



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.
Asociación de Usuarios de Riego y Drenaje

Artículo: COMEII-19027

Mazatlán, Sin., del 18 al 20

de septiembre de 2019

VARIABLES AGRONÓMICAS Y CLIMÁTICAS Y SU INFLUENCIA EN EL ENSALITRAMIENTO, BAJO CONDICIONES DE CALENTAMIENTO GLOBAL

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

Se estudiaron la variación temporal y el impacto en la salinidad de variables agronómicas y climáticas, en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México, en el período 2012-2014. Para tal fin, se determinó la salinidad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad; y se midió *in-situ* la profundidad del nivel freático, la salinidad del agua freática y la salinidad del agua de riego; registrándose datos de volumen de riego, temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración de referencia. Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente, donde la salinidad fue la variable dependiente, determinándose así una tendencia ascendente en los niveles de salinidad, mismos que fueron más altos en el estrato subsuperficial. Asimismo, se encontró una tendencia descendente en la sodicidad, donde los contenidos más altos se observaron en el estrato subsuperficial. Las variables independientes exhibieron valores más altos en los años 2013 y 2014, comparados con los de 2012 los cuales propiciaron un mayor ensalitrado. De este modo, se estimó que por cada ha con problemas de drenaje se desarrollan 2.2 ha de suelos ensalitrados. Por cada 0.1 dS m⁻¹ de aumento en la salinidad del agua de riego se producen 278 ha de suelos ensalitrados. Con un incremento de 1 °C en la temperatura ambiental la superficie ensalitrada aumenta 472 ha; y con el incremento de 50 mm de evapotranspiración, los suelos ensalitrados aumentan en 880 hectáreas. Concluyéndose que el calentamiento global está repercutiendo en el ensalitrado del suelo en el Distrito de Riego 038 Río Mayo.

Palabras clave: Monitorización, distrito de riego, drenaje, evapotranspiración, análisis estadístico, Sonora.



Introducción

En México, los distritos de riego con mayores problemas de salinidad (CE) del suelo (conductividad eléctrica $> 4 \text{ dS m}^{-1}$) (Richards, 1954) se localizan en el noroeste del país, ya que existen 298,361 ha afectadas equivalentes al 62% a nivel nacional (De la Peña, 1993). En esta región prevalecen climas áridos y semiáridos, y en la misma se ubica el Distrito de Riego 038 Río Mayo (DR 038), en el estado de Sonora. Después de más de 50 años de operación, este distrito de riego (DR) presenta afectaciones en el 32 % de su superficie (De la Peña, 1993; Pulido *et al.*, 2009 y 2010). La importancia de estudiar la CE es por el impacto negativo que las sales en exceso causan a la producción agrícola, ya que todas las especies cultivadas tienen un nivel de tolerancia a la CE (Ayers y Westcot, 1987; Maas, 1990; Grieve *et al.*, 2012).

En las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación pluvial (PP) es menor que la evaporación, la causa más común de acumulación de sales es la evapotranspiración (ET), misma que aumenta la concentración de sales a medida que profundiza la zona radicular (Corwin *et al.*, 2012). En términos generales, las causas potenciales o fuentes de excesos de sales incluyen agua de riego salina, aguas de drenaje, lixiviación inadecuada, drenaje inadecuado, sales del suelo nativas, evaporación de agua de la superficie y la transpiración de las plantas, lluvia, y procesos continuos de inundación y evaporación de aguas cargadas de sales; otras fuentes incluyen depósitos atmosféricos de sales oceánicas a lo largo de las costas, intrusión de agua marina, fertilizantes químicos, abonos orgánicos y riego con aguas de drenaje (Shainberg, 1990; Rhoades, 2012; Tanji y Wallender, 2012; Ayars, *et al.*, 2012; Suarez y Jurinak, 2012; Pulido *et al.*, 2009; Pulido, 2016).

En estudios de CE realizados en el DR 038 entre 1970 y 2001 se determinó que las diferencias encontradas en las áreas afectadas por CE, están ligadas a la disponibilidad de agua de riego y a los niveles freáticos superficiales; y a su vez, la disponibilidad de agua está influenciada por las condiciones climáticas. Específicamente la temperatura (T) que está en aumento, y la PP que tiene tendencia decreciente; en ambos casos, debido al calentamiento global (Pulido *et al.*, 2009; Pulido, 2016). Por efecto del calentamiento global existente en el planeta (IPCC, 2014), según Salinas *et al.* (2015) se prevé en el sur del estado de Sonora que para el periodo 2075-2099 la T máxima aumentará entre 5.0 y 5.4 °C y la PP disminuirá un 16.9%; es así que en el DR 038 se espera que los problemas de salinidad se agraven debido a este fenómeno. Por su parte, Pulido (2016) concluyó que en el DR 038 debido al calentamiento global se incrementó la superficie ensalitrada en un 24.1% en el periodo 1970-2001; adicionalmente, se calculó un desarrollo de mayores superficies con niveles freáticos superficiales; del orden de un 21.9%.

De acuerdo con Nikolskii *et al.* (2011), en 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 total 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.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Estudiar las variaciones temporales de la salinidad y sodicidad del suelo en los estratos superficial y subsuperficial, así como de niveles freáticos superficiales, salinidad del agua freática, temperatura, evapotranspiración y precipitación pluvial, en el Módulo de Riego 05 del Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, en el periodo 2012-2014. 2) Analizar la influencia e impacto de las variables volumen de riego, nivel freático superficial, salinidad del agua freática, salinidad del agua de riego, temperatura, evapotranspiración y precipitación pluvial, en el ensalitramiento de los suelos del Módulo de Riego 05 del Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, en el periodo 2012-2014.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó durante el periodo 2012-2014 en el DR 038 Río Mayo, Sonora, México. Este distrito se localiza entre los paralelos 26°21' y 28° 31' N y meridianos 108° 26' y 110° 05', con una altura media de 40 msnm. El DR queda comprendido en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, Sonora; tiene una superficie bruta de 112,489 ha y una superficie de riego de 96,951 ha, la cual es regada por gravedad con el agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines, y con agua de bombeo de pozos del acuífero 2,642 Valle del Mayo. Su clima es estepario semiárido, con PP anual de 415 mm, T media anual de 18.4 °C, y una evaporación media anual de 2,222 mm (Reyes, 1994; Pulido, 2016; Conagua, 2015). En la región sur, que es donde existen más afectaciones de CE y niveles freáticos superficiales (Reyes, 1994; Pulido *et al.*, 2001, 2009; 2010), se localiza el Módulo de Riego 05 (MR05) en el cual se realizó la presente investigación.

