierte en carbonato de sodio. Este compuesto propicia la defloculación de la arcilla, que le da una condición física desfavorable (De la Peña, 1982).

Según los análisis de suelo, en el estrato a 30 el valor medio del PSI fue de 3.6 y en el estrato a 60 cm resultó de 9.6 (ilustración 13). En el primer estrato en dos sitios se observó que el PSI es superior a 7. En el estrato a 60 cm en tres sitios se obtuvo un PSI inferior a 5, y en los sitios 4, 8 y 9 el PSI resultó mayor que 15. Los sitios con valores de salinidad y PSI más altos se localizan en la mitad oriente de la parcela piloto, y corresponden a los números 4, 8, 9 y 14 (ilustración 5). En la parcela piloto el contenido de arcilla es superior al 50% por lo que, de acuerdo con De la Peña (1982) es aconsejable que el valor del PSI esté por debajo de 5, para tener una mayor seguridad en la rehabilitación del suelo.

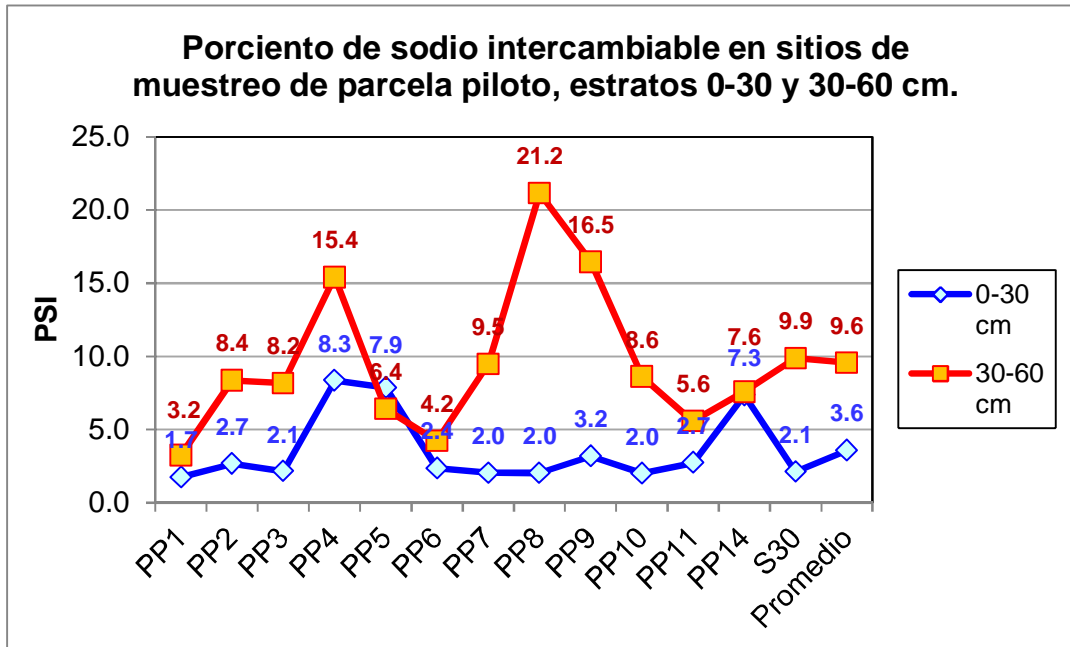


Ilustración 13. Porcentaje de sodio intercambiable en sitios de muestreo en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

En suelos normales el pH muestra valores entre 6.5 y 7.5, en suelos salinos su valor varía entre 7.0 y 8.5; en suelos clasificados como salino-sódicos el pH normalmente es menor que 8.2 y en suelos sódicos el pH oscila entre 8.2 a 10.0. Valores arriba de 7.0 a 7.5 indican la presencia de iones alcalinos pero dominan el calcio y magnesio al sodio. Un pH de 7.5 a 8.4 se presenta en suelos con abundancia de iones alcalinos calcio y magnesio y niveles bajos de sodio. Si el pH es >8.4, los niveles de sodio son altos y dominan los iones alcalinos. El pH constituye un índice de diagnóstico. Es por ello que valores de pH arriba de 8.4 son indicativos de probables estructuras y compactaciones que provocan problemas nutricionales por falta de aire y actividad microbiana (De la Peña, 1982).

Los valores que se observaron en la parcela piloto en el estrato a 30 cm fueron de 7.3 a 8.4; los más altos, superiores a 8.0 se obtuvieron en los sitios números 4, 5, 7, 8, 9, 10 y 11, localizados en la mitad oriental de la parcela piloto. En el estrato a 60 cm los valores más altos y superiores que 8.2 se observaron en los sitios 4, 8, 9 y 10. Entre los estratos de suelo analizados un pH mayor se determinó en el estrato a 60 cm (ilustración 14).

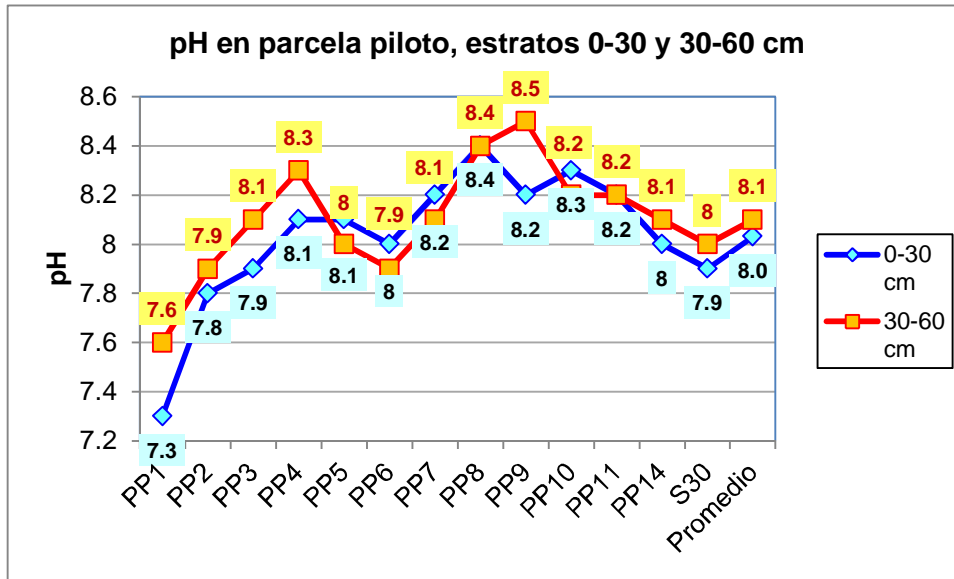


Ilustración 14. Variación del pH en estratos a 30 y 60 cm de profundidad en sitios de muestreo distribuidos en una parcela piloto.

La interacción entre el pH y el sodio intercambiable se observó en el estrato a 60 cm; con los contenidos de sodio y de pH se desarrolló una correlación de $r^2=0.64$, que muestra que un incremento del pH se relaciona con un aumento en la concentración de sodio (ilustración 15). Este análisis es importante por cuanto conviene verificar el cambio de ambos parámetros mediante análisis de suelo, para evitar la sodificación de los suelos de la parcela piloto.

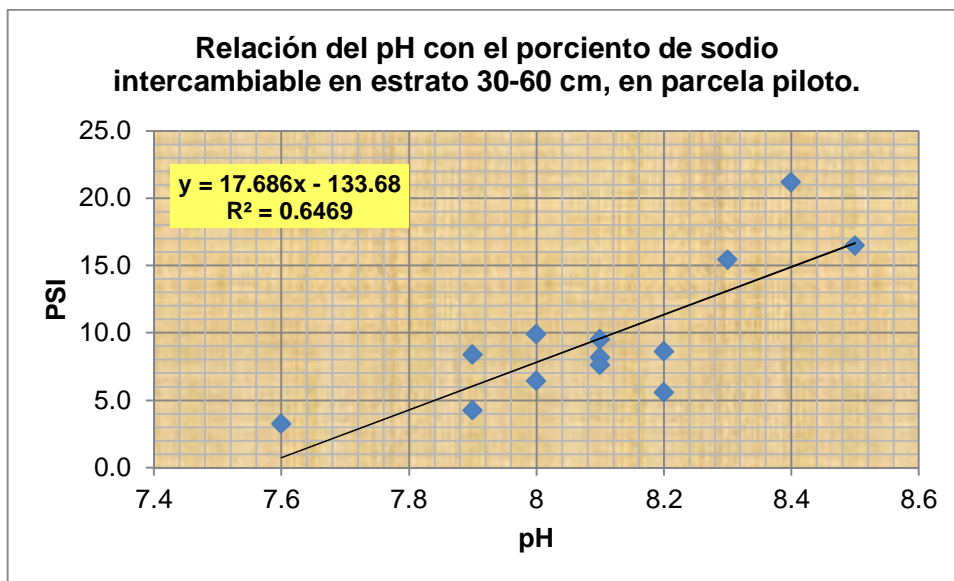


Ilustración 15. Relación del pH con el porcentaje de sodio intercambiable en el estrato a 60 cm en la parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Los cationes calcio, magnesio, sodio y potasio así como los aniones carbonato, bicarbonato, sulfato y cloruro son los mismos que las plantas toman como nutrientes, pero que a determinados niveles de concentración causan trastornos fisiológicos a las plantas y/o estructurales al suelo. Es deseable que el calcio y magnesio sean los cationes dominantes tanto en la solución del suelo como adsorbidos en el complejo de intercambio, ya que influyen en las buenas o malas condiciones estructurales. Cuando domina el sodio y en cierta proporción el potasio su preponderancia casi siempre modifica la estructura del suelo, creando un comportamiento adverso por impedir la disponibilidad de nutrientes. Es de gran importancia definir la relación que guardan entre sí los cationes calcio más magnesio con el catión sodio, por las características que derivan al suelo con ello. Se ha observado que cuando la relación calcio más magnesio sobre sodio es mayor que uno o la relación sodio sobre calcio más magnesio es menor que 3, los suelos presentan permeabilidad y no requerirán mejoradores (De la Peña, 1982).

