

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <i>Título</i>               | Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora, México.   |
| <i>Autor / Adscripción</i>  | Leonardo Pulido Madrigal<br>Jorge González Meraz<br>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua<br><br>Mario Villarreal Pulido<br>Comisión Nacional del Agua, México  |
| <i>Publicación</i>          | Ingeniería Hidráulica en México, 24(1): 55-72   |
| <i>Fecha de publicación</i> | 2009  |
| <i>Resumen</i>              | La metodología para el manejo y control de la salinidad de los suelos consiste en cinco etapas: evaluación de las condiciones de salinidad, identificación de las causas que favorecen la salinización de los suelos, jerarquización de causas, aplicación de medidas correctivas y evaluación de los efectos de las medidas correctivas aplicadas. Se determinó que las causas que favorecen la salinidad son el material parental; la calidad del agua de riego; la fisiografía y topografía; el uso de métodos de riego ineficientes; las pérdidas de agua en la red de conducción; el deficiente mantenimiento de la red de drenaje; la ubicación y condiciones de descarga de drenes colectores, y la falta de capacitación a usuarios en el uso, manejo y conservación del agua de riego. |
| <i>Identificador</i>        | <a href="http://hdl.handle.net/123456789/1185">http://hdl.handle.net/123456789/1185</a>   |

# Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México

Leonardo Pulido-Madrigal  
Jorge González-Meraz

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Mario Villarreal-Pulido

Comisión Nacional del Agua, México

*La metodología para el manejo y control de la salinidad de los suelos consiste en cinco etapas: evaluación de las condiciones de salinidad, identificación de las causas que favorecen la salinización de los suelos, jerarquización de causas, aplicación de medidas correctivas y evaluación de los efectos de las medidas correctivas aplicadas. Se determinó que las causas que favorecen la salinidad son el material parental; la calidad del agua de riego; la fisiografía y topografía; el uso de métodos de riego ineficientes; las pérdidas de agua en la red de conducción; el deficiente mantenimiento de la red de drenaje; la ubicación y condiciones de descarga de drenes colectores, y la falta de capacitación a usuarios en el uso, manejo y conservación del agua de riego. En el estudio de caso se determinó que los factores más importantes son los métodos de riego ineficientes, las pérdidas de agua por conducción, las condiciones de topografía y la falta de capacitación de usuarios. La aplicación de la metodología permitió jerarquizar las causas de la salinidad.*

**Palabras clave:** salinidad de suelos, agricultura de riego, drenaje deficiente, calidad del agua, causas del ensalitramiento, jerarquización, efecto de la salinidad, producción de cosechas.

## Introducción

Existe un problema de salinidad cuando las sales se acumulan en la zona radical a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción de cosechas. El rendimiento de los cultivos disminuye cuando el contenido de sales en la solución del suelo es tal que no permite que éstos extraigan suficiente agua de la zona radical, provocando así un estado de escasez de agua en las plantas por un tiempo significativo (Ayers y Westcot, 1987).

Los problemas de salinidad que se presentan en las áreas agrícolas de la república mexicana son de gran importancia, pues se estima que cubren actualmente entre un 12 y 21% del área de los distritos de riego (DR)

(De la Peña, 2001; González, 2002); aunque estudios realizados con la aplicación de sensores remotos indican que las áreas afectadas pueden ser mayores (Pulido *et al.*, 1997, 2003 y 2007).

Para caracterizar la salinidad se han llevado a cabo estudios edafológicos, geológicos, freáticos y topográficos. Sin embargo, debe señalarse que estos estudios no han sido sistemáticos en el tiempo en ningún distrito de riego del país, ni han cubierto todo el espectro de factores relacionados con el problema. Tampoco se cuenta con una metodología que permita identificar, ordenar y jerarquizar las causas del ensalitramiento de los suelos, y establecer las medidas preventivas y correctivas.

Por tal motivo se elaboró la presente metodología para el manejo y control de la salinidad en un distrito de riego, la cual fue aplicada en el DR 038 Río Mayo.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) proponer una metodología para el manejo y control de la salinidad en un distrito de riego; 2) aplicar la metodología para determinar y jerarquizar las causas que favorecen la salinidad en un distrito de riego, y 3) proponer medidas correctivas para manejar los problemas de salinidad en el estudio de caso.

Un suelo se clasifica como salino cuando la conductividad eléctrica en el extracto de saturación en la zona radicular es  $> 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  (Richards, 1974). La salinización del suelo se ha identificado como el mayor proceso de degradación de la tierra. Las principales causas del decremento de la producción en muchos proyectos de riego, en particular en regiones áridas y semiáridas, o el fracaso en grandes superficies agrícolas de temporal, son la saturación del suelo por mal drenaje natural, salinización y sodificación. Se ha estimado, a partir de datos disponibles, que la humanidad está perdiendo por lo menos tres hectáreas de tierra cultivable cada minuto por causa del ensalitramiento (Mashali, 2000).

En las regiones áridas, el lavado es de naturaleza local y las sales solubles no pueden ser transportadas muy lejos. Esto ocurre no solamente porque hay menos precipitación adecuada para lavar y transportar las sales, sino también a consecuencia de la elevada evaporación característica de un clima árido, que tiende a concentrar las sales en los suelos y en el agua superficial (Richards, 1974). La fuente primaria de sales en suelos y aguas es la continua intemperización geoquímica de las rocas que forman el sustrato superior de la corteza continental de la Tierra. Los suelos afectados por sales son componentes naturales de los paisajes áridos. Su presencia se correlaciona directamente con una limitada precipitación; es decir, la evapotranspiración excede a la precipitación durante la mayor parte del año. El origen de la salinidad se debe a intemperismo, efectos del clima y paisaje, depósitos fósiles o secundarios, deposición atmosférica y actividades antropogénicas (Jurinak y Suárez, 1990). En términos generales, las causas potenciales o fuentes de excesos de sales incluyen agua de riego salina, drenaje inadecuado, sales del suelo nativas, y procesos continuos de inundación y evaporación de aguas (Rhoades, 1990).

## **Metodología**

Para el desarrollo de la metodología se revisaron publicaciones nacionales e internacionales que tratan

sobre el proceso de ensalitramiento de los suelos, así como del diagnóstico, prevención y control de la salinidad (Ayers y Westcot, 1987; De la Peña, 1979, 1982, 1993, 2001; Jurinak y Suárez, 1990; Martínez, 1986; Pratt y Suárez, 1990; Rhoades, 1990; Richards, 1974; Tanji, 1990). Se revisó información sobre experiencias llevadas a cabo para identificar fuentes del ensalitramiento de los suelos (Ortega y Velázquez, 1997; IMTA, 1997; González *et al.*, 1999); se analizaron informes sobre rehabilitación de suelos mediante prácticas agronómicas e ingenieriles (Namuche *et al.*, 2000; Inifap, 2001; Infante y Huaranga, 1999 y 2000), y se consultó información sobre estudios de salinidad, freaticimetría, edafología y de calidad del agua realizados en distritos de riego del noroeste del país, que es donde existe mayor cantidad de información al respecto (Uvalle y Osorio, 1996; Beltrán *et al.*, 1999; Paredes, 2001; Ortega, 1997; Planimex, Ingenieros Consultores, S.A., 1970).

También se consultaron especialistas en salinidad y drenaje, cuyo prestigio es ampliamente reconocido en nuestro país (Pulido, 2001), ya que algunos de ellos se dedican a la investigación en la materia y otros son empresarios dedicados al drenaje de tierras. También se incluyeron especialistas que tienen amplia experiencia en funciones técnicas y directivas en distritos de riego, y que han participado en el proceso de creación y desarrollo de los distritos de riego del país (Pulido, 2001).