Muestreo y análisis de suelo

Se obtuvieron muestras de suelo en forma manual con una barrena agrológica, a las profundidades de 0-30 cm (estrato superficial) y 30-60 cm (estrato subsuperficial), en marzo de 2012, abril de 2013 y abril de 2014, todas en el ciclo agrícola de otoño-invierno (O-I). Los sitios de muestreo se distribuyeron en el área del MR05 en una superficie física de 6,209 ha, en parcelas con diferente nivel de afectación por sales según apreciación visual, y con apoyo en estudios de salinidad realizados previamente (Pulido *et al.*, 2009; 2010). Se analizaron el potencial hidrógeno (pH) (en pasta) con el método potenciométrico relación suelo: agua 1:2; la conductividad eléctrica del extracto por medio del puente de conductividad en el extracto de la pasta; calcio (Ca) y magnesio (Mg) determinados por espectrofotometría de absorción atómica; sodio (Na) y potasio (K) analizados por espectrofotometría de emisión de flama; carbonatos (CO₃), bicarbonatos (HCO₃), y cloruros (Cl⁻) por volumetría, sulfatos (SO₄) por turbidimetría; nitratos (NO₃) determinado por arrastre de vapor: kjeldahl. Con los contenidos de Ca, Na y Mg se calcularon la relación de adsorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) según Richards (1954). La cantidad de muestras se definió en función de la variabilidad de la población, y de la precisión y nivel de confianza deseados, según el criterio señalado por Hanson y Grattan (2012), donde el nivel de confianza fue del 95%,



el error de la media de las muestras fue de 0.1 y el coeficiente de variación (CV) supuesto fue de un 40%; es así que en 2012 se tomaron 64 muestras, en 2013, 56 y en 2014, 58; en promedio (\bar{x}) se tomó una muestra por cada 105 ha. Asimismo, se utilizó un receptor geoposicionador (GPS) Garmin etrex Venture HC para obtener en cada sitio de muestreo de suelo y de monitorización de MF y salinidad del agua freática (CEaf), las coordenadas geográficas latitud y longitud, así como las coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator).

Monitorización de niveles freáticos y de salinidad del agua. Obtención de datos climáticos

Los datos de profundidad del nivel freático superficial (MF) se generaron de una red de 52 pozos de 3 m de profundidad construida ex profeso durante marzo y abril de 2012, en una densidad de un pozo por cada 119 ha; los pozos se ubicaron próximos a los que tenía el DR 038 hasta el año 2001 (Ing. Efraín Cervantes Luna, comunicación personal). La cantidad de pozos se definió según el criterio señalado por Hanson y Grattan (2012). El procedimiento para la construcción de pozos se señala en De la Peña (1979) e IMTA (1997). En dicha red se llevaron a cabo mediciones mensuales del nivel freático hasta una profundidad de tres metros; estas se hicieron entre marzo de 2012 y octubre de 2014. En la misma red se midió mensualmente la CEaf con un medidor portátil Hanna HI9811-5.

Con base en las coordenadas geográficas y los datos de CE, sodicidad, MF y CEaf se desarrolló un sistema de información geográfico (SIG), que sirvió para la elaboración de mapas de clasificación por CE y PSI, según la metodología de De la Peña (1982), y que según Richards (1954) y De la Peña (1982) comprenden suelos normales (N), salinos (S), salino sódicos (SSO), y sódicos (SO); y mapas de isobatas y de superficies con CEaf. El criterio para la determinación de rangos de salinidad, sodicidad, y CEaf, así como para la presentación de estos mapas, se hizo siguiendo especificaciones de De la Peña (1982); Pulido *et al.*, (2009, 2010), y Ayers y Westcot (1987). Para el desarrollo del SIG se utilizó el software ArcGis versión 9.1.

Entre diciembre de 2012 hasta abril de 2013, y diciembre de 2013 hasta marzo de 2014, semanalmente, se midió *in-situ* la salinidad del agua de riego (CEar) con el medidor referido; las lecturas se tomaron en el Canal 3+300 en el punto de control ubicado en el km 29 + 345 donde es servida el agua de riego al MR05.

Las condiciones diarias de T, PP y ET registradas en el área de estudio se obtuvieron en el sitio web www.agroson.org.mx ([Red agrometeorológica del estado de Sonora, 2014](http://www.agroson.org.mx)). De igual modo, a partir de consultas realizadas tanto de los archivos del DR 038 como de la SRL de I.P. y C.V., se consiguieron datos del DR 038 y del MR05 sobre superficies sembradas, volúmenes de riego, láminas de riego por cultivo, y eficiencias de riego.