Como se ha señalado en los parámetros descritos en párrafos anteriores, la relación calcio más magnesio obtenida en el estrato a 60 cm fue superior que la encontrada en el estrato a 30 cm. En promedio en el estrato a 30 cm el contenido fue de 45 meq/l y en el de 60 cm, de 73 meq/l (ilustración 16). La concentración de sodio media en los sitios de muestreo fue de 18 y 42 meq/l en los estratos superficial y subsuperficial, respectivamente (ilustración 17). De acuerdo con de la Peña (1982), si la relación del $(Ca+Mg)/Na > 1$, entonces el suelo de la parcela piloto no requerirá de mejorador. Con los datos obtenidos en la parcela en el estrato a 30 cm el resultado de dividir $45/18 = 2.5$; mientras que en el estrato a 60 cm el resultado de dividir $73/42 = 1.73$. Ambos valores son mayores que uno, por lo que, según De la Peña (1982), no se requiere aplicar mejorador.

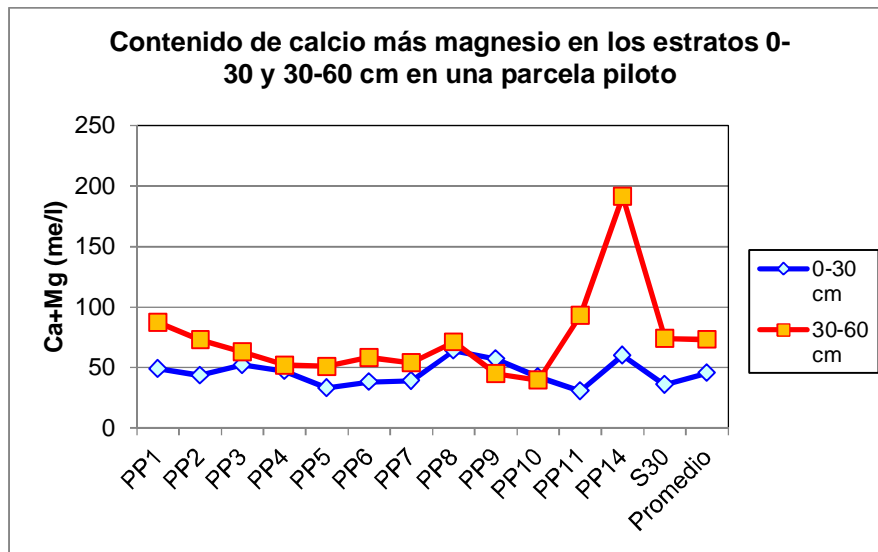


Ilustración 16. Variación del contenido de calcio más magnesio en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

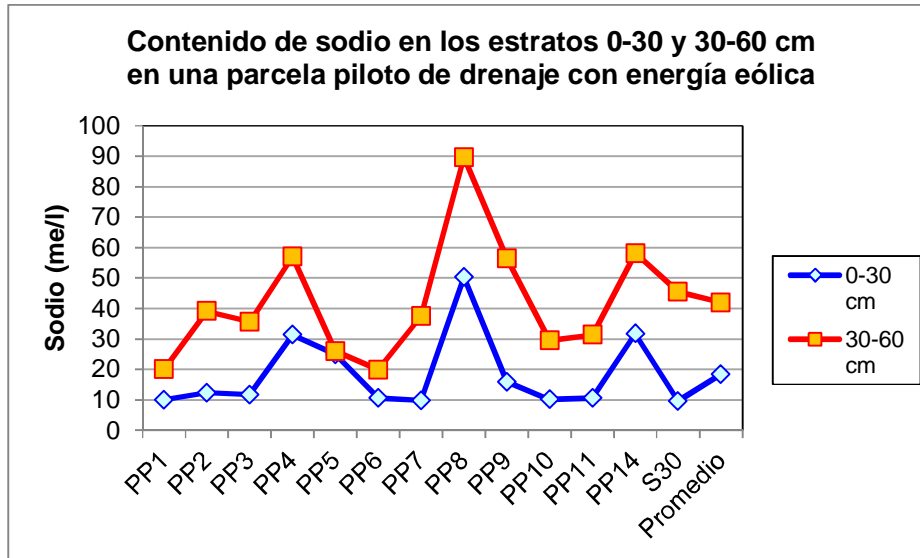


Ilustración 17. Variación del contenido de sodio en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Variación espacial y temporal de la salinidad del suelo

La monitorización mensual de la salinidad utilizando un sensor electromagnético, en los estratos 0-60 y 0-150 cm de profundidad, entre marzo de 2014 y agosto de 2015, exhibe una marcada diferencia en los valores entre ambos estratos. Los niveles más altos que se estimaron en el estrato subsuperficial, que en promedio resultan de 25 dS/m, contrastan con el valor medio de 8 dS/m estimado para el estrato superficial (ilustración 18).

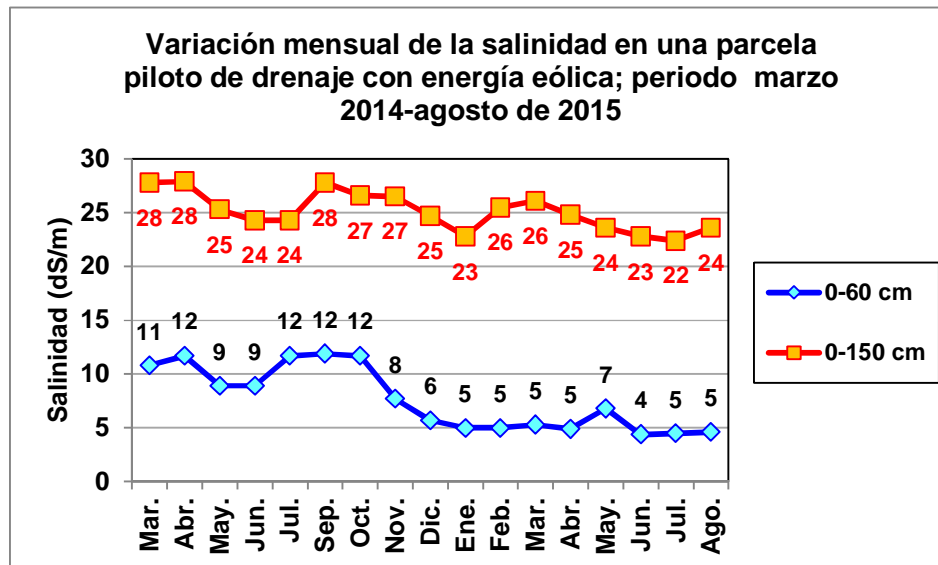


Ilustración 18. Variación de la salinidad durante 2014 y 2015 en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Antes del inicio del bombeo con el molino de viento en el periodo marzo-octubre de 2014, en el estrato superficial se encontró que los valores medios de salinidad que se determinaron en la red de 16 sitios que cubren la parcela piloto en el lapso marzo-octubre de 2014, tuvieron un valor medio de 11 dS/m, que corresponden a un suelo de tercera clase por su nivel de sales (De la Peña, 1982). Pero a partir de noviembre del mismo año, coincidente con el inicio de operaciones del molino eólico, los valores de salinidad disminuyeron; es así que entre noviembre de 2014 y agosto de 2015 el valor medio estimado fue de 5 dS/m, que corresponde al de un suelo de segunda clase; la reducción del nivel de salinidad es equivalente al 55%. Estos resultados muestran que en la parcela piloto en su estrato superficial el nivel de salinidad está disminuyendo por efecto del bombeo de agua freática cargada en sales, que está llevando a cabo el molino de viento.

En el mismo estrato superficial se observó que los valores de salinidad más altos se estimaron en los meses de abril, cuando las temperaturas ambientales son bajas y cuando el invierno ha finalizado, y cuando los niveles freáticos están más superficiales; y de julio-octubre de 2014, coincidiendo con las temperaturas anuales más altas. Asimismo, durante el año 2015 el nivel de salinidad más alto se encontró en mayo, cuando la temperatura ambiente empieza a adquirir mayor magnitud, y cuando ya ha finalizado el ciclo de cultivo y finalizan los riegos.

En el estrato subsuperficial los niveles de salinidad superiores se observaron en dos épocas a lo largo del año: durante el invierno en febrero-abril y en verano-otoño en el lapso septiembre-noviembre. El efecto del bombeo en la reducción de salinidad en el estrato subsuperficial no es de igual impacto que en el estrato superficial; esto se debe probablemente a que el nivel freático aún permanece elevado.

En el periodo 2014-2015 se elaboraron mapas de clases de salinidad del suelo con una frecuencia mensual; la variación de la superficie ensalitrada, con una conductividad eléctrica >4 dS/m, fue distinta antes y después del inicio de operación del bombeo con el molino de viento, donde los suelos se clasificaron de segunda a cuarta clases. Antes del bombeo que inició en noviembre de 2014, en los meses de mayores aplicaciones de agua de riego (marzo-abril) se observaron más superficies afectadas, con una salinidad > 8 dS/m; también en los meses de más alta temperatura ambiente (septiembre-octubre) se cartografiaron mayores superficies con una salinidad >8 dS/m (ilustración 19).