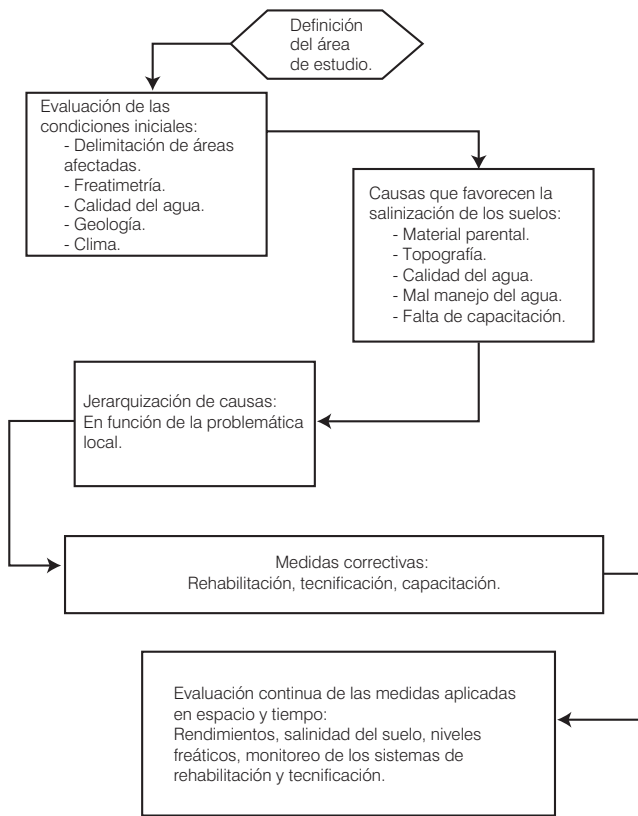
Para el análisis del estudio de caso se acudió a las oficinas del Distrito de Riego 038 Río Mayo y de la Sociedad de Responsabilidad Limitada (S. de R.L.), con la finalidad de recabar información cartográfica y documental histórica relacionada con salinidad y drenaje. Se tuvieron entrevistas con técnicos locales, los cuales se desempeñan en funciones de riego y drenaje de este distrito desde hace más de diez años, por lo que conocen adecuadamente la problemática respectiva. Las entrevistas permitieron profundizar en el conocimiento de los problemas de salinidad y drenaje, además de conocer sobre el desarrollo de programas y planes de rehabilitación de suelos.

En el modelo metodológico aplicado se contemplan cinco etapas (IMTA, 2001; Pulido, 2001), las cuales se resumen en la ilustración 1.

### *1. Evaluación de las condiciones actuales de salinidad*

La evaluación de las condiciones de salinidad es muy importante, porque permite saber la distribución geográfica de las áreas ensalitradas en un DR y conocer la magnitud de las afectaciones. Los resultados que se obtienen de las evaluaciones sirven para tomar decisiones sobre el mejor uso de las áreas afectadas

Ilustración 1. Etapas para la formulación de la metodología.



y para aplicar medidas para su recuperación. El conocimiento de las condiciones iniciales de salinidad se logra mediante la realización de estudios de salinidad, freaticimetría, de calidad química del agua de riego, y de la constitución mineralógica del subsuelo; con los resultados se elaboran mapas de salinidad, freaticimetría e isohypsas, y se elaboran gráficas de la calidad del agua y gráficas área-tiempo.

Las gráficas área-tiempo presentan los cambios en las superficies con distintos niveles freáticos a través del tiempo; se forman colocando los diferentes meses del año en el eje de las abscisas y las áreas resultantes de cada rango en el eje de las ordenadas; paralelamente debe formarse otra gráfica adjunta, donde se presentan las extracciones totales para riego y las precipitaciones mensuales en el tiempo. Los mapas de salinidad se deben elaborar cada seis años (también se sugiere una periodicidad de cuatro años, Craig, 2004), considerando diferentes profundidades del perfil del suelo. Los mapas de freaticimetría e isohypsas deben ser mensuales. Los estudios de calidad del agua se requieren hacer cada ciclo de cultivo. Las barrenaciones litológicas se deben llevar a cabo cada diez años. Las gráficas área-tiempo se obtienen cada mes.

La periodicidad en la realización de estos estudios es una recomendación de los especialistas que se consultaron y toma en cuenta el dinamismo con que se manifiestan los problemas de salinidad y drenaje, al igual que los costos, recursos humanos y materiales que se requieren para realizar los estudios. El costo por hectárea para obtener un mapa de salinidad mediante sensores remotos es de \$4.3 (Pulido *et al.*, 2007). Tales estudios y los mapas que de ellos se obtienen representan un costo económico que debe ser cubierto por el distrito de riego y por los usuarios a través de los módulos de riego, con apoyo financiero del gobierno federal. En distritos de riego, como en el 041 Río Yaqui y el 038 Río Mayo, se toman lecturas mensuales de la profundidad del manto freático en pozos de observación establecidos específicamente, y con las lecturas se obtienen mapas de isobatas e isohypsas.

## 2. Identificación de las causas de la salinización de los suelos

En esta parte de la metodología se señalan los factores que favorecen la salinidad de los suelos con la ayuda de toda la información disponible al respecto. Tales factores son: a) el material parental; b) la calidad del agua de riego; c) fisiografía y topografía; d) métodos de riego ineficientes; e) pérdidas de agua en la red de conducción; f) mantenimiento de la red de drenaje; g) ubicación y condiciones de descarga de drenes colectores; h) capacitación a usuarios en el uso, manejo y conservación del agua de riego, e i) balances hídricos y de sales.

### a) Material parental

Mediante estudios geológicos y edafológicos se determina la relación entre el material parental y las sales existentes, así como su distribución espacial. La presencia de capas duras en el subsuelo puede ser causa de un drenaje natural deficiente. La fuente primaria de sales en aguas y suelos es la intemperización química de los materiales terrestres, es decir minerales que son constituyentes de rocas y suelos (Tanji, 1990). Los minerales varían en su resistencia al intemperismo; algunos se intemperizan más rápido ( $10^3$  años), mientras que otros lo hacen relativamente más despacio ( $10^6$  años), incluso persistiendo a lo largo de varios ciclos de sedimentación. Sin embargo, el resultado de esos procesos se engloban en los productos solubles finales. Así, para definir el origen geológico de las sales solubles en un suelo y los procesos relacionados en la formación de los mismos,

se deben analizar tres aspectos fundamentales: la geología local, las principales sales solubles, y los estratos u horizontes endurecidos superficiales (<2 m).

#### b) Calidad del agua de riego

La calidad química del agua de riego puede ser utilizada para establecer una relación relativa causa-efecto con las áreas afectadas. Las sales se encuentran en cantidades relativamente pequeñas, pero significativas, y tienen su origen en la disolución o meteorización de las rocas y suelos, además de la disolución lenta de la caliza, yeso y otros minerales. Las sales son transportadas por las aguas de riego y depositadas en el suelo, en donde se acumulan a medida que el agua se evapora o es consumida por los cultivos (Ayers y Westcot, 1987). Los cationes más comunes en las aguas de riego son calcio, sodio, magnesio y potasio, y los aniones más comunes son cloruro, bicarbonato y sulfato. En casos especiales pueden presentarse nitratos, carbonatos y elementos menores.

#### c) Fisiografía y topografía

Se analiza conjuntamente la información de fisiografía y topografía, principalmente zonas bajas, depresiones o microcuencas cerradas. En climas áridos, los suelos se caracterizan por un movimiento lateral de los compuestos más solubles: las sales. La presencia de sales más solubles se da progresivamente hacia las partes más bajas del paisaje. Así, se encuentra carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), principalmente en las partes altas, pero hacia abajo aparecen sales más solubles en un orden acorde con su solubilidad, es decir, sulfatos de calcio (yeso) y sodio, mientras que los cloruros de calcio, magnesio y sodio aparecerán en las zonas bajas o de acumulación.

La capa freática poco profunda casi siempre guarda estrecha relación con la topografía del terreno. Debido a la baja precipitación en las regiones áridas, las corrientes del drenaje superficial están poco desarrolladas y, en consecuencia, existen depresiones sin drenaje por no tener salida a corrientes permanentes. El drenaje de las aguas con sales de las tierras arriba de la depresión puede elevar el nivel de la capa freática hasta la superficie en las tierras bajas, causar un flujo temporal o formar lagos salados permanentes. Bajo tales condiciones, el movimiento ascendente del agua subterránea o la evaporación del agua superficial da origen a la formación de suelos salinos (Richards, 1974).