Estimación del impacto de variables agronómicas y climáticas en la salinidad

Con los datos de superficies afectadas por suelos salinos (S) (más de 4 dS m⁻¹ de salinidad y menos de 15 PSI) y salino sódicos (SSO) (más de 4 dS m⁻¹ de salinidad y más de 15 PSI) (Richards, 1954) se calcularon para los estratos superficial y subsuperficial

los promedios, la desviación estándar (SD) y el CV; igualmente, se hicieron análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar diferencias significativas entre estratos y entre años. También con los datos de las mediciones mensuales de las variables MF, CEaf, T, ET y PP se hicieron cálculos de la media, DESV y CV. Se analizaron mediante modelos de regresión lineal simple (RLS) como variables dependientes: la CE y superficie afectada por sales, PSI y la superficie con SSO; MF y superficie afectada por niveles freáticos, y CEaf y la superficie afectada por salinidad del agua freática; y como variables independientes: volumen de riego (VOL), MF, CEaf, CEar, T, ET y PP. Por medio de los modelos de RLS se calculó el impacto de las variables agronómicas VOL, MF, CEaf, CEar, y climáticas T, ET y PP, en el ensalitramiento del suelo. El análisis estadístico se realizó con el programa Excel 2010.

Resultados

Variación temporal de la salinidad y sodicidad

De las 6,209 ha de superficie total del MR05 estudiado, en el estrato superficial se determinó que de los cuatro grupos de suelo cartografiados, los S cubrieron una mayor superficie en 2013 equivalente al 67.5; no se cartografiaron SO (menos de 4 dS m⁻¹ de salinidad y más de 15 PSI) (Cuadro 1). En consecuencia, al integrar suelos S + SSO como suelos ensalitrados, en 2013 se cuantificaron las mayores superficies, del orden de un 73.2 %. La predominancia de suelos S se debe a que en este estrato se encontró mayores niveles de los cationes Ca y Mg sobre el Na; lo cual coincide con Richards (1954) y De la Peña (1982), por cuanto estos son los cationes predominantes que se encuentran en la solución del suelo y en el complejo de intercambio de suelos normales en las regiones áridas y semiáridas.

Cuadro 1. Porcentaje de suelos normales, salinos y salinos sódicos en los estratos a 30 y 60 cm de profundidad, en el periodo 2012-2014.

Clasificación	Porcentaje de superficie en la profundidad 0-30 cm			Promedio
	Marzo 2012	Abril 2013	Abril 2013	
Normal	32.2	26.8	55.8	38.3
Salino	57.5	67.5	33.9	53.0
Salino sódico	10.3	5.7	10.3	8.8
Salino y salino sódico	67.8	73.2	44.2	61.7
Afectación Incremento		5.4	-23.6	61.8

Clasificación	Porcentaje de superficie en la profundidad 30-60 cm			Promedio
	Marzo 2012	Abril 2013	Abril 2013	
Normal	34.4	18.4	19.7	24.3
Salino	44.7	73.3	64.4	60.8
Salino sódico	20.9	8.3	15.9	15.1
Salino y salino sódico	65.6	81.6	80.3	75.8
Afectación Incremento		16.0	14.7	75.8

En el estrato subsuperficial, los suelos S tuvieron tendencia ascendente, y representaron un mayor porcentaje del área en 2013 (73.3 %) (Cuadro 1). De la superficie con suelos ensalitrados se calcularon afectaciones crecientes, en coincidencia con Pulido (2016 y 2018) en el DR 038 en un análisis que incluyó el periodo 1970-2001, quien concluyó que los incrementos en la salinidad están ligados a variaciones temporales de variables agronómicas (MF, VOL, CEar y CEaf; y climáticas (T y PP); por lo tanto, se encontró que con relación a 2012, la superficie ensalitrada en 2013 se incrementó un 16.0% y en 2014 en un 14.7%.

Se registró un decremento en la sodicidad en ambos estratos, y según De la Peña (1982) se debe a que al aplicar aguas de alto contenido de Na como aconteció en el MR05 durante el ciclo agrícola O-I, 2011-2012 debido a una sequía, este elemento reemplaza al Ca y Mg. Esto es, se registró un predominio de sales de Na (sulfato de sodio, NaSO₄ y cloruro de sodio, NaCl) y sales de Mg (sulfato de magnesio, MgSO₄ y cloruro de magnesio, MgCl₂), que, para Babcock *et al.* (1973) son de alta solubilidad. En el DR 038 cuando hay sequías como las acaecidas entre 1997-2001 y 2011-2012, para riego se utiliza agua de drenaje y de bombeo de pozos profundos con altos niveles de sales sódicas (Pulido *et al.*, 2001; 2009; Pulido, 2018), lo que contribuye al ensalitramiento.

Al comparar ambos estratos, se observó que las mayores superficies de suelos ensalitrados se encontraron en el estrato subsuperficial en 2013 (81.6 %) (Cuadro 1), en coincidencia con Pulido (2016 y 2018) en su análisis de superficies ensalitradas en el DR 038 en el periodo 1972-1991. Asimismo, este resultado concuerda con Ayers y Westcot (1987) por cuanto en suelos bajo riego, la CE aumenta con la profundidad; también, Ayars *et al.*, (2012) establecen que en los suelos con niveles freáticos <2 m la CE aumenta con la profundidad del suelo. Esta condición se cumple en el MR05, ya que en el DR 038 este módulo es de los más afectados por niveles freáticos superficiales y por CE (Pulido *et al.*, 2009; 2010). En promedio, en los suelos ensalitrados en el estrato superficial se calculó una superficie del 61.8 %, mientras que en el estrato subsuperficial ésta fue del 75.8 % (Cuadro 1).

Correlación de niveles freáticos y volumen de riego con la salinidad y sodicidad

Los niveles freáticos superficiales medios anuales más someros se observaron en 2014 (2.0 m), seguido de 2013 (2.1 m) (Cuadro 2). No obstante las diferencias observadas, no se encontraron diferencias estadísticas significativas dado que $F_c = 2.148 < F_t = 3.327$. De igual modo, las mayores afectaciones medias anuales en superficie se estimaron en 2013 (26.5 %), y las menores en 2012 (18.1 %) (Cuadro 2). Estadísticamente, las diferencias anuales en % de superficie afectada no fueron significativas ($F_c = 0.284 < F_t = 3.327$).