Desde que inició el bombeo del agua de drenaje, los suelos mejoraron en su calidad agrícola considerando el estrato 0-60 cm de profundidad. Es así que los suelos de tercera y cuarta clases mejoraron a suelos de primera y segunda clases, por el abatimiento del nivel freático (ilustraciones 20-22). A partir de marzo de 2015 aumentó la red de sitios para la monitorización por lo que se observó que el área de influencia del bombeo es de aproximadamente 41 ha. Las áreas más afectadas localizadas al norte y poniente corresponden a parcelas ociosas; sin cultivo.

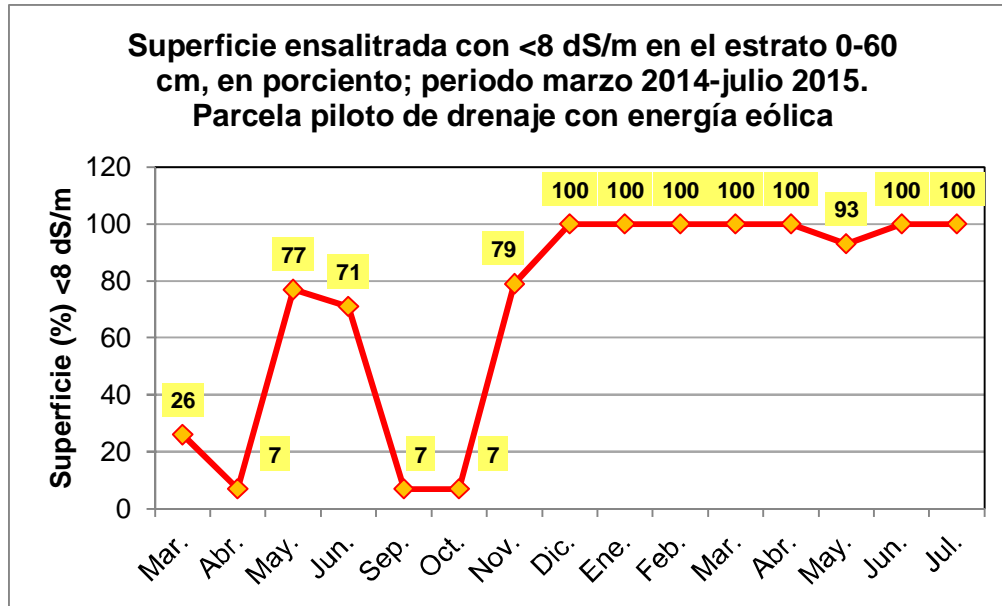


Ilustración 19. Variación de la superficie ensaltrada en el periodo 2014-2015 en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

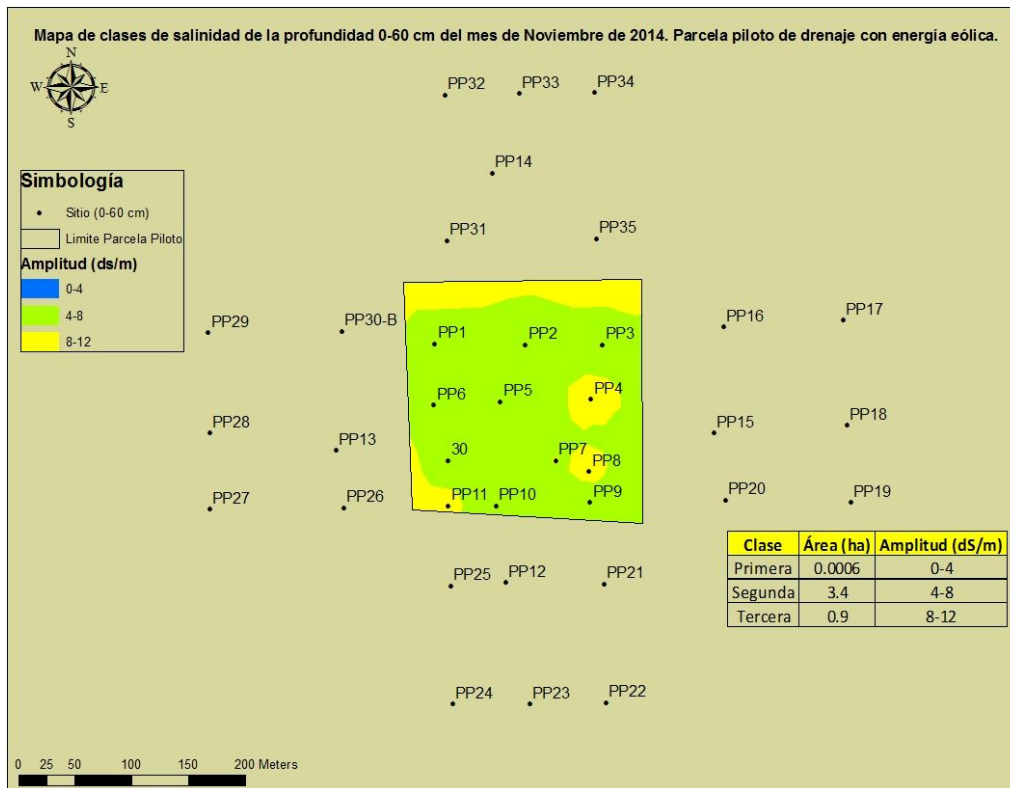


Ilustración 20. Mapa de salinidad del estrato a 60 cm en noviembre de 2014 en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

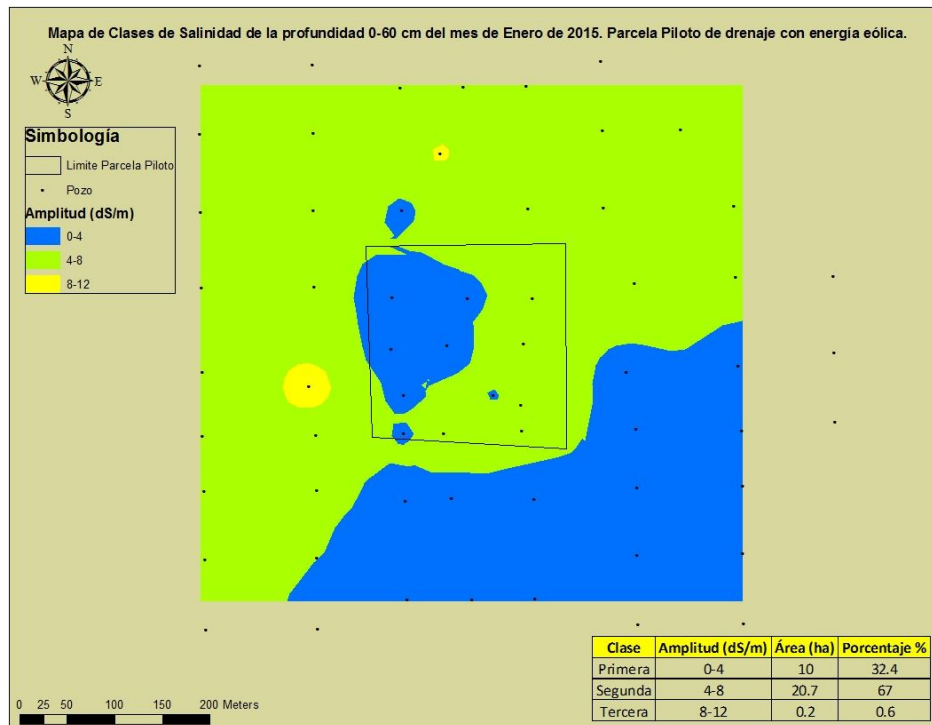


Ilustración 21. Mapa de salinidad del estrato a 60 cm en enero de 2015 en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

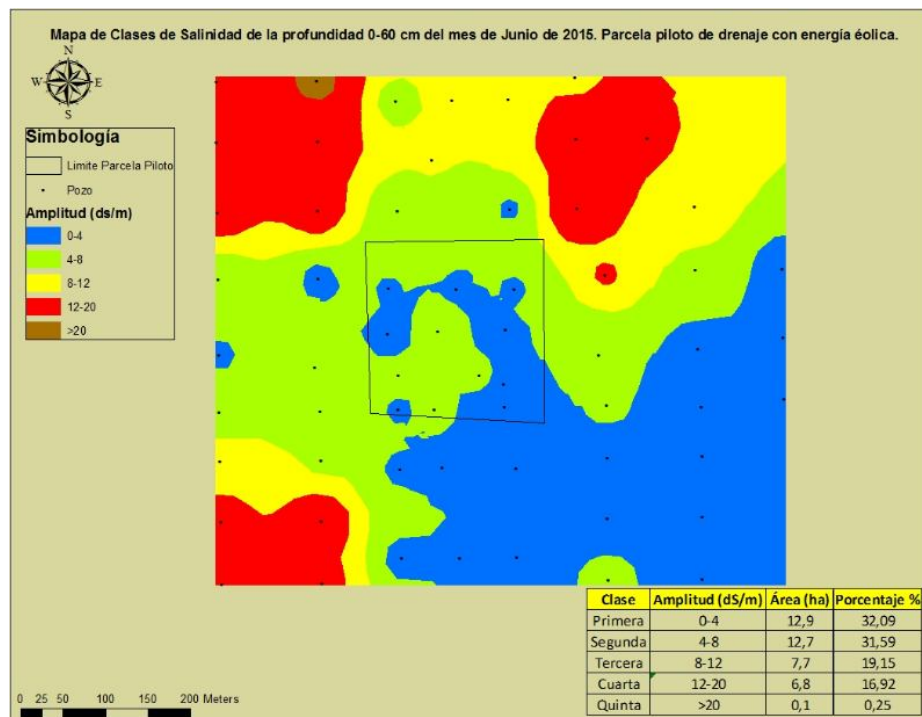


Ilustración 22. Mapa de salinidad del estrato a 60 cm en junio de 2015 en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Variación espacial y temporal del nivel freático

Con las lecturas de profundidad al nivel freático se elaboraron gráficas y mapas de isobatas que muestran las áreas más afectadas (ilustraciones 23-25). El bombeo está sirviendo para abatir el nivel freático y así mejorar la calidad agrícola de las parcelas, pero la capacidad del equipo de bombeo es insuficiente para abatir en mayor medida el manto freático; si éste se mantiene a una profundidad mayor que 1 m, es de esperarse una menor superficie ensaltrada (ilustración 26).