#### d) Métodos de riego ineficientes

El método de riego que más se utiliza en los distritos de riego en México es el de gravedad, ya que se estima que aproximadamente el 85% de los 3 170 000 ha de riego de los 82 distritos existentes utilizan el riego por surcos, melgas, e inundación; comparativamente, se estima que aproximadamente 500 000 ha utilizan sistemas de riego presurizado (IMTA, 2001). En el riego por gravedad, las eficiencias de aplicación y conducción actuales son muy bajas (entre un 30 y un 70%), y no hay un sistema adecuado de medición de volúmenes distribuidos y aplicados. Con el uso de este método de riego es muy común la aplicación excesiva de agua, ocasionando altas pérdidas por percolación y las consecuentes fluctuaciones de los niveles freáticos en áreas con suelos con un drenaje natural pobre (generalmente en bajíos de terrenos mal nivelados o en zonas muy planas que no tienen salidas de desagüe natural). Estas fluctuaciones, aunadas a las altas tasas de evapotranspiración, han ocasionado que las sales solubles, que en un principio fueron lavadas de la superficie del suelo, se eleven y acumulen de nuevo en la superficie del suelo, pero ahora a mucha mayor concentración. El resultado final es la salinización de los suelos.

#### e) Pérdidas de agua en la red de conducción

Las filtraciones de agua de los canales son uno de los factores que contribuyen en mayor medida a la formación de mantos freáticos superficiales; es por ello que las eficiencias de conducción de agua son bajas, estimándose que para canales de tierra es de 70 a 80% (IMTA, 2001). La red de canales existentes en los distritos de riego es de 47 474 km. En las redes de conducción principales y secundarias se tienen pérdidas de agua considerables, ya que prácticamente la mitad de los canales existentes están sin revestir y solamente el 43% de los canales secundarios cuentan con algún tipo de revestimiento, la mayor parte del cual es de concreto (IMTA, 2001). Con la información de las eficiencias de aplicación y conducción se puede obtener el porcentaje de agua que se pierde por percolación y se correlaciona con las áreas afectadas por manto freático superficial y con los volúmenes de agua derivados para riego anualmente. Se elaboran mapas de la red de conducción hecha de concreto y de la red de canales de tierra, así como mapas de las condiciones de operación de la red de drenaje; estos mapas se comparan por medio de los sistemas de información geográficos (SIG) con los mapas de salinidad e isobatas para observar si hay áreas afectadas en el entorno de los canales y los drenes.



f) Mantenimiento de la red de drenaje

En los distritos de riego del país, la longitud de las redes de drenaje tanto principales como secundarios es de 21 380 km, de los cuales 6 278 km son drenes principales y 15 102 son drenes secundarios (IMTA, 2001). La falta de mantenimiento de la red de drenaje en los distritos de riego ha sido un problema constante desde que fueron creados los distritos de riego. Se estima que la falta de conservación de la red de drenaje da como resultado que su funcionamiento llega a reducirse más del 40%, y en algunos casos cambia su condición de drenaje para convertirse en una fuente recargable del nivel freático. Existe una estrecha relación entre la ubicación de parcelas afectadas por sales y los drenes que no funcionan adecuadamente por falta de conservación.

g) Ubicación y condiciones de descarga de drenes colectores

En los distritos de riego costeros uno de los factores causantes de formación de mantos freáticos elevados y de la salinización del suelo es la formación de azolve en la descarga de los drenes colectores hacia el mar. Los azolves evitan el flujo del agua hacia las bahías y se constituyen en barreras, por lo que particularmente en las partes de menor altitud de los distritos se crean condiciones para la salinización de los suelos. Se analiza las condiciones de descarga y ubicación de los drenes colectores para determinar si hay áreas afectadas en las proximidades de estos drenes.

h) Capacitación a usuarios en el uso, manejo y conservación del agua de riego

El ensalitramiento del suelo debido al mal manejo del agua y suelo por parte de los usuarios de estos recursos, y por deficiencias en la operación de los canales que ocasionan pérdidas de agua son las causas principales que dan origen a este problema. Actualmente, los distritos de riego son administrados, conservados y operados por asociaciones de usuarios, y los técnicos de los módulos de riego son quienes tienen la responsabilidad de medir el agua en los canales para entregarla a los usuarios; sin embargo, existen muchas deficiencias en la planeación de la entrega del agua y en la medición. En algunos casos, las estructuras de medición y aforo son insuficientes o están en mal estado. El agua se vende a los usuarios por superficie, previa estimación de la eficiencia de conducción para entregarla a la parcela, por lo que no hay un control estricto del volumen

entregado a cada usuario. Asimismo, no existe servicio de asistencia técnica, por lo que el agua se aplica según el criterio del regador. Se revisa la situación relacionada con la capacitación a usuarios en el uso, manejo y conservación del agua de riego.

i) Balances hídricos y de sales

La herramienta más poderosa para hacer un buen diagnóstico es el balance hídrico y salino del distrito de riego. En términos simples se trata de conocer las entradas y salidas de agua y sales en el área considerada, y su variación en el tiempo. El análisis de esta información y de las variaciones en el tiempo permite conocer la magnitud de las fuentes de alimentación y de los posibles obstáculos que reducen o impiden la salida de los excesos de agua. Las representaciones gráficas y las extrapolaciones de las tendencias detectadas permiten hacer pronósticos de lo que se puede esperar de no ocurrir cambios en las políticas de manejo del agua de riego (Palacios *et al.*, 1993). Para realizar este balance es necesario medir el agua de riego que se entrega al distrito, y mensualmente medir el agua en los drenes colectores, así como tomar una muestra de agua para el análisis de las 12 determinaciones señaladas en el inciso b).

*3. Jerarquización de las causas que favorecen la salinidad y el mal drenaje*

Se lleva a cabo un análisis semicuantitativo relacionando las causas con los efectos, los cuales incluyen sodicidad, manto freático elevado, bajos rendimientos de los cultivos, azolves en la red de drenaje, modificación de la sección hidráulica en los canales, bajas eficiencias de conducción y bajas eficiencias de aplicación. Para asignar un orden de importancia a las causas, es preciso considerar la problemática particular del área de estudio, por lo que se requiere contar con la participación de las autoridades y los técnicos locales. Se elabora una matriz donde la causa que esté relacionada con un mayor número de efectos será la de mayor importancia, y a la que se debe dar mayor atención en los programas de operación y conservación.

*4. Aplicación de medidas correctivas*

Las medidas que se pueden aplicar para corregir las causas que producen el ensalitramiento de los suelos pueden ser de tipo ingenieril, agronómico y de capacitación. Con las causas jerarquizadas, se elaboran programas anuales de trabajo, en donde se deberán

contemplar las medidas correctivas en el orden de atención definido.

#### 5. Evaluación de los efectos de las medidas correctivas aplicadas

En esta parte de la metodología se analiza el efecto que producen las acciones aplicadas, en términos de la disminución de áreas afectadas por salinidad y por manto freático superficial; se hace un análisis anual de los resultados logrados. Se elaboran mapas comparativos de salinidad e isobatas para señalar el avance obtenido; se obtienen gráficas del comportamiento del manto freático superficial en el tiempo. Con los mapas de salinidad e isobatas se elabora un SIG, en el que cada mapa constituye una capa; la sobreposición de éstas entre sí permite visualizar el efecto de las acciones aplicadas.

#### Aplicación de la metodología para el manejo y control de la salinidad, en el DR 038 Río Mayo

El DR 038 se ubica al sureste del estado de Sonora, México, y comprende parte de los municipios de Etchojoa, Huatabampo y Navojoa (ilustración 2). 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. 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, 1993).