Cuadro 2. Estadísticos de variables agronómicas y climáticas del Módulo de Riego 05.

Variable ¹	2012					2013					2014				
	X	SD	CV	>	<	X	SD	CV	>	<	X	SD	CV	>	<
MF (m)	2.3	0.3	13.6	2.6	1.6	2.1	0.3	14.1	2.5	1.7	2.0	0.3	16.7	2.3	1.7
MF (%)	18.1	27.6	152.1	93.1	3.0	26.5	25.1	94.7	63.7	2.6	24.0	26.7	111.2	63.9	2.7



CEaf (dS m ⁻¹)	6.3	0.6	9.1	7.0	5.4	5.7	0.5	8.3	6.5	5.2	5.8	0.4	6.9	6.5	5.3
CEaf (%)	63.3	12.8	20.3	81.3	42.5	77.0	6.1	8.0	90.0	68.2	73.3	7.8	10.7	84.8	61.5
T (°C)	22.7	6.0	26.3	29.7	15.3	22.6	6.3	27.7	30.3	13.7	23.6	5.8	24.6	30.9	16.2
ET (mm)	1455	28.0	23.1	165.0	72.0	1607	42.3	31.5	196	72.0	1491	40.9	32.9	181	87.0
PP (mm)	201	27.1	162.0	78.0	0	324	46.3	171	140	0	221	24.0	130	69	0

¹MF= nivel freático superficial; CEaf= salinidad del agua freática; T= temperatura; ET= evapotranspiración de referencia anual; PP= precipitación pluvial anual; x= promedio anual; SD= desviación estándar; CV= coeficiente de variación (%); >= valor superior; <= valor inferior.

Los volúmenes de riego que se aplicaron entre noviembre y abril de los ciclos agrícolas 2011-2012 (ciclo 2012), 2012-2013 (ciclo 2013) y 2013-2014 (ciclo 2014) fueron de 18.5 hm³, 25.6 hm³, y 24.4 hm³, correspondientemente; estos VOL se correlacionaron con los MF medios anuales, encontrándose que los mayores VOL aplicados en 2013 y 2014 comparados con los de 2012, se reflejaron en mayores superficies con promedios anuales de MF (26.5 %, 24.0 % y 18.1 hm³, respectivamente) (modelo 1, Cuadro 3 y Figura 1 a); es así que se registró un aumento de 65 ha con MF por cada hm³ de riego, a partir del VOL de 2012. En este sentido, Pulido (2018) señala que en el DR 038 con el análisis de datos de VOL y superficies con MF que incluyen el periodo 1970-2001, se estableció que una de las principales causas de los problemas de drenaje se debía a la aplicación de volúmenes de riego que superaban la capacidad de drenaje de los suelos. De acuerdo con Pulido *et al.* (2001; 2009), y Pulido (2018), en el DR 038 los problemas de niveles freáticos superficiales existen por la insuficiente capacidad de drenaje de la red a cielo abierto, que no es capaz de evacuar hacia el mar, el agua de percolación de riegos y las filtraciones en los canales.

Los MF correlacionaron con la salinidad. Es así que se encontró que en el estrato subsuperficial la superficie con S + SSO se desarrolla en mayor medida cuando la superficie con MF aumenta (Cuadros 1 y 2), por lo que los MF explican el desarrollo de suelos con superficies ensalitradas (modelo 2, Cuadro 3 y Figura 1 b). Con apoyo en este modelo se calculó que por cada ha de MF se producen 2.2 ha de S + SSO en el estrato subsuperficial. También, se analizó que el aumento en la superficie de S del estrato subsuperficial (Cuadro 1), correlaciona con el incremento de la superficie con un nivel freático superficial (Cuadro 2) (modelo 3, Cuadro 3); es así que con base en el modelo 3 se estimó que 1 ha de MF influye en el desarrollo de 3.6 ha de suelos salinos. En el periodo de estudio el incremento de superficie con MF fue del 5.9 % y el de S + SSO fue del 16.0 % en el estrato subsuperficial (Cuadros 1 y 2). Al respecto, Pulido (2016) concluyó que en el DR 038 debido al calentamiento global, los problemas de CE del suelo se incrementaron un 24.1% y un 15.8% en los estratos de suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente, en el periodo 1970-2001; asimismo, se estimó un desarrollo de mayores superficies con MF, del orden de un 21.9% en el mismo periodo.

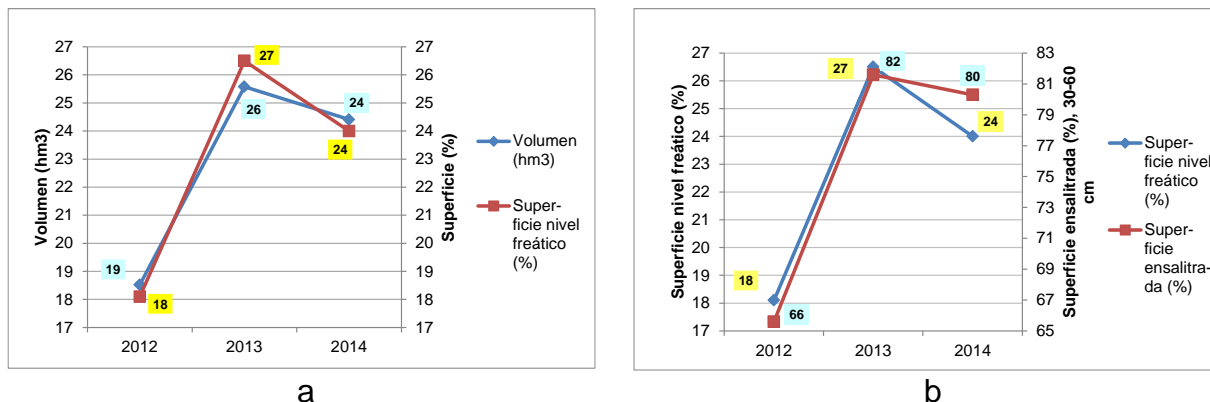


Figura 1. Correlación de superficie con nivel freático somero y: a) volumen de riego; b) superficie ensalitrada.