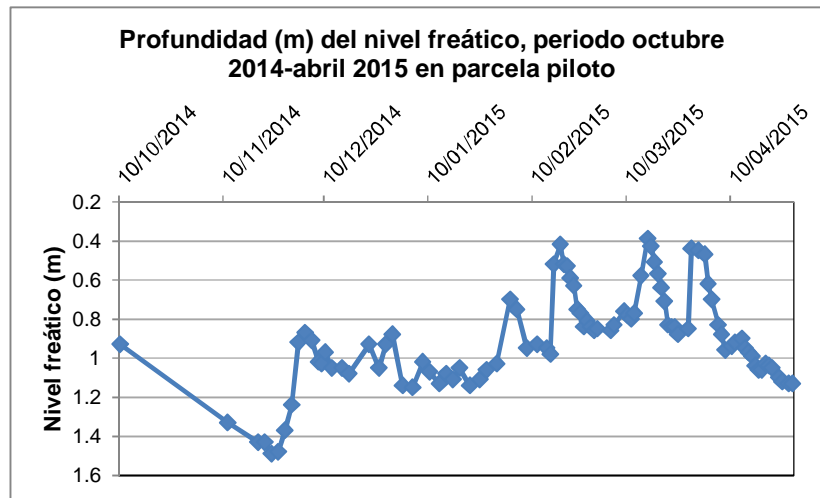


Ilustración 23. Variación de la profundidad al nivel freático en 2014 y 2015 en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

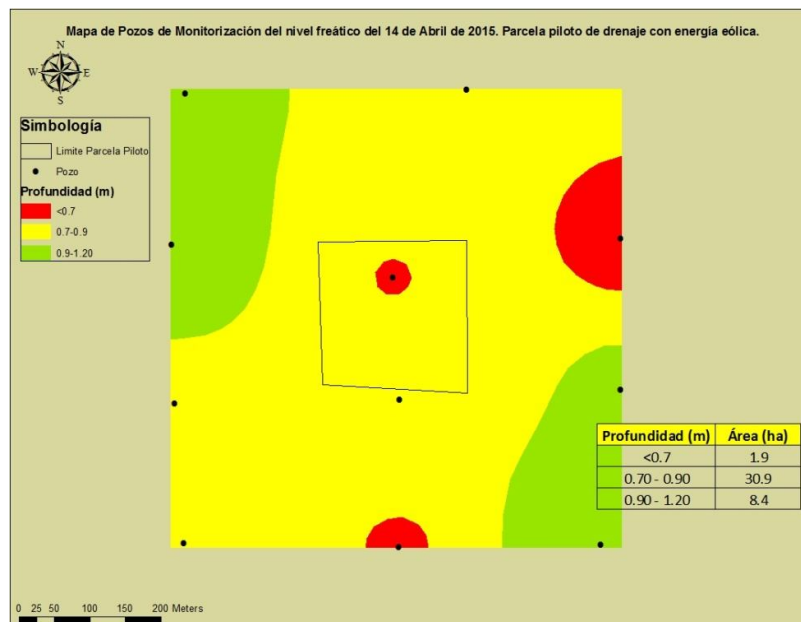


Ilustración 24. Mapa de isobatas de abril en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

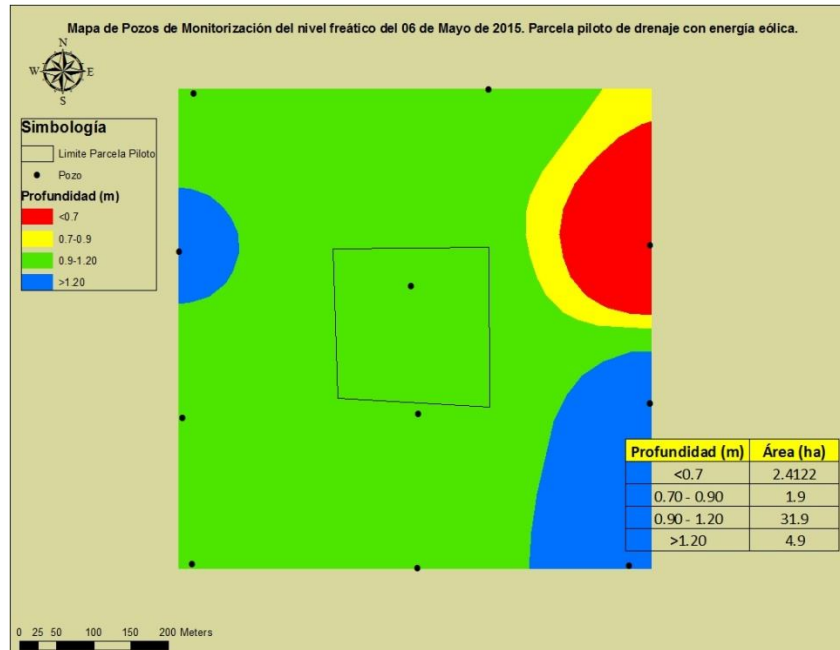


Ilustración 25. Mapa de isobatas de abril en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

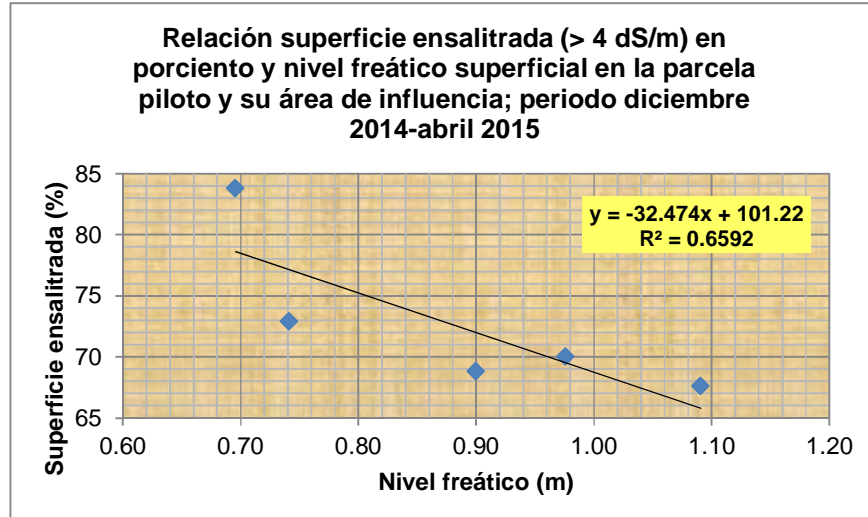


Ilustración 26. Efecto del nivel freático superficial en la superficie ensalitrada en una parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Correlación de la salinidad con la temperatura y evapotranspiración

El incremento de temperatura media mensual correlacionó positivamente con el aumento de salinidad en los estratos superficial (0-60 cm) y subsuperficial (0-150 cm) (ilustraciones 27-29). Las correlaciones obtenidas explican el ensalitramiento del suelo por efecto del incremento de temperatura, que a su vez influye en el ascenso capilar de

sales hacia la superficie del suelo por el mecanismo de la evapotranspiración. En el

 estrato 0-150 cm de profundidad la correlación se desarrolló en el periodo

 septiembre-noviembre, anterior a la operación del bombeo mediante el molino de

 viento. La correlación de la salinidad en el estrato 0-60 cm y la profundidad al

 nivel freático en el lapso marzo-mayo arrojó un coeficiente de determinación

 $r^2=0.86$ que explica la presencia de sales en niveles que son perjudiciales

 para el cultivo de trigo, tolerante a las sales (ilustración 30); en este periodo

 es cuando el nivel de salinidad es más alto y el nivel freático está más

 superficial. El nivel freático superficial es un factor que limita la producción

 de cultivos en la parcela piloto, y por lo tanto es necesario poner en práctica

 medidas como el bombeo con la finalidad de abatir su profundidad, a niveles

 que no perjudiquen el sistema radicular del principal cultivo de la región como

 es el trigo.