#### Evaluación de las condiciones actuales de salinidad

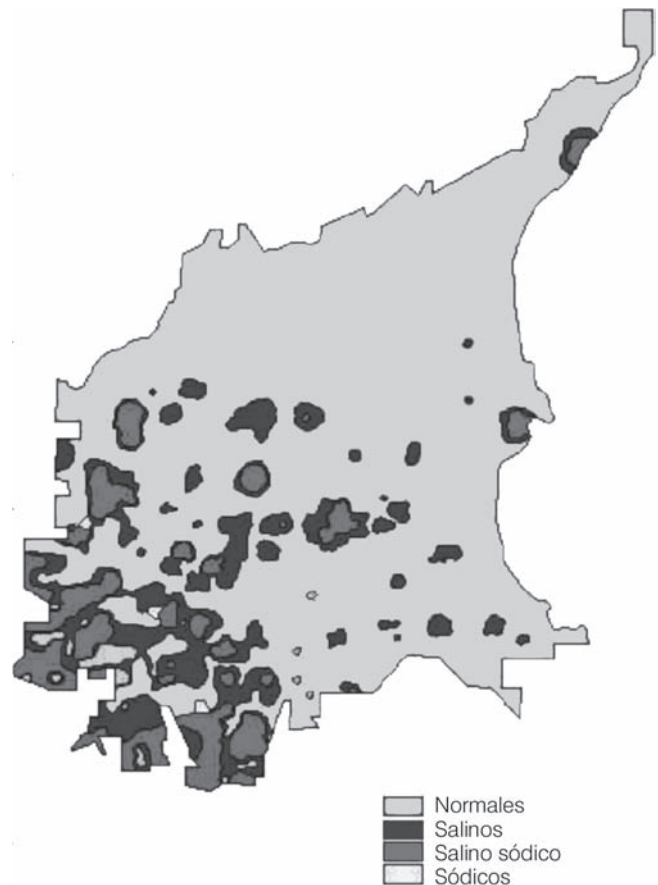
##### Estudios de salinidad

Desde 1971 se han venido realizando estudios de salinidad del suelo, para hacer un total de 11 estudios hasta el año 2001 (cuadro 1). En todos los casos, excepto 1996 y 2001, en los que se utilizaron imágenes de satélite y un sensor electromagnético, los estudios consistieron en la toma de muestras de suelo por estratos hasta una profundidad de entre 60 y 150 cm. Todos los mapas así generados muestran que las áreas con problemas de sales coinciden aproximadamente en la parte centro, sureste y suroeste del distrito (ilustración 3). Considerando el estrato de suelo de 0 a 30 cm, la superficie afectada por sales es de 25 578 ha en promedio, equivalentes al 22.7% de un total de 112 489 ha. De todos los estudios realizados, se encontraron variaciones del área afectada, por ejemplo en 1991 fue de 18 949 ha, y en 1977 de 32 275 hectáreas.

Ilustración 2. Ubicación del Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora.



Ilustración 3. Mapa de salinidad del año 1985 del Distrito de Riego 038 Río Mayo, profundidad de 0 a 30 cm.



**Cuadro 1. Estudios de salinidad analizada realizados en el Distrito de Riego 038 y determinación de áreas afectadas a diferentes profundidades.**

| Año       | Profundidad (cm) | Suelo normal (ha) | Suelo salino (ha) | Suelo salino-sódico (ha) | Suelo sódico (ha) | Total afectado (ha) |
|-----------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| 1971-1972 | 0-30             | 87 674.00         | 14 400.00         | 10 308.00                | 107.00            | 24 815.00           |
|           | 30-60            | 78 177.00         | 20 392.00         | 13 481.00                | 440.00            | 34 313.00           |
|           | 60-120           | 50 091.00         | 26 899.00         | 34 016.00                | 1 483.00          | 62 399.00           |
| 1972-1973 | 0-30             | 81 782.00         | 18 780.00         | 11 638.00                | 282.00            | 30 700.00           |
|           | 30-60            | 79 591.00         | 18 781.00         | 13 015.00                | 1 096.00          | 32 892.00           |
|           | 60-120           | 58 981.00         | 22 846.00         | 29 516.00                | 1 139.00          | 53 501.00           |
| 1973-1974 | 0-30             | 89 208.00         | 14 746.00         | 8 378.00                 | 150.00            | 23 274.00           |
|           | 30-60            | 84 537.00         | 16 016.00         | 11 235.00                | 694.00            | 27 945.00           |
|           | 60-120           | 62 331.00         | 24 864.00         | 24 912.00                | 375.00            | 50 151.00           |
| 1974-1975 | 0-30             | 87 569.00         | 17 272.00         | 7 171.00                 | 470.00            | 24 913.00           |
|           | 30-60            | 82 714.00         | 20 066.00         | 8 982.00                 | 720.00            | 29 768.00           |
|           | 60-120           | 63 205.00         | 32 285.00         | 16 872.00                | 120.00            | 49 277.00           |
| 1975-1976 | 0-30             | 85 881.00         | 20 525.00         | 5 826.00                 | 250.00            | 26 601.00           |
|           | 30-60            | 79 587.00         | 21 637.00         | 9 809.00                 | 1 463.00          | 32 909.00           |
|           | 60-120           | 33 851.00         | 61 019.00         | 16 285.00                | 1 336.00          | 78 640.00           |
| 1976-1977 | 0-30             | 80 216.00         | 24 617.0          | 6 636.00                 | 1 022.00          | 32 275.00           |
|           | 30-60            | 77 512.00         | 23 107.00         | 8 595.00                 | 3 286.00          | 34 988.00           |
|           | 60-120           | 56 500.00         | 33 560.00         | 17 920.00                | 4 511.00          | 55 991.00           |
| 1980      | 0-30             | 88 593.00         | 16 373.00         | 8 593.00                 | 442.00            | 25 408.00           |
|           | 30-60            | 77 179.00         | 20 160.00         | 14 022.00                | 2 639.00          | 36 821.00           |
|           | 60-90            | 75 235.00         | 21 625.00         | 13 687.00                | 3 453.00          | 38 765.00           |
|           | 90-120           | 66 354.00         | 26 340.00         | 17 606.00                | 3 700.00          | 47 646.00           |
| 1985      | 0-30             | 88 730.00         | 13 605.00         | 9 335.00                 | 330.00            | 23 270.00           |
|           | 30-60            | 92 900.00         | 10 680.00         | 9 820.00                 | 600.00            | 21 100.00           |
|           | 60-90            | 88 240.00         | 12 310.00         | 12 770.00                | 680.00            | 25 760.00           |
| 1990-1991 | 0-30             | 77 904.00         | 11 164.00         | 7 649.00                 | 136.00            | 18 949.00           |
|           | 30-60            | 30 058.00         | 17 613.00         | 11 447.00                | 669.00            | 29 729.00           |
|           | 60-90            | 17 608.00         | 5 055.00          | 4 767.00                 | 296.00            | 10 118.00           |
|           | 90-120           | 18 484.00         | 4 079.00          | 4 751.00                 | 412.00            | 9 242.00            |
|           | 120-150          | 17 617.00         | 4 540.00          | 5 158.00                 | 411.00            | 10 109.00           |
| 1996      | 0-60             | 58 597.00         | 62 180.00         | ----                     | ----              | 62 180.00           |
| 2001      | 0-60             | 97 449.00         | 25 306.00         | ----                     | ----              | 25 306.00           |

En 1996 se utilizaron imágenes de satélite y un sensor electromagnético EM-38 para cartografiar 120 777 ha, de las cuales se clasificaron 62 180 ha (51.5%) como salinas en el estrato de 0 a 60 cm (Pulido *et al.*, 1997 y 2003); la superficie resultó mayor porque se estudió la salinidad en el estrato de 0 a 60 cm, y las áreas afectadas fueron sobreestimadas por el uso del sensor EM, debido a que la densidad de muestreo fue baja y se extrapolaron áreas muy grandes que no pudieron ser cartografiadas con la imagen (ilustración

4). Años más tarde se obtuvo el mapa de salinidad de 122 754 ha utilizando el sensor electromagnético EM-38 y se reportaron 25 305 ha (20.6%) afectadas, en el estrato de 0 a 60 cm (Pulido *et al.*, 2007). La variación en el tiempo de las superficies afectadas puede ser un indicador de la relación entre la salinidad natural del suelo, y los factores de manejo del agua de riego y del suelo; por ejemplo, en 1960, en los albores del distrito de riego, se indica que de 92 851 ha, el 36.3% ya estaba ensalitrado (dato grabado en la placa de



creación del Distrito de Riego Río Mayo, Navojoa, Sonora).