Las mayores superficies \bar{x} con SSO de 21 % en el estrato subsuperficial se cuantificaron en 2012 (Cuadro 1), cuando las superficies con MF estacional (\bar{x} de enero-abril) fueron las más bajas (48.1% en 2012; 57.4 % en 2013, y 52.9 % en 2014). En la correlación de SSO con MF (modelo 4, Cuadro 3) se valoró que las mayores afectaciones de SSO se manifiestan cuando la superficie con MF es baja; como en 2012, y cuando hay restricciones en la disponibilidad de agua de riego, como sucedió en este año.

Cuadro 3. Análisis de varianza de regresión lineal simple de variables agronómicas y climáticas.

Modelo	Estrato (cm)	Fuente de datos	Modelo de regresión ¹	R ²	n	Fc	Ft
1	-----	Superficie	MF= 1.128(VOL)-2.914	0.98	3	51.23	161.44
2	30-60	Superficie	S+SSO=2.010(MF)+29.866	0.95	3	19.84	161.44
3	30-60	Superficie	S=3.313(MF)-15.091	0.99	3	1453.5*	161.44
4	30-60	Superficie	SSO=-1.350(MF)+86.38	0.98	3	51.55	161.44
5	30-60	Superficie	S+SSO=2.334(VOL)+22.52	0.99	3	153.45	161.44
6	30-60	Superficie	S=3.726(VOL)-24.433	0.97	3	36.05	161.44
7	-----	Superficie	CEaf=1.854(VOL)+28.856	0.98	3	89.09	161.44
8	-----	Superficie	CEaf=1.642(MF)+33.643	0.99	3	1114.8*	161.44
9	0-30	Superficie	S+SSO=44.75(CEar)+4.19	0.94	3	16.66	161.44
10	30-60	Superficie	S+SSO=7.632(T)-59.01	0.84	3	5.39	161.44
11	0-30	Superficie	S+SSO=0.283(ET)-119.38	0.99	3	105.45	161.44
12	0-30	Superficie	S=0.318(ET)-150.55	0.99	3	2271.2*	161.44
13	30-60	Superficie	S=0.181(PP)+151.468	0.70	3	2.38	161.44
14	0-30	Superficie	SSO=-0.039(PP)+18.657	0.97	3	42.56	161.44
15	-----	-----	MF=0.003(PP)+2.398	0.95	4	45.77*	18.51

¹MF= nivel freático superficial <1.5 m; VOL= volumen (hm³); CE= salinidad (dS m⁻¹); S= suelos salinos; SSO= suelos salino sódicos; PSI= por ciento de sodio intercambiable; CEaf= salinidad del agua freática (dS m⁻¹); CEar= salinidad del agua de riego (dS m⁻¹); T= temperatura (°C); ET= evapotranspiración de referencia (mm); PP= precipitación pluvial (mm); Fc= F calculada con 95% de confianza; Ft= valor crítico de F, α= 0.05 de significancia; *= estadísticamente significativo.

De acuerdo a lo anterior, se encontró que el aumento de los problemas de drenaje en el MR05 correlaciona con disminuciones en los problemas de sodicidad. Esto es, el calentamiento global que se está manifestando con sequías en el DR 038, como la registrada entre 1997-2001 (Pulido, 2018) y la observada entre 2011-2012, propician el desarrollo de SSO. De acuerdo con este análisis, la existencia y desarrollo de niveles



freáticos superficiales influye en el desarrollo de suelos ensalitrados y de suelos salinos, pero reduce la superficie con suelos salino sódicos; los niveles de Na bajan como en 2013 y 2014, debido a que los MF disolvieron las sales, en particular el cloruro de sodio (NaCl) que es de las sales más solubles, y el sulfato de sodio (Na_2SO_4) que es sensible al incremento de temperatura, de acuerdo con Babcock *et al.* (1973). Los MF influyen en el crecimiento de superficies con S y suelos ensalitrados (modelos 2 y 3, Cuadro 3), como consecuencia de que en los MF existen altos contenidos de CEaf (Pulido *et al.*, 2001; 2009; Cabrera y Beltrán, 2004).

Se llevaron a cabo correlaciones entre S+SSO y S con VOL (modelo 5, Cuadro 3; y modelo 6, Cuadro 3); por lo que es posible afirmar que a mayores volúmenes de riego se elevan las superficies afectadas con estos grupos de suelo, en el estrato subsuperficial. Con base en estos modelos, se estimó que a partir de los 18.5 hm^3 que fueron utilizados en 2012, por cada hm^3 los suelos ensalitrados aumentaron 145 ha, y los suelos salinos 231 hectáreas.

Correlación de salinidad del agua freática y del agua de riego con la salinidad y sodicidad del suelo

En el periodo 2012-2014 los niveles medios de CEaf (dS m^{-1}) más altos se calcularon entre abril-octubre, al finalizar el ciclo agrícola de O-I; igualmente, las superficies más altas de CEaf se estimaron entre abril y mayo, al finalizar el ciclo agrícola de O-I. La mayor superficie mensual, igual al 90 % se cuantificó en abril de 2013. La mayor variabilidad en concentraciones y superficie con CEaf se determinó en 2012 (Cuadro 2); en este año se aplicó un menor VOL. Se analizó que al aumentar los volúmenes de riego se desarrollan superficies con CEaf debido a que los VOL aumentan los MF, y tanto el agua freática como el agua de riego contienen sales que por igual contribuyen en el ensalitramiento (Richards, 1954; De la Peña, 1979; Ayers y Westcot, 1987; Ayars, *et al.*, 2012; Grieve *et al.*, 2012; Rhoades, 2012; Tanji y Wallender, 2012; Suarez y Jurinak, 2012; Pulido *et al.*, 2009; Pulido, 2018).