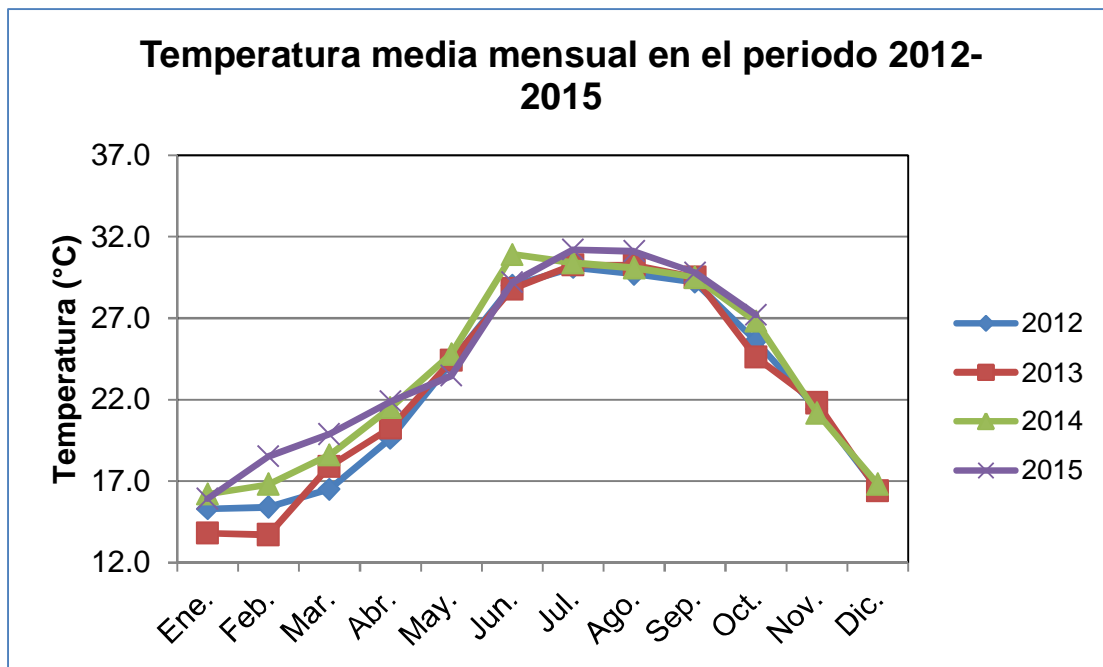


Ilustración 27. Variación media mensual de la temperatura ambiente en el área de la

 parcela piloto de drenaje con energía eólica, durante el periodo 2012-2015.

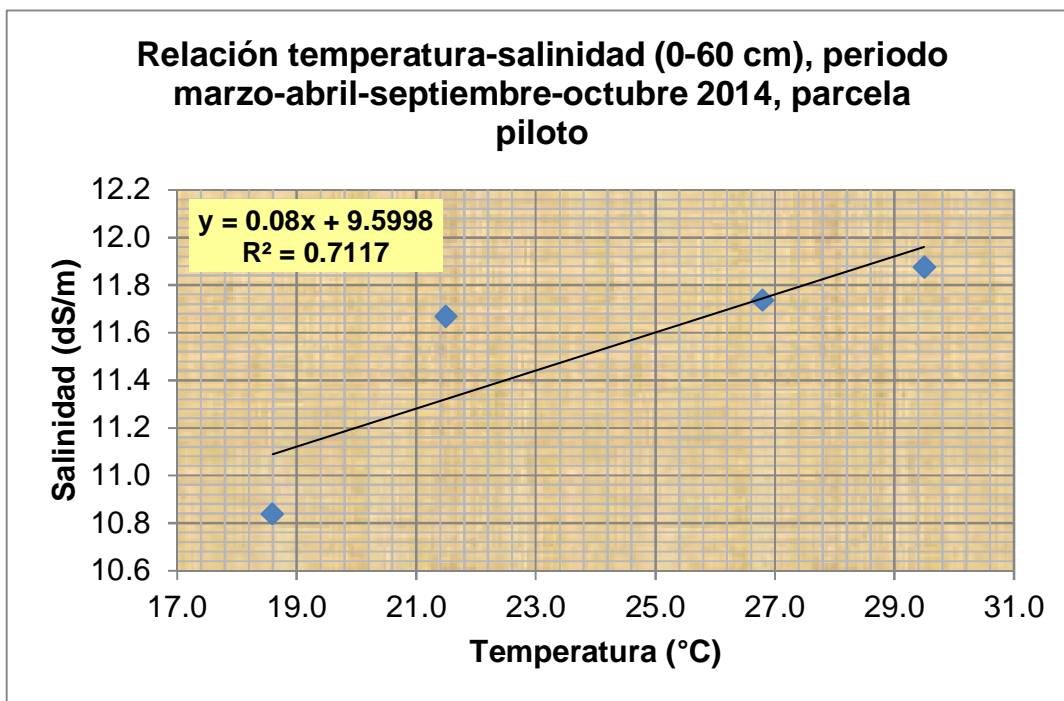


Ilustración 28. Correlación entre temperatura ambiente y salinidad del suelo estrato 0-60 cm en 2014 en la parcela piloto, antes de la puesta en operación del molino de viento.

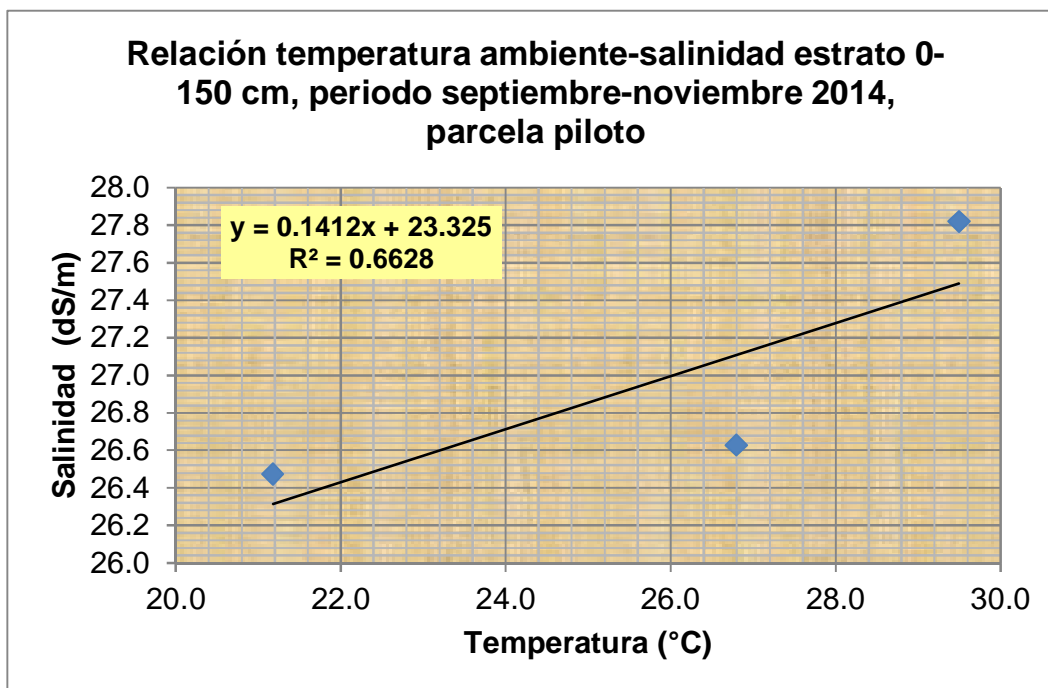


Ilustración 29. Correlación entre temperatura ambiente y salinidad del suelo estrato 0-150 cm en 2014 en la parcela piloto, antes de la puesta en operación del molino de viento.

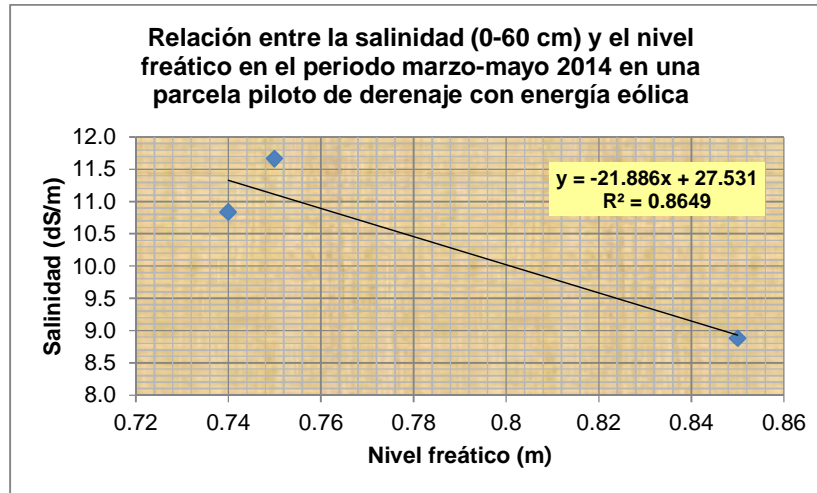


Ilustración 30. Correlación entre salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm y profundidad al nivel freático en 2014 en la parcela piloto, antes de la puesta en operación del molino de viento.

Con la instalación del molino de viento llevada a cabo en julio de 2014 y el inicio del bombeo, coincidente con el inicio del ciclo agrícola otoño-invierno 2014-2015, se registró una disminución del nivel de salinidad específicamente en el estrato a 60 cm. Un análisis de correlación de la temperatura ambiente con la salinidad en el estrato a 60 cm dio un coeficiente de determinación $r^2=0.68$ (ilustración 31), que demuestra la influencia del aumento de temperatura y evapotranspiración ($r^2=0.62$) en el incremento de salinidad del suelo (ilustración 32); es de observarse que los valores de salinidad obtenidos en campo son de magnitud inferior que los registrados en el periodo marzo-abril y septiembre-octubre de 2014 (ilustración 28). La diferencia coincide con el periodo del bombeo de agua freática llevada a cabo por el molino eólico.