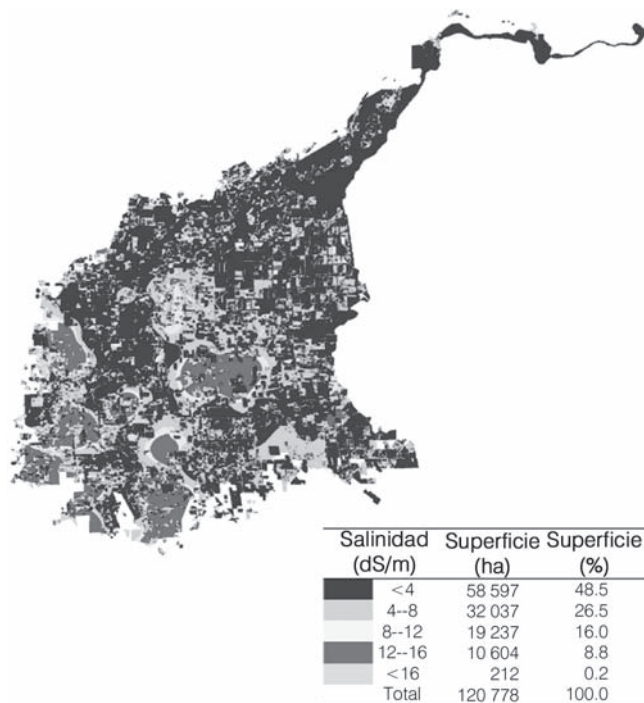
#### Estudios de freaticimetría

Los estudios de freaticimetría en el DR 038 empezaron a realizarse en 1962, midiendo la profundidad del nivel freático en forma mensual, con algunas interrupciones en cuanto a los meses observados, pero sin perder continuidad, hasta 1986. Posteriormente, se realizaron algunas mediciones en 1990, 1991 y 1993, y ya en forma continua a partir de 1997. La superficie anual promedio de afectación por manto freático superficial (< 1.5 m) fue de poco más de 6 000 ha durante 1965, 1975 y 1980; en 1985 resultó cercana a 30 000 ha, cinco veces mayor (cuadro 2) que en aquellos tres años, lo cual está asociado con un mayor uso de agua de riego en el distrito, ya que en 1975 se extrajeron para riego de la presa Adolfo Ruiz Cortines y del bombeo de pozos profundos,

715.54 millones de m<sup>3</sup>, en 1980, 694.87 millones de m<sup>3</sup>, y en 1985 se utilizaron 1 254.92 millones de m<sup>3</sup>; asimismo, en 1997, el área promedio afectada fue de 17 141 ha y se extrajeron 937.21 millones de m<sup>3</sup>; mientras que en el año 2000, en que hubo menor disponibilidad de agua por problemas de sequía, se reportaron 7 701 ha y se utilizaron 745.92 millones de m<sup>3</sup> de agua de riego. Las áreas más afectadas se localizan en la parte centro y sur del distrito de riego (ilustración 5), lo cual coincide con las áreas definidas en la ilustración 4.

La superficie afectada por salinidad de las aguas freáticas alcanza aproximadamente 23 560 ha, que equivalen a 22% de la superficie de riego del distrito; el agua freática tiene una concentración media de SDT de más de 4 000 mg·l<sup>-1</sup> y se localiza en la parte de menor altitud del distrito, por abajo de la cota 11 msnm, principalmente en los módulos aledaños a la costa. Este porcentaje se aproxima al de la superficie promedio ensalitrada, que es de 26 000 ha, por lo que se supone que hay una relación entre la superficie con manto freático superficial y la superficie ensalitrada.

**Ilustración 4. Mapa de salinidad del Distrito de Riego 038 Río Mayo obtenido mediante sensores remotos de la profundidad de 0 a 60 cm.**



Mapa de salinidad obtenido a partir de imágenes de satélite Landsat TM del 23 de febrero y 14 de julio de 1996, y de mediciones con el sensor electromagnético EM-38.

Escala 1:85 000

#### Elaboración de gráficas área-tiempo

Se elaboraron gráficas área-tiempo desde mediados de 1962 hasta mediados de 1986, con el propósito de visualizar las variaciones de las superficies afectadas por el manto freático superficial. Se observó que hubo un aumento de las superficies con manto freático entre 0 y 1.5 m de profundidad, y de las aportaciones de agua, de lo que se confirmó la existencia de una relación entre la presencia de un manto freático elevado y el incremento de volúmenes de agua de riego (ilustraciones 6 y 7). Durante el mismo periodo, en particular de 1983 a 1986, los volúmenes extraídos de la presa fueron de los más altos históricamente, y es cuando se observaron las mayores áreas con manto freático entre 0 y 1.5 m.

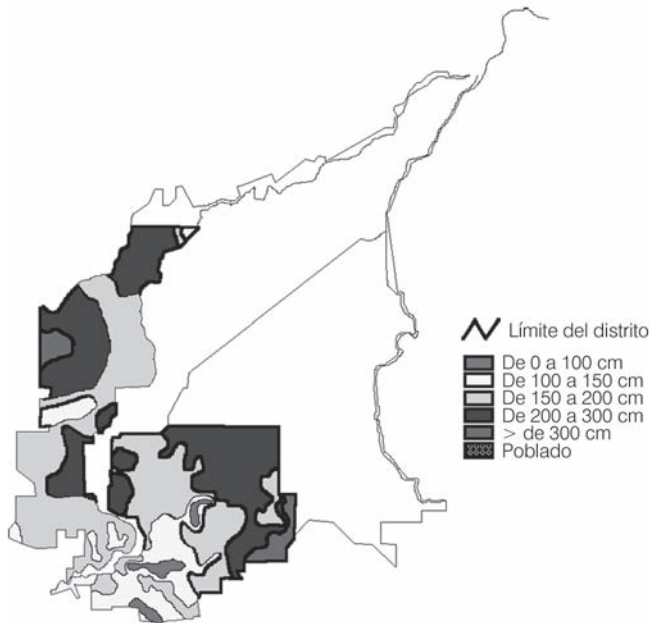
#### Mapa de isohypsas

En el DR 038 no se han elaborado mapas de este tipo en forma periódica. Sin embargo, al sobreponer los mapas de isobatas y de topografía, se ha observado que las líneas de corrientes que se obtienen muestran dos flujos predominantes: uno que parte de la zona noreste del valle originado a partir de escurrimientos subsuperficiales del canal principal margen derecha; y otro flujo predominante y con mayor intensidad que parte de la zona noroeste del valle, y se bifurca en una zona de suelos ligeros sobre el cauce del río Mayo, y en una zona baja en la parte central del distrito para