Lo anterior se comprobó a través de la correlación de las superficies medias de CEaf estimadas que fueron ascendentes entre 2012-2014 (Cuadro 2), y los VOL anuales que también fueron crecientes en dicho periodo (modelo 7, Cuadro 3). Mediante este modelo se calculó que por cada hm^3 de riego la superficie con CEaf incrementa 107 ha, a partir de un VOL de 18.5 hm^3 aplicado en 2012. Con el aumento de los VOL se analizó un incremento en las superficies con MF (modelo 1, Cuadro 3). Entonces, al correlacionar la superficie de CEaf como variable dependiente de la superficie de MF, se analizó que los problemas con CEaf aumentan al incrementarse la superficie con MF (modelo 8, Cuadro 3); esto es, con base en el modelo 8 se calculó que por cada ha con MF, la superficie con CEaf incrementa 1.6 ha a partir de una superficie de MF equivalente al 18.1 % estimada en 2012.

La CEaf media aplicada en el MR05 varió de 1.50 dS m^{-1} en 2012, 1.46 dS m^{-1} en 2013 y 0.90 dS m^{-1} en 2014. Esta variación correlacionó con la superficie con suelos ensalitrados en el estrato superficial; por cuanto a incrementos en la CEaf también se estimaron aumentos en la superficie afectada por S + SSO (modelo 9, Cuadro 3). Con el

modelo 9 se calculó que por cada 0.1 dS m^{-1} de aumento en la CE_{ar} se desarrollan 278 ha de suelos ensalitrados. Al respecto, Cabrera y Beltrán (2004) y Pulido (2018) expresan que en el DR 038 se aplicaron riegos en trigo con aguas cuyas concentraciones de sales fueron de 0.62 dS m^{-1} , 0.94 dS m^{-1} y 1.56 dS m^{-1} . Esta calidad del agua se reflejó en un incremento en la CE del suelo de 5.0 dS m^{-1} , 6.6 dS m^{-1} y 7.8 dS m^{-1} , respectivamente; por lo que se concluyó que cuando se riega con agua con contenidos de CE $> 0.6 \text{ dS m}^{-1}$, se ensaltran los suelos.

Se concluye que la CE_{ar} es una variable que interviene en el desarrollo de la superficie ensalitrada en el MR05 en el periodo 2012-2014, lo cual se asocia al calentamiento global. Pulido *et al.* (2009) y Pulido (2018) mencionan que en los periodos de sequía, que cada vez son más recurrentes y prolongados en el DR 038, los agricultores de los módulos de riego más afectados por salinidad (módulos 01, 02, 05, 06 y 07) utilizan para riego agua de mala calidad. Es así que en las sequías acaecidas entre 1973-1980, 1997-2000 y 2011-2012, los agricultores regaron con agua de drenes y del bombeo de pozos profundos con altos niveles de CE y Na (Pulido, 2018), y ello explica que en 2012 se valoraron las mayores concentraciones de CE_{ar} y CE_{af}; de los tres años observados.

Correlación de temperatura, evapotranspiración y precipitación pluvial con la salinidad y sodicidad

La T media anual en el MR05 entre 2012-2014 fue en ascenso, y la más alta, de $23.6 \text{ }^\circ\text{C}$ se registró en 2014 (Cuadro 2); en este año, la T media mensual de la mayoría de meses fue superior que en los mismos meses de 2012 y 2013, excepto agosto y noviembre (Figura 2 a). Se determinó que las $T \bar{x}$ mensuales más altas se registraron en 2014 entre junio y septiembre; por lo cual en el periodo de estudio se observó un incremento de T que está acorde con el calentamiento global del planeta (IPCC, 2014). Las diferencias de los promedios anuales no son significativas ya que $F_c = 0.100 < F_t = 3.28$. La T media de marzo entre 2012-2014 ($16.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $17.9 \text{ }^\circ\text{C}$ y $18.6 \text{ }^\circ\text{C}$) coincidente con la época del muestreo de suelos, se correlacionó con la superficie de suelos ensalitrados en el estrato subsuperficial (Cuadro 1) y así se estableció que el aumento en la T influye en el desarrollo de superficies ensalitradas (modelo 10; Cuadro 3 y Figura 3 a). Con referencia al año 2012, se calculó un aumento de 472 ha de suelos ensalitrados en el estrato subsuperficial por cada grado Celsius. La T afecta la solubilidad de las sales en agua (Babcock *et al.*, 1973). Algunas sales como el cloruro de sodio (NaCl) son igualmente solubles a temperaturas de $0\text{-}50 \text{ }^\circ\text{C}$; ésta es una sal muy soluble. Con T bajas, como las que se registraron en invierno en el DR 038, con valores medios mensuales de $9.4 \text{ }^\circ\text{C}$ en enero, en el periodo 1968-2006, las sales carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y sulfato de sodio (Na_2SO_4) contribuyen en la formación de suelos SSO y SO (Babcock *et al.*, 1973; Pulido, 2018).