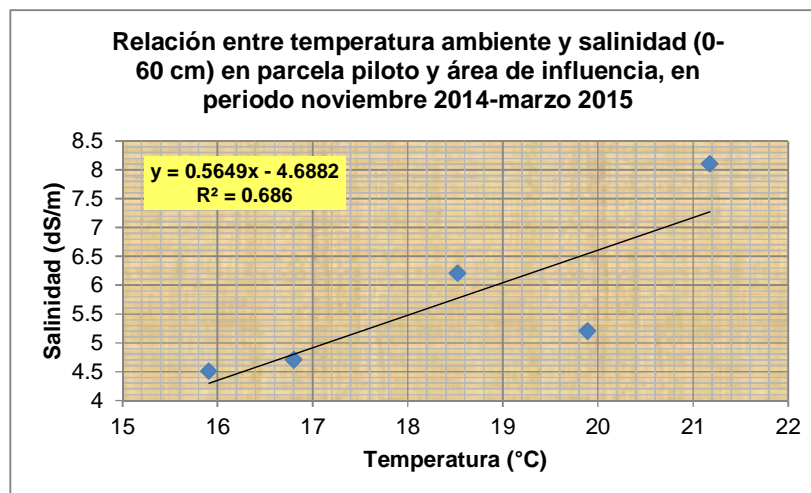


Ilustración 31. Correlación entre temperatura ambiente y salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm en 2015 en la parcela piloto, con la operación del molino de viento.

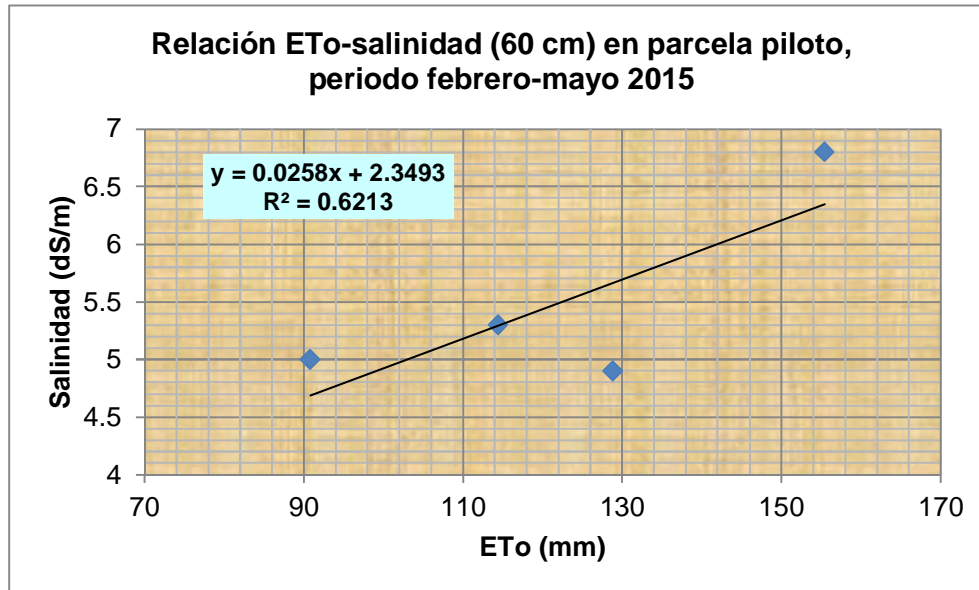


Ilustración 32. Correlación entre evapotranspiración y salinidad del suelo en 2015 en el estrato 0-60 cm en la parcela piloto, con la operación del molino de viento.

Correlación de la salinidad del suelo con la profundidad del nivel freático

La profundidad del nivel freático se midió mensualmente entre los meses de febrero 2014 y abril 2015. Antes de la entrada en operación del bombeo con el molino de viento el nivel freático en la época crítica, febrero y marzo, era de 0.70 m; y a través del bombeo el sistema de drenaje subsuperficial tuvo mayor libertad para descargar el drenaje en el cárcamo, por lo cual el nivel freático en los meses críticos de febrero y marzo de 2015 estuvo entre 0.4 y 0.6 m en sus menores profundidades (ilustraciones 33-35). La instalación de una red de 11 pozos de observación en la parcela piloto y su área de influencia permitió conocer que el área que está drenando no es nada más la parcela piloto de 4.3 ha, sino que también las parcelas circundantes a ésta y que carecen de drenaje subsuperficial, también están aportando agua en el cárcamo de bombeo. Es por esta circunstancia que la potencia del molino de viento es, presumiblemente, insuficiente para bajar el nivel freático más debajo de 1.0 m de profundidad.

El análisis de la salinidad de 0-60 cm y la profundidad al nivel freático dio como resultado el modelo estadístico con un coeficiente de determinación $r^2=0.60$ (ilustración 35), que significa que el nivel freático influye en el nivel de sales encontrado en el periodo diciembre 2014-marzo 2015; este periodo coincide con el ciclo de cultivo otoño-invierno, durante el cual se aplica agua de riego en prácticamente todo el Distrito de Riego 038 río Mayo, y cuando los problemas de salinidad y niveles freáticos superficiales son más agudos. La ilustración 35 muestra que un nivel freático superficial correlaciona con un valor más alto de salinidad; este nivel de salinidad y profundidad del manto freático perjudican al sistema radicular del trigo, que principalmente explora los primeros 30 cm de suelo. A diferencia de los niveles de salinidad mayores observados

en el año 2014, en 2015 se obtuvieron niveles más bajos que son el resultado de abatir el nivel freático a través del bombeo que lleva a cabo el molino de viento.



Ilustración 33. Medición del nivel freático en el cárcamo de bombeo de la parcela piloto de drenaje con energía eólica.

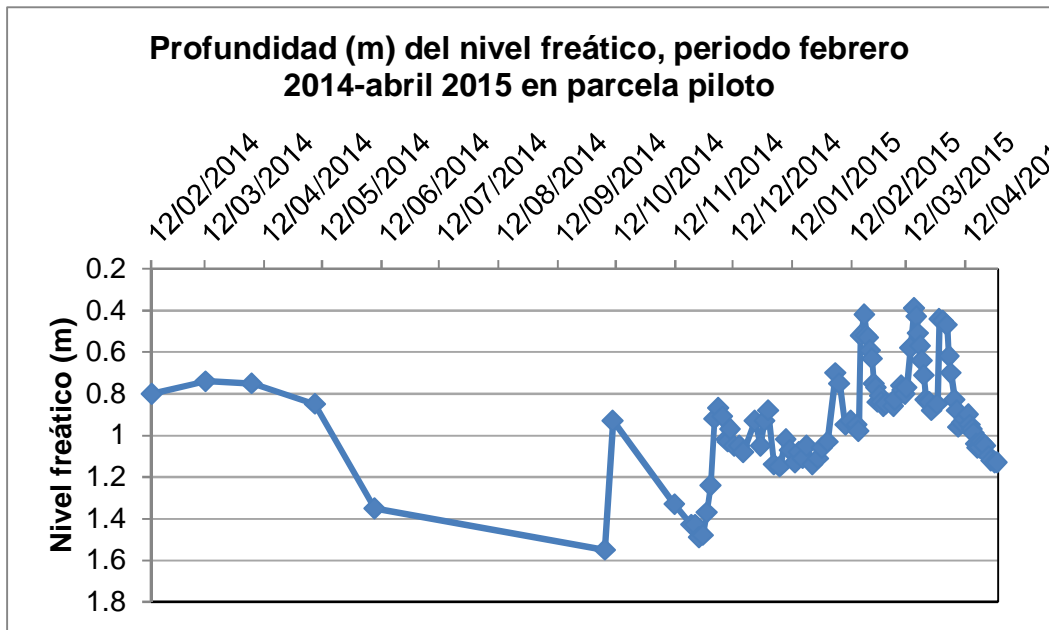


Ilustración 34. Variación de la profundidad del nivel freático durante 2014 y 2015.