**Cuadro 2. Variación de la superficie con nivel freático de 0-1.5 m de profundidad.**

| Mes          | Años observados y superficie con manto freático < 1.5 m de profundidad (miles de ha) |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |              |              |              |              |             |
|--------------|--|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
|              | 1965   | 1970        | 1971        | 1972         | 1973        | 1974        | 1975        | 1976        | 1977        | 1978        | 1979        | 1980        | 1985         | 1997         | 1998         | 1999         | 2000        |
| Ene.         | 4.89   | 7.23        | 5.49        | 11.2         | 13.26       | 11.54       | 15.29       | 7.73        | 16.59       | 9.99        |             | 8.61        | 36.83        | 29.82        | 22.55        | 17.87        | 12.26       |
| Feb.         | 10.17  |             | 7.13        | 8.54         | 15.07       | 12.13       | 10.31       | 9.31        |             | 13.49       | 8.23        | 13.42       | 9.03         | 29.82        | 24.34        | 20.10        | 15.20       |
| Mar.         | 8.54   | 8.36        | 5.89        | 7.66         | 10.82       | 14.66       | 10.41       | 10.2        |             | 17.38       | 5.57        | 12.01       | 41.43        | 32.07        | 26.23        | 21.31        | 18.90       |
| Abr.         | 10.52  | 4.2         | 3.89        | 6.56         | 6.72        | 8.67        | 6.02        | 2.09        | 4.94        |             | 4.22        |             | 41.34        | 24.13        | 19.83        | 9.96         | 11.75       |
| May.         | 4.78   | 4.83        | 3.56        | 5.88         | 5.6         | 4.84        | 2.37        | 1.23        |             | 7.83        | 6.42        | 1.03        | 36.49        | 11.22        | 7.32         | 11.36        | 7.88        |
| Jun.         | 4.44   | 4.42        | 3.6         | 6.5          | 6.35        | 3.7         | 1.81        | 0.21        |             | 3.16        | 2.03        | 1.2         | 20           | 7.33         | 2.78         | 17.33        | 5.27        |
| Júl.         | 3.57   | 2.73        | 2.35        | 9.05         | 6.21        | 4.6         | 3.92        | 0.46        | 2.07        | 1.47        |             | 1.69        | 27.5         | 4.23         | 1.65         | 17.87        | 0.88        |
| Agos.        |  | 1.7         | 4.03        | 19.95        | 6.77        | 3.1         | 3.69        | 5.41        |             | 0.83        | 3.77        |             | 23.3         | 4.98         | 2.76         |              | 0.23        |
| Sep.         |  |             | 1.86        | 15.28        | 5.41        | 4.35        | 5.66        | 9.07        |             | 1.35        | 8.03        | 4.62        |              | 12.75        | 5.79         | 0.32         |             |
| Oct.         | 5.28   | 1.51        | 3.12        | 14.04        | 4.71        | 3.89        | 3.27        | 23.23       | 4.21        | 3.32        |             |             |              | 9.07         | 5.96         | 0.13         | 2.37        |
| Nov.         | 7.35   | 1.79        | 4.12        | 15.79        | 7.65        | 4.62        | 5.63        | 16.59       |             | 1.94        | 3.12        | 6.65        |              | 16.82        | 11.28        | 1.69         | 4.76        |
| Dic.         | 4.35   | 3.04        | 8.4         | 11.79        | 8.76        | 5.35        | 4.35        |             | 6.53        | 6.57        | 4.78        |             | 34.06        | 23.44        | 17.01        | 4.76         | 5.20        |
| <b>Prom.</b> | <b>6.39</b>  | <b>3.98</b> | <b>4.45</b> | <b>11.02</b> | <b>8.11</b> | <b>6.79</b> | <b>6.06</b> | <b>7.78</b> | <b>6.87</b> | <b>6.12</b> | <b>5.13</b> | <b>6.15</b> | <b>30.00</b> | <b>17.14</b> | <b>12.29</b> | <b>11.15</b> | <b>7.70</b> |

**Ilustración 5. Mapa de isobatas de marzo de 1967. Distrito de riego núm. 038 Río Mayo; plano general; plano de zonas con iguales profundidades de capa freática referidas al terreno natural.**



descargar en forma conjunta hacia el mar en el Golfo de California, en dirección suroeste (IMTA, 1997).

#### Calidad del agua

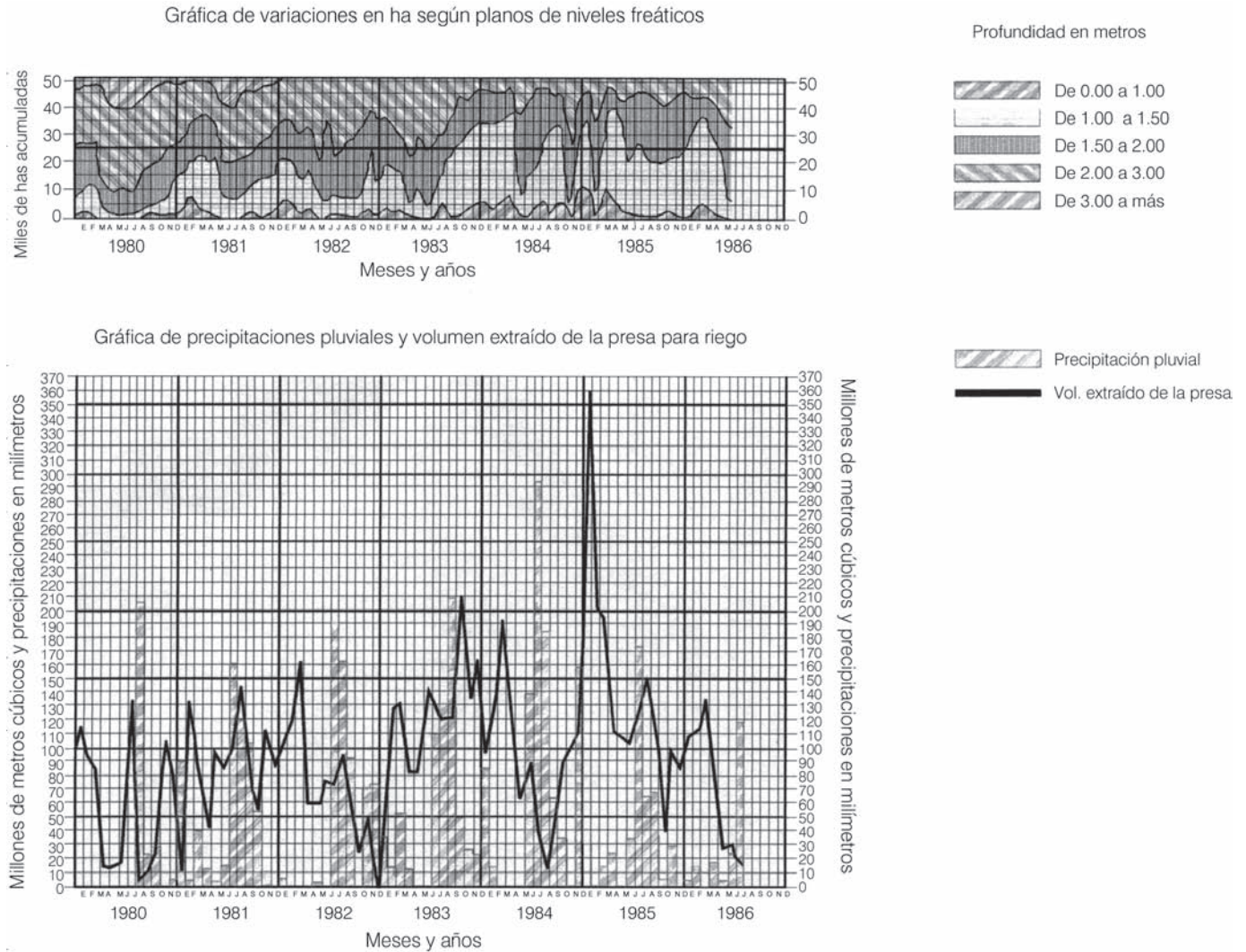
Los análisis de la calidad del agua efectuados en diferentes años permiten saber que el agua de la presa posee una calidad aceptable, presentando

una concentración media de sólidos disueltos totales (SDT) de 192 mg·l<sup>-1</sup>. Sin embargo, a medida que el agua avanza aguas abajo, su concentración salina aumenta debido a la mezcla con agua de los pozos, muchos de los cuales tienen una mayor concentración de SDT; al respecto, se ha cuantificado que el agua mezclada presenta una concentración de SDT que varía de 250 a 750 mg·l<sup>-1</sup>. En el análisis del agua de 62 pozos de bombeo ubicados principalmente sobre las márgenes derecha e izquierda del río Mayo, en las zonas central y baja del DR, se determinó que todos los pozos presentaban salinidad, pero que el 83.4% no representaba peligro de sodio, y el 53.2% de los pozos tenía más de 750 mg·l<sup>-1</sup>. Los pozos con agua más salina se ubican en las zonas central y baja del DR; esta agua, al mezclarla con la de los canales, se utiliza en la parte baja del DR, que es donde existen los mayores problemas de salinidad del suelo y de manto freático elevado (Uvalle y Osorio, 1996).