La ET es una de las variables causantes del ensaltramiento del suelo, que involucra el movimiento ascendente de humedad y sales solubles debido a fuerzas capilares, hacia la superficie del suelo (Corwin *et al.*, 2012; Rhoades, 2012; Tanji y Wallender, 2012; Suarez y Jurinak, 2012). Se encontró que la ET anual acumulada fue mayor en 2013 (1,607 mm) y la menor en 2012 (1,455 mm); por lo que tuvo una tendencia ascendente. Entre promedios mensuales de 2012-2014 (121, 134 y 124 mm, respectivamente) no

hubo diferencia estadística, ya que $F_c = 0.375 < F_t = 3.28$. Los meses con mayor tasa de ET fueron entre mayo-agosto; y en 2013 y 2014 se calcularon los valores de ET más altos (Cuadro 2 y Figura 2 b). En la correlación de la ET y S+SSO, se analizó que en el estrato superficial el desarrollo de áreas ensalitradas se explica por las variaciones en la ET acumulada de enero a mayo de cada año entre 2012-2014 (654 mm, 684 mm y 579 mm) (ET estacional) (modelo 11, Cuadro 3; Figura 3 b); es decir, en 2013 se calculó la ET más alta y también se estimó la mayor superficie con suelos S+SSO (Cuadro 1), y en 2012 se registraron las cantidades más bajas de ambas variables. Mediante el modelo 11 se estimó que por el incremento de 50 mm de ET en el periodo estacional los suelos ensalitrados aumentaron 880 ha, con respecto a la ET más baja, en 2014.

De la misma manera, se analizó que la ET media de enero-mayo correlaciona con la superficie de S en el estrato superficial (modelo 12; Cuadro 3); y con base en este modelo se estimó que por el incremento de 50 mm de ET los suelos salinos aumentaron 989 ha, con respecto a los niveles de 2014; los más bajos de ambas variables. Con estos resultados se confirma que la ET es una de las variables causantes del ensalitramiento del suelo, tal y como lo manifiesta Corwin *et al.*, 2012.

Las precipitaciones pluviales anuales acumuladas tuvieron tendencia creciente entre 2012-2014; las mayores fueron en 2013 (324 mm) y las menores en 2012 (201 mm) (Cuadro 2 y Figura 2 c). Las diferencias en PP anuales acumuladas no tuvieron significancia estadística, ya que $F_c = 0.310 < F_t = 3.28$. De acuerdo con Kovda *et al.* (1973) y Ayars *et al.* (2012) el agua de lluvia tiene el menor contenido de sal de todos los tipos de agua utilizadas para riego. La aportación anual de sal de lluvia se ha estimado entre 100 y 200 kg ha⁻¹ cerca de una costa, y de 10 a 20 kg ha⁻¹ en los interiores continentales. Aunque pequeñas, estas aportaciones pueden sumar cantidades considerables de sales en áreas con poca lluvia después de varias décadas.

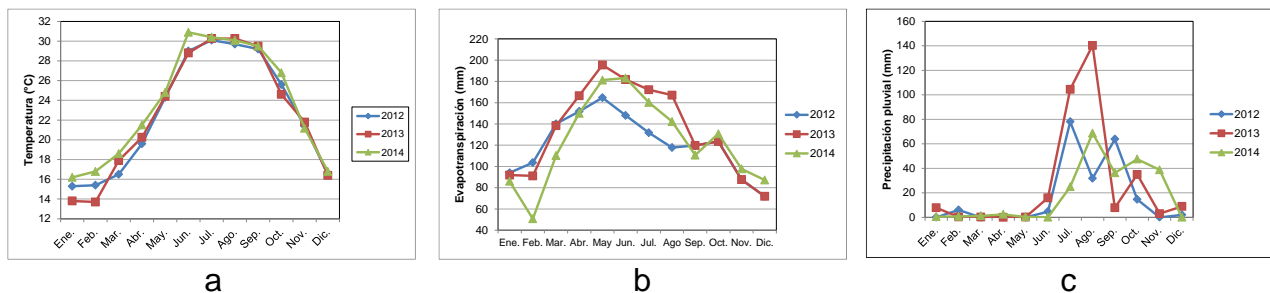


Figura 2. Variación mensual de: a) temperatura; b) evapotranspiración de referencia; c) precipitación pluvial, en el periodo 2012-2014.

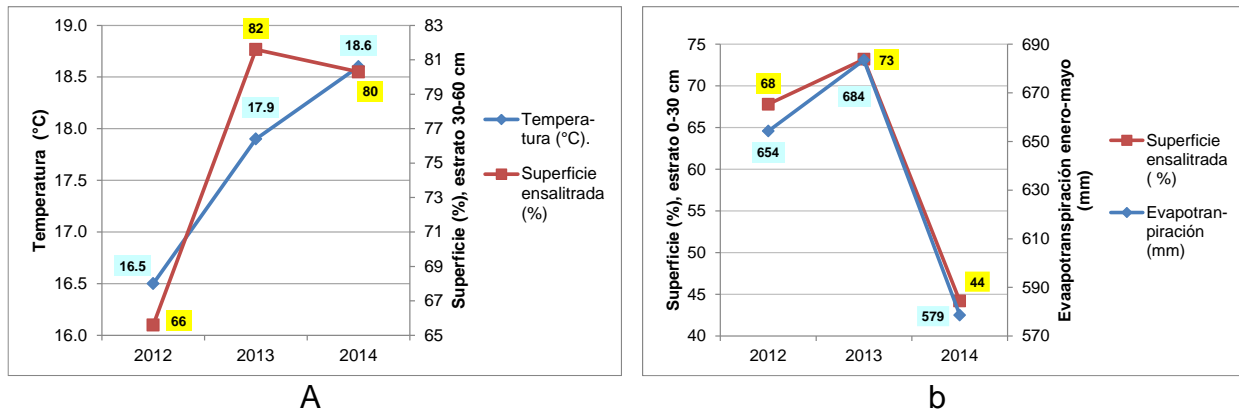


Figura 3. Correlación entre evapotranspiración y: a) superficie ensalitrada; b) superficie con suelos salinos, en el periodo 2012-2014.