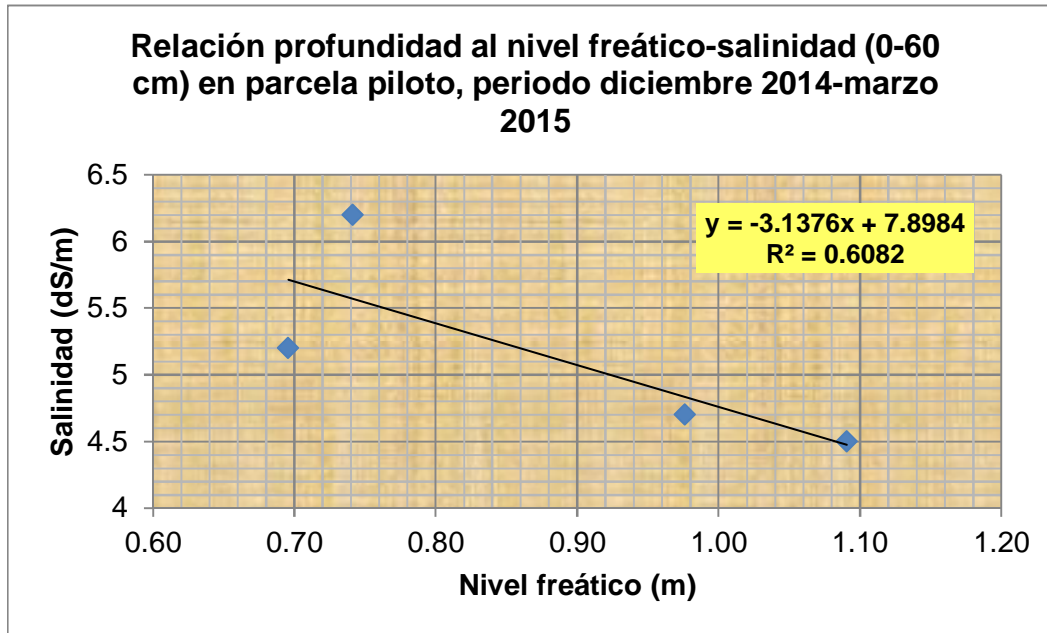


Ilustración 35. Correlación de la salinidad en el estrato 0-60 cm y la profundidad del nivel freático en la parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Impacto de la salinidad en el rendimiento de trigo

El rendimiento medio evaluado de trigo fue de 3.7 ton/ha, el cual se debió al efecto negativo de la salinidad, cuyo valor medio a lo largo del ciclo de desarrollo del trigo, fue de 5 dS/m en el estrato superficial; pero también el bajo rendimiento se debió a la falta de horas frío que se ha estado registrando en el distrito de riego a partir del año 2013, que causó mermas en su rendimiento. Otra causa del bajo rendimiento la constituye el nivel freático superficial, mismo que en el ciclo de siembra se registró más elevado que en el ciclo de cultivo 2013-2014. Las pérdidas estimadas fueron de 0.8 ton/ha, considerando el rendimiento oficial logrado de 4.5 ton/ha en la región sur del Distrito de Riego 038. El análisis realizado entre el rendimiento colectado en el muestreo de cosecha efectuado en la parcela piloto, y la salinidad del suelo, muestran la variación observada producto de la influencia de la salinidad; es así que los rendimientos variaron entre 8.0 ton/ha con una salinidad e 3 dS/m y de 0 ton/ha, con una salinidad de 13 dS/m (ilustración 36). La variación espacial del rendimiento de trigo se relaciona con la distribución espacial de la salinidad en la parcela piloto; es así que los rendimientos mayores se registraron en las áreas con menores afectaciones por sales (ilustración 37).

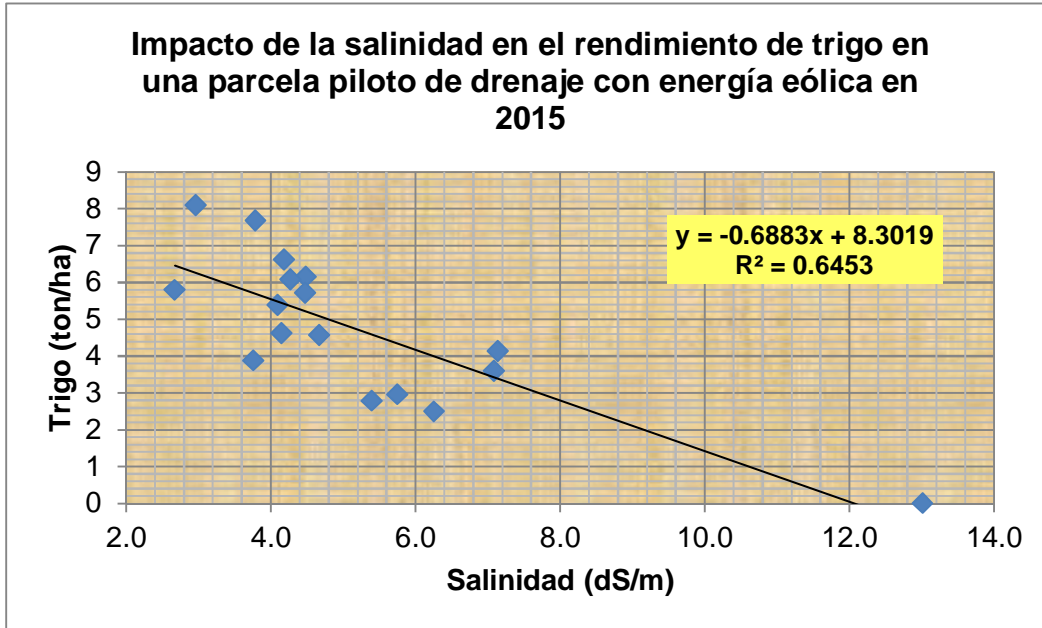


Ilustración 36. Correlación de la salinidad en el estrato 0-60 cm y el rendimiento de trigo en la parcela piloto de drenaje con energía eólica.

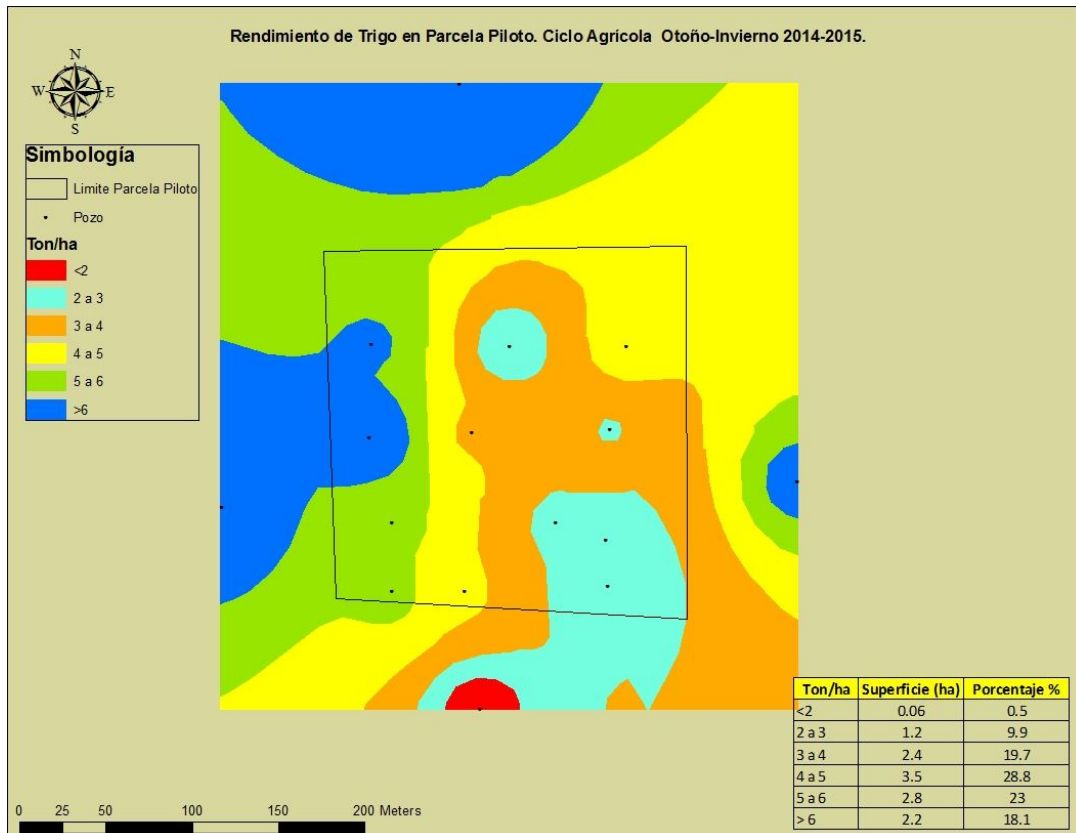


Ilustración 37. Mapa de rendimiento de trigo en la parcela piloto de drenaje con energía eólica.

Volumen de bombeo

El gasto del molino de viento depende de la velocidad y duración del viento. El modelo 12 que del molino que se instaló permite una extracción teórica de 4,900 l/h con velocidades del viento de 24 km/h, mismas que no se registraron en la estación meteorológica de Huatabampo. Desde que el molino empezó a bombear se han estado haciendo aforos aproximadamente cada tercer día, entre las 13-17 horas, en la descarga de la línea de conducción (ilustración 38). El gasto medio resultó de 0.62 l/s, que en un periodo de bombeo de seis horas diarias, que se ha venido observando, estaría bombeando un volumen diario de 11.88 m³ (ilustración 39). Se ha estado registrando que el molino bombea cada día entre las 13:00-19:00 horas; con variaciones, ya que a veces por las noches también extrae agua, y temprano por las mañanas.



Ilustración 38. Aforo del agua bombeada por el molino de viento

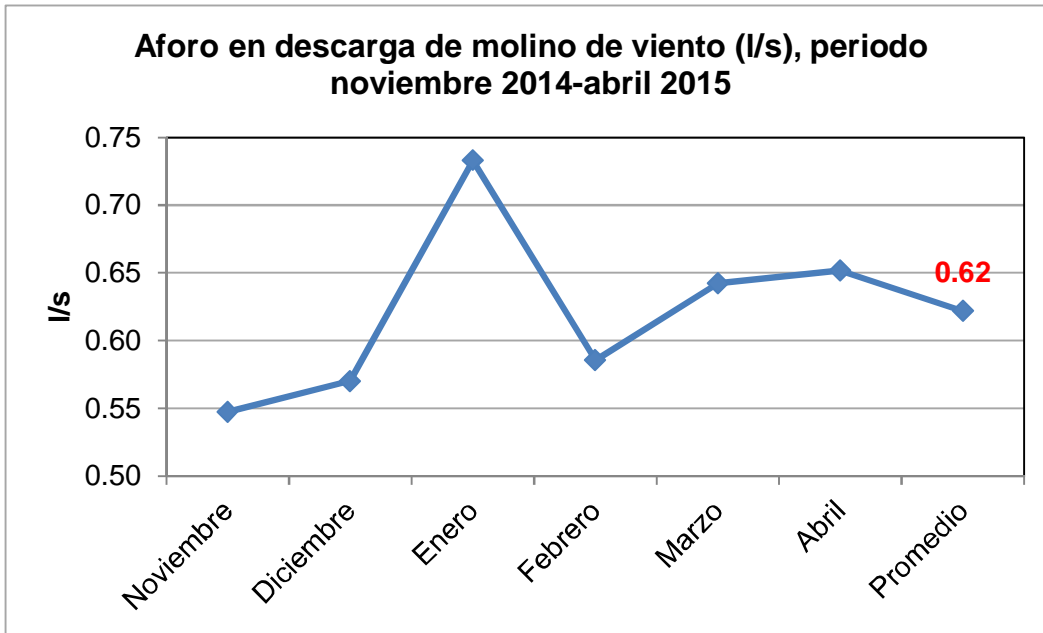


Ilustración 39. Gasto en desagüe de molino de viento

CONCLUSIONES

- ❖ Hasta antes del inicio del bombeo con el molino de viento en el periodo marzo-octubre de 2014, en el estrato superficial se encontró que los valores medios de salinidad en la parcela piloto en el lapso marzo-octubre de 2014, tuvieron un valor medio de 11 dS/m, que corresponden a un suelo de tercera clase por su nivel de sales. Pero a partir de noviembre del mismo año, coincidente con el inicio de operaciones del molino eólico, los valores medios de salinidad disminuyeron hasta 5 dS/m que corresponde al de un suelo de segunda clase; la reducción del nivel de salinidad es equivalente al 55%. Estos resultados muestran que en el estrato superficial el nivel de salinidad está disminuyendo por efecto del bombeo de agua freática cargada en sales, que está llevando a cabo el molino de viento.
- ❖ El nivel de salinidad más alto se encontró en mayo, cuando la temperatura ambiente empieza a adquirir mayor magnitud, y cuando ya ha finalizado el ciclo de cultivo y finalizan los riegos.
- ❖ Desde que inició el bombeo del agua de drenaje, los suelos mejoraron en su calidad agrícola considerando el estrato 0-60 cm de profundidad. Es así que hasta antes de octubre de 2014 los suelos de tercera y cuarta clases mejoraron a suelos de primera y segunda clases, por el abatimiento del nivel freático. A partir de marzo de 2015 aumentó la red de sitios para la monitorización por lo que se observó que el área de influencia del bombeo es de aproximadamente 41 ha. Las áreas más afectadas localizadas al norte y poniente corresponden a parcelas ociosas; sin cultivo.
- ❖ Antes de la entrada en operación del bombeo con el molino de viento el nivel freático en la época crítica, febrero y marzo, era de 0.70 m; y a través del bombeo el sistema de drenaje subsuperficial tuvo mayor libertad para descargar el drenaje en el cárcamo, por lo cual el nivel freático en los meses críticos de febrero y marzo de 2015 estuvo entre 0.4 y 0.6 m en sus niveles más críticos. La instalación de una red de 11 pozos de observación en la parcela piloto y su área de influencia permitió conocer que el área que está drenando incluye la parcela piloto de 4.3 ha más las parcelas colindantes que carecen de drenaje subsuperficial; es así que se estima un área drenada de 41 ha. Es por esta circunstancia que la potencia del molino de viento es, presumiblemente, insuficiente para abatir el nivel freático por debajo de 1.0 m de profundidad.
- ❖ El incremento de temperatura media mensual correlacionó positivamente con el aumento de salinidad en los estratos superficial (0-60 cm) y subsuperficial (0-150 cm). Las correlaciones obtenidas explican el ensalitramiento del suelo por efecto del incremento de temperatura, que a su vez influye en el ascenso capilar de sales hacia la superficie del suelo por el mecanismo de la evapotranspiración. La correlación de la salinidad en el estrato 0-60 cm y la profundidad al nivel freático en el lapso marzo-mayo arrojó un coeficiente de determinación $r^2=0.86$ que explica la presencia de sales en niveles que son perjudiciales para el cultivo de

trigo, tolerante a las sales; en este periodo es cuando el nivel de salinidad es más alto y el nivel freático está más superficial.

- ❖ El rendimiento medio evaluado de trigo fue de 3.7 ton/ha, el cual se debió al efecto negativo de la salinidad, cuyo valor medio a lo largo del ciclo de desarrollo del trigo, fue de 5 dS/m en el estrato superficial; pero también el bajo rendimiento se debió a la falta de horas frío que se ha estado registrando en el distrito de riego a partir del año 2013, que causó mermas en su rendimiento. Otra causa del bajo rendimiento la constituye el nivel freático superficial, mismo que en el ciclo de siembra se registró más elevado que en el ciclo de cultivo 2013-2014. Las pérdidas estimadas fueron de 0.8 ton/ha, considerando el rendimiento oficial logrado de 4.5 ton/ha en la región sur del Distrito de Riego 038. La variación espacial del rendimiento de trigo se relaciona con la distribución espacial de la salinidad en la parcela piloto; es así que los rendimientos mayores se registraron en las áreas con menores afectaciones por sales.
- ❖ Las afectaciones por salinidad en la parcela piloto tienen por origen las variaciones en: la temperatura ambiente, el nivel freático superficial, la evapotranspiración, precipitación pluvial, y salinidad del agua freática; de acuerdo con el análisis estadístico realizado.
- ❖ Los niveles freáticos elevados que afectan en mayor grado a las partes bajas del Distrito de Riego 038 Río Mayo y Módulo de Riego 05, se podrían abatir mediante el drenaje parcelario subsuperficial y bombeo con energía eólica.

RECOMENDACIONES

- ❖ Continuar con las investigaciones que se realizaron en el presente proyecto, en el sentido de aumentar la potencia de bombeo mediante otro molino de viento de mayor capacidad, así como instalar drenaje subsuperficial en las parcelas colindantes a la parcela piloto.
- ❖ Implementar proyectos para recuperar suelos ensalitrados, incluyendo drenaje parcelario horizontal y bombeo mediante energías alternativas como la eólica y solar.
- ❖ Investigar sobre drenaje vertical mediante bombeo de agua con energías alternativas, para recuperar suelos ensalitrados.
- ❖ Investigar sobre la aplicación del biodrenaje para recuperar suelos ensalitrados.
- ❖ Incrementar las eficiencias de operación en el módulo de riego para el ahorro de agua, y así reducir las aportaciones de sobrieriegos al manto freático superficial. De este modo se reducirían los problemas de salinidad.
- ❖ Llevar a cabo investigaciones sobre la adaptación de cultivos a suelos ensalitrados.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje. Núm. 29, rev.1, Roma; 1987, pp 172.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1997. Drenaje y salinidad en zonas áridas y semiáridas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Cuernavaca, Morelos.
- De la Peña, I. 1979. Principios y solución de drenaje parcelario, Boletín Técnico No. 9, SARH, Ciudad Obregón, Sonora, México.
- De la Peña, I. 1982. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación. Boletín Técnico No. 10, México, SARH, pp 107.
- 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.
- Fernández, G. R. 1990. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. Terra. Vol. 8, núm.2, pp. 226-240.
- Hanson, B. R and S. R. Grattan. 1990. Field sampling of soil, water, and plants. pp 186-200. In: Kenneth K. Tanji (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. New York, NY, USA.
- Martínez, A. P. F. y C. Patiño-Gómez. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. III, núm. 1, pp 5-20.
- McNeill, J. D. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. Technical Note TN-5. Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canada.
- Nikolskii, G. Iourii; O. Palacios Vélez; O. Bakhlaeva E. y A. Llerena V. 2011. El cambio climático, drenaje y salinidad. Memorias del XVI Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán, Sinaloa, México, 6-9 de septiembre de 2011.
- Pulido, M. L., C. L. Wiegand, J. González Meraz, B. D. Robles Rubio, O. X. Cisneros Estrada y O. Lemus Ramírez. 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, Vol. XVIII, núm. 2, pp 83-97.

Pulido, M. L., J. González Meraz y M. Villarreal Pulido. 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, Vol. XXIV, núm. 1, pp 55-72.

Pulido, M. L., J. González Meraz, C. L. Wiegand, J. Infante Reyes y J.M. Delgado. 2010. Monitoreo de la salinidad mediante sensores remotos. Terra Latinoamericana, Vol. 28, núm. 1, pp 15-26.

Reyes, Q. C. 1994. Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo. Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 038 Río Mayo. Navojoa, Sonora, México.

Rhoades, J.D. 1992. Recent Advances in the Methodology for Measuring and Mapping Soil Salinity U.S. Salinity Laboratory. In: International Symposium on Strategies for Utilizing Salt Affected Lands. Bangkok, Thailand, Feb. 17-25, 1992.

Rhoades, J. D., F. Chanduvi, and S. Lesch. 1999. Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. Irrigation and Drainage Paper 57. FAO. Rome, Italy.

Richards, L. A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos, México, Limusa.

Van Der Lelij, A. 1983. Use of an Electromagnetic Induction Instrument (type EM38) for Mapping Soil Salinity. Water Resources Commission. Murrumbidgee Division. Australia.