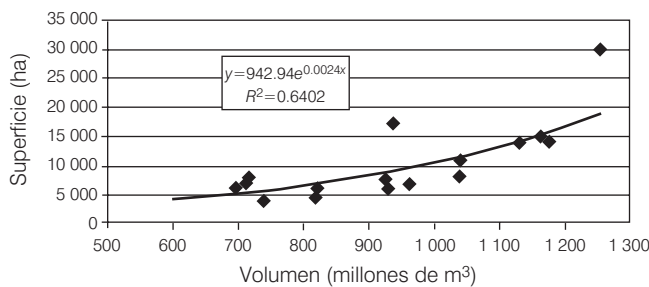
#### Barrenaciones litológicas

El subsuelo del distrito está formado por sedimento no consolidado de varios tamaños de grano (grava, arena, limo y arcilla) y por basaltos interestratificados. Las capas basálticas fueron encontradas en varios de los pozos a diferentes profundidades, debajo de 170 m. Los estratos hallados son depósitos clásticos, pero los pozos profundos perforados prueban que el basalto no debe considerarse como la base sólida del relleno clástico del vaso, sino como una inter-estratificación dentro de la secuencia de los depósitos clásticos. La presencia de capas basálticas en varios pozos de exploración profundos demuestra una actividad

**Ilustración 6. Gráfica área-tiempo del periodo 1980-1986. Distrito de Desarrollo Rural 149-Navojoa, Oficina de Ingeniería de Riego y Drenaje.**



**Ilustración 7. Relación entre la superficie con manto freático superficial (<1.5 m de profundidad, promedio anual) y la extracción de agua para riego en el periodo 1970-2000.**



volcánica en el área, contemporánea con la formación de la llanura del delta. La acumulación de material volcánico en varios lugares de la superficie influyó el curso del río y el régimen de la sedimentación (Planimex, Ingenieros Consultores, S.A., 1970). En los suelos salinos del distrito se tienen formaciones de costras salinas, tales como costras salinas de caliza, costras yesíferas y costras salinas de diferentes tipos de sales, como astrakanita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), glauberita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ ), mirabilita-tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), trona ( $\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), berqueita ( $2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$ ), glazerita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{K}_2\text{SO}_4$ ), bishofita ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ),



shenita ( $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O \cdot MgCl_2 \cdot 12H_2O$ ) y carnalita ( $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O \cdot MgCO_3 \cdot 6H_2O$ ) (Ortega, 1997).

#### Identificación de las causas que favorecen la salinización de los suelos

##### Material parental

La formación de los suelos del DR 038 se debe a los depósitos aluviales continentales acumulados en estratificaciones alternadas de arenas, limos y arcillas, de tal manera que la formación del valle conlleva a la aparición sucesiva de sistemas lagunares salinos en las llanuras del delta y, a la vez, a la formación de estratos evaporíticos. La acumulación de sales en los diferentes suelos del valle ocurre en condiciones hidromórficas debido a la presencia de las aguas freáticas. En estas condiciones, la acumulación de sales en los espesores superficiales de los suelos se debe a que la profundidad de los niveles freáticos está en los límites de la franja de humedad derivada de los procesos de ascensión capilar (Ortega, 1997). Los sedimentos acarreados al mar fueron afectados por corrientes a lo largo de la playa y se formaron barras de arena. Su crecimiento gradual produjo la formación de lagunas, como la zona actual conocida como laguna de Sebampo, ubicada en el centro-sur del distrito. Éstas, en muchos casos, quedaron cerradas al mar y se transformaron en lagos de playa salina (Planimex, Ingenieros Consultores, S.A., 1970).

##### Calidad del agua de riego

En el ciclo agrícola 1998-1999, la clasificación de la calidad del agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines fue C1S1 (bajo peligro de salinidad y sodio), y la de los pozos resultó como C3S1 (peligro de salinidad alto y bajo peligro de sodio). Durante parte de la época de bombeo (octubre a abril) se mezclaron las aguas del acuífero, extraída de varios pozos profundos y de la presa; en este caso, la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) resultante en el agua alcanzó hasta  $640 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , y fue clasificada como C2S1 (peligro de salinidad medio y bajo peligro de sodio); sin embargo, en los meses de nula aportación de agua de la presa (mayo a septiembre), la concentración de SDT fue de  $960 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , y el agua se clasificó por sales y por sodio como C3S2 (peligro de salinidad alto y peligro de sodio medio); en el mes de mayo, la concentración de SDT alcanzó  $1\,229 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , y fue clasificada como C3S1 (Beltrán *et al.*, 1999).

Se evaluó el impacto de la calidad del agua sobre el suelo y el rendimiento de algunos cultivos, y se observó

que en el trigo se tuvo un decremento de la producción de grano de una  $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  cuando la concentración de SDT en el agua de riego aumentó de 400 a  $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . El efecto de la calidad del agua sobre el suelo fue la elevación de los valores de conductividad eléctrica de  $7.5$  a  $10.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ , y de por ciento de sodio intercambiable (PSI) de 8.8 a 11.9%. Un comportamiento similar se observó en los cultivos de frijol y melón (Beltrán *et al.*, 1999).

##### Fisiografía y topografía

La existencia del río Mayo ha ocasionado la formación de una llanura aluvial. En la fisiografía del distrito de riego se distinguen tres tramos en el abanico aluvial: una parte alta con suelos de textura más gruesa, una baja con texturas finas y una intermedia. Hidrológicamente, el tramo alto es una zona de recarga, donde el nivel freático es profundo; la parte media es una zona de transmisión de agua, y el tramo bajo tiene una capa freática superficial que ocasiona problemas de drenaje y salinidad (Martínez, 1986).

La topografía en el distrito de riego es plana desde el punto de vista agrícola; la pendiente general es de aproximadamente 2 m por km, con rumbo al poniente, abatiéndose a medida que se aproxima a la costa. Las pérdidas de agua debidas a filtraciones en los canales ubicados en la parte de mayor altitud, como son las cotas 15 m o mayores, y la percolación del agua de riego desde las parcelas ubicadas en esta porción del distrito, se reflejan en los altos niveles freáticos que se encuentran en los módulos de riego costeros, con elevaciones de entre 5 y 10 msnm (IMTA, 1997). En estos módulos, la topografía es más plana que en el resto del distrito, y son los más afectados por salinidad y manto freático superficial; en las áreas ubicadas abajo de la cota 5, el drenaje superficial y subterráneo es más lento, por lo que se acumula agua y se propicia el ensalitramiento del suelo. La falta de nivelación de tierras es una de las principales causas de que se desperdicie agua de riego, ya que en la mayoría de la superficie de riego se utilizan métodos de gravedad; no existe información precisa de la superficie de terreno que requiere nivelación, ya que no se han realizado estudios específicos.

##### Métodos de riego ineficientes

Al comenzar el desarrollo de todo proyecto de irrigación, casi siempre el agua es abundante y hay una tendencia a usarla en exceso, lo cual acelera la elevación de la capa freática. Las aguas para riego pueden contener

de 0.1 a 5 toneladas de sal por hectárea en una lámina de 30 cm de agua, y la aplicación anual de ésta puede llegar hasta 1.5 m o más. De esta manera, en periodos de tiempo relativamente cortos, pueden agregarse a los suelos cantidades considerables de sales solubles. Cuando la capa freática se eleva hasta 1.5 o 1.8 m de la superficie del suelo, el agua subterránea se mueve hacia arriba, llegando a la zona radical del cultivo y a la superficie del suelo; en tales condiciones, el agua del suelo y la de riego contribuyen a la salinización del suelo (Richards, 1974).

En las zonas áridas en condiciones naturales, como es el caso del Distrito de Riego 038 Río Mayo, excepcionalmente se presentan problemas de drenaje por contar con una precipitación menor que la evapotranspiración. Al convertirse en zona de riego, la frecuencia e intensidad de las aplicaciones del agua cambian el régimen de humedad de los suelos, acumulando la humedad que no alcanza a consumirse por evapotranspiración. Por otra parte, en zonas de riego proyectadas, diseñadas y construidas cuidadosamente, al ser operadas difícilmente alcanzan eficiencias globales mayores del 60%, lo que significa que aproximadamente la mitad del agua de riego que no es utilizada por las plantas se infiltra y ocasiona que los estratos transmisores no sean lo suficientemente capaces como para desalojarla con la rapidez requerida, provocando una elevación del manto freático, y si el agua presenta fuertes contenidos de sales, causa problemas de salinidad que afectan la zona radicular de los cultivos (De la Peña, 1979).

De las 96 951 ha empadronadas en el DR 038, en el 96.5% se utiliza riego por gravedad, y únicamente en el 4.5% se usa riego presurizado, por lo que se considera que uno de los principales problemas de formación de manto freático superficial se deba a la percolación del agua de exceso, producida por las altas láminas que se aplican a los cultivos. Durante los ciclos 1968-1969 hasta 1990-1991, la eficiencia promedio estimada de aplicación del agua en el nivel parcelario fue de 62.8%; en el periodo 1994-1995 hasta 2003-2004, la eficiencia media de aplicación fue de 57.15% (CNA, 2005), lo que indica que más del 40% del agua que se aplica en las parcelas se pierde por percolación.

#### Pérdidas de agua en la red de conducción

La red de conducción del distrito de riego está formada por 290.29 km de canales principales y 965.42 km de canales secundarios, lo que hace un total de 1 255.71 km. Las eficiencias medias de conducción reportadas desde el ciclo de siembra 1968-1969 hasta el ciclo

1990-1991 son de 81.8% para la red mayor y de 78.6% para la red menor; en un periodo más reciente de diez años (del ciclo 1994-1995 al ciclo 2003-2004), las eficiencias medias de conducción de las redes mayor y menor fueron de 82.22 y 74.44%, respectivamente; estas cifras muestran que aproximadamente el 20% del agua que se conduce por canales se infiltra. En la red mayor, el 20.27% de los 290.29 km de canales están revestidos de concreto. En la red menor, 175.57 km de canales (18.17%) están revestidos de concreto (CNA, 2005). Se deben revestir 112.3 km de canales de red mayor (10.5 km a corto plazo) y 528.31 km de canales de red menor (147.03 km a corto plazo), así como un gran total de 746 estructuras de medición y control (CNA, 2005).

#### Mantenimiento de la red de drenaje

La red de drenaje total del distrito suma 809.18 km. La densidad de drenaje existente es de 120 ha·km<sup>-1</sup>, la cual es inferior a la de otros distritos de riego del noroeste de la república (González, 2002), como el Río Yaqui (91.2 ha·km<sup>-1</sup>) y el Río Fuerte (87.1 ha·km<sup>-1</sup>) por lo que se necesita estudiar si la red es suficiente, además de que se requiere dar más y mejor mantenimiento y conservación a la red de drenaje. El porcentaje de drenes que anualmente reciben conservación es del 60% de la longitud total, que es insuficiente para permitir en forma adecuada el flujo del agua freática interceptada y del agua de riego excedente.

#### Condiciones de descarga de drenes colectores

En la parte baja del distrito, cercana a la costa, la topografía es más plana y dificulta la descarga de los drenes colectores hacia los cuerpos receptores, que en este caso son el estero de Moroncarit y la Bahía de Yavaros. Además, se observó que los drenes tienen problemas de reducción de su capacidad de conducción, debido a su deficiente conservación. El mal funcionamiento de estos drenes es un causante de los problemas de salinidad y manto freático superficial en las áreas localizadas por abajo de la cota 5.

#### Capacitación a usuarios en el uso, manejo y conservación del agua de riego

No existen programas estructurados de capacitación para técnicos locales (módulos de riego, S. de R.L. y CNA), ni asistencia técnica para usuarios. Las instituciones oficiales del sector tienen un papel limitado en relación con la asistencia técnica y capacitación.



### Balances hídricos

En el DR no se han hecho balances de sales a lo largo de su existencia. Con datos de los años 1997 y 2000 se realizó un balance hídrico. En los años de 1997 y 2000 se llevó a cabo un registro mensual de los volúmenes de agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines y de los pozos de bombeo, que fueron entregados en la presa derivadora Tesia. Asimismo, se midieron los escurrimientos de los drenes principales. Así, en 1997 se derivaron 937.212 millones de m<sup>3</sup>. Se sembraron 95 479 ha de diferentes cultivos y considerando que el volumen escurrido cuantificado en los drenes principales fue de 158.995 millones de m<sup>3</sup>, entonces, por diferencia del agua que entra con el agua evapotranspirada y del volumen escurrido, el volumen que se estima se infiltró fue de 319.918 millones de m<sup>3</sup>. En 2000, un año con menor disponibilidad de agua, ya que se derivaron 745.922 millones de m<sup>3</sup>, se sembraron 78 847 ha; el volumen escurrido fue de 72.932 millones de m<sup>3</sup>, por lo que se estimó un menor volumen infiltrado, de 294.525 millones de m<sup>3</sup>, que representa 25.393 millones de m<sup>3</sup> menos, en comparación con el volumen infiltrado estimado del

año de 1997. De acuerdo con estos resultados se puede inferir que el origen de los mantos freáticos superficiales y por lo tanto de buena parte de la salinidad del suelo se deben a las aportaciones de agua de riego que filtran a través de la red de canales y al agua de percolación del riego en las parcelas.

### Jerarquización de las causas que favorecen la salinidad y el mal drenaje

Para determinar cuáles son las causas más importantes, es necesario considerar los efectos nocivos adicionales que cada una de ellas produce, como bajos rendimientos, azolve de la red de drenaje, alteración de la sección hidráulica de canales de tierra y bajas eficiencia de conducción y aplicación.

El criterio que se establece para llevar a cabo una jerarquización de causas tiene como base asignar un mayor orden de importancia a aquellas que están relacionadas con una mayor cantidad de efectos.

El cuadro 3 sirve de base para realizar un análisis semi-cuantitativo que permite visualizar cuáles causas se relacionan con los efectos antes mencionados.

**Cuadro 3. Jerarquización de las causas de la salinidad y manto freático superficial en el Distrito de Riego 038 Río Mayo.**

| Causa   | Efecto    |           |                        |                    |                           |   |                               |                               | Total |
|---|-----------|-----------|------------------------|--------------------|---------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|-------|
|   | Salinidad | Sodicidad | Manto freático elevado | Bajos rendimientos | Azolves en red de drenaje | Modificación de sección hidráulica en canales | Baja eficiencia de conducción | Baja eficiencia de aplicación |       |
| Material parental                             | X         | X         |                        |                    |                           |   |                               |                               | 2     |
| Calidad del agua de riego                     | X         | X         |                        | X                  |                           |   |                               |                               | 3     |
| Fisiografía y topografía                      |           |           | X                      |                    | X                         |   | X                             | X                             | 4     |
| Métodos de riego ineficientes                 | X         | X         | X                      | X                  | X                         |   |                               | X                             | 6     |
| Pérdidas de agua en la red de conducción      | X         | X         | X                      |                    |                           | X   | X                             |                               | 5     |
| Mantenimiento deficiente de la red de drenaje | X         | X         | X                      | X                  | X                         | X   |                               |                               | 6     |
| Ubicación y condiciones de descarga de drenes | X         | X         | X                      |                    | X                         |   |                               |                               | 4     |
| Capacitación a usuarios                       | X         | X         | X                      | X                  |                           |   |                               | X                             | 5     |

Este análisis debe hacerse con la mayor participación posible de los técnicos locales. Para cada una de las causas se definen sus correspondientes efectos, y se coloca una "X" en los espacios que cruzan la fila y columnas identificadas positivamente. Las causas que presenten la mayor cantidad de efectos relacionados serán las que mayor peso tengan en la incidencia de problemas de salinidad y manto freático superficial.

De acuerdo con este análisis, las causas de la salinidad y del manto freático superficial en el DR 038 que obtuvieron mayor puntaje (seis) son los métodos de riego ineficientes y el mantenimiento deficiente de la red de drenaje; en segundo término, con cinco puntos, están las pérdidas de agua por conducción y la falta de capacitación de usuarios, y con cuatro puntos se tienen las condiciones de topografía, ubicación y condiciones de descarga de la red de drenaje; las menores puntuaciones fueron para calidad del agua de riego y material parental.

#### *Aplicación de medidas correctivas*

##### Capacitación de técnicos y usuarios

Actualmente no se efectúan actividades de capacitación y asistencia técnica a los usuarios, sin embargo, en el plan director para este distrito se propone un programa estructurado de capacitación a corto plazo para el personal técnico, directivo y administrativo (CNA, 2005).

##### Tecnificación del riego

Existe una superficie de alrededor del 12% que tiene necesidades de nivelación. Desde el año 2001 se han venido realizando acciones para instalar riego presurizado a través del Programa de Rehabilitación y Modernización de la Infraestructura (PRYM) implementado por la Conagua, el cual opera con un 50% del costo con cargo al usuario y el restante 50% con cargo al gobierno federal, a través del mencionado programa. Este programa incluye, además de la tecnificación del riego, el revestimiento de canales (incluyendo estructuras) y el