Con la correlación de PP y S, se encontró que con el aumento de las PP anuales acumuladas se desarrolló la superficie con S del estrato subsuperficial, debido a que las PP contribuyeron en el lavado de sales solubles del estrato superficial que son transportadas hacia el subsuelo (modelo 13, Cuadro 3). Los resultados coinciden con Pulido (2018), quien en el periodo 1973-2001 analizó una correlación estadísticamente significativa entre las precipitaciones pluviales y la superficie con suelos ensalitrados en el estrato a 30-60 cm ($R^2 = 0.69$, $F_c=13.38 > F_t=5.98$); por lo que las precipitaciones pluviales disuelven las sales e incrementan la superficie ensalitrada. Sin embargo, las PP tuvieron un efecto de reducción de la superficie de SSO en ambos estratos debido a lavado de sales; aunque el efecto fue mayor en el estrato superficial (modelo 14, Cuadro 3). Las PP acaecidas entre junio y septiembre de 2012 variaron entre 5-78 mm así que aportaron humedad en el perfil del suelo, y correlacionaron con el MF. En junio el MF fue de 2.40 m y la PP fue de 5 mm y en julio el MF fue de 2.64 m y la PP fue de 78 mm (modelo 15, Cuadro 3); esto es, las PP contribuyeron en el lavado de sales salino sódicas. Por lo tanto, la PP es una variable climática que explica el ensalitramiento de los suelos en el Módulo de Riego 05.

Conclusiones

1. En el periodo 2012-2014 en términos de superficie afectada por grupos de salinidad y sodicidad en el estrato subsuperficial, se encontró una tendencia creciente de superficie con suelos salinos y suelos ensalitrados. Con respecto a afectaciones por niveles freáticos superficiales y de la superficie con salinidad en el agua freática, se cuantificaron incrementos durante 2013 y 2014, respectivamente. En dicho periodo la temperatura, evapotranspiración y la precipitación pluvial tuvieron tendencia creciente.
2. Los cambios analizados en superficies con suelos salinos y salino sódicos en el estrato superficial y en el subsuperficial, están influenciados por los volúmenes de riego que fueron crecientes; mismos que propiciaron aumentos en superficies con niveles freáticos y en superficies con salinidad del agua freática. Asimismo, estos cambios se correlacionan con variaciones en el contenido de sales en el agua de riego, el cual fue decreciente. Además, los incrementos en superficies con



problemas de salinidad correlacionan con aumentos en niveles de las variables temperatura, evapotranspiración y precipitación pluvial. Estos resultados suponen un escenario de mayor superficie ensalitrada en el Módulo de Riego 05 y en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, como consecuencia del calentamiento global que se está experimentando en el planeta.

Referencias Bibliográficas

- Ayars, J. E.; G. J. Hoffman and D. L. Corwin. 2012. Leaching and rootzone salinity control. pp 371-403. In W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.
- 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.
- Babcock K.L.; V.V. Egorov and V.A. Kovda. 1973. Chemistry of saline and alkali soils of arid zones. In irrigation, Drainage and Salinity, an International Source Book. Hutchinson FAO/UNESCO. www.unesdoc.unesco.org
- Cabrera, C. F. y M. de J. Beltrán Fonseca. 2004. Avances de investigación del efecto de la calidad del agua de riego en el Distrito de Riego 038, Río Mayo. En Taller de análisis de tecnologías para la identificación de suelos ensalitrados mediante percepción remota. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, del 18-19 de noviembre de 2004.
- Conagua (Comisión Nacional del Agua). 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle del Mayo (2642), estado de Sonora. Publicada en el Diario Oficial de la Federación 20 de abril de 2015. www.gob.mx.
- Corwin, D. L.; S. M. Lesch, and D. B. Lobell. 2012. Laboratory and field measurements. pp 295-341. In W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.
- 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.
- Grieve, C.M., S.R. Grattan y E.V. Maas. 2012. Plant salt tolerance. pp 405-459. In W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.
- Hanson, B. R. and S. R. Grattan. 2012. Field sampling of soil, water, and plants. pp 275-293. In W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.



- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1997. Drenaje y salinidad en zonas áridas y semiáridas. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- 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, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kovda, V. A.; B. Yaron and Y. Shalhevet. 1973. Quality of irrigation water. In Irrigation, drainage and salinity. An international source book. Chapter 7. FAO/Unesco. Hutchinson, pp. 177-205. www.unesdoc.unesco.org
- Maas, E. V. 1990. [Crop Salt Tolerance. pp 262-304.](#) In Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71.
- Nikolskii, G. Iouri; O. Palacios Vélez; O. Bakhlaeva E. y A. Llerena V. 2011. El cambio climático, drenaje y salinidad. En Memorias del XVI Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán, Sinaloa, México, 6-9 de septiembre de 2011.
- Pulido, M. L., J. González Meraz, C. Fuentes Ruiz, M. Villarreal Pulido, R. Armendáriz Rubio y J. L. L. Medina Ruiz. 2001. Informe final del proyecto: Desarrollo y aplicación de una metodología para formular un plan director para el manejo y control de la salinidad en un distrito de riego. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), CNA (Comisión Nacional del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido, M. L.; J. G. Meraz y M. V. 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.
- 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.
- Pulido, M. L. 2018. Ensalitramiento de suelos, producción agrícola y calentamiento global. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor., 200 p.
- [Red agrometeorológica del estado de Sonora. \(2014\). www.agroson.org.mx.](#)
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No. 60. United States Department of Agriculture. www.ars.usda.gov.
- 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. 2012. Diagnosis of Salinity Problems and Selection of Control Practices: An overview. pp 27-55. In W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.
- Suarez, D.L. and W. J.J. Jurinak. 2012. The Chemistry of Salt-Affected Soils and Waters. pp 57-88. In W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.



- Salinas, P, J. A.; G. Colorado Ruiz y M. E. Maya Magaña. 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. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor.
- Shainberg I. 1990. Soil response to saline and sodic conditions. In Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 71.
- Tanji, K.K. and W. W. Wallender. 2012. Nature and Extent of Agricultural Salinity and Sodicty. pp 1-25. In W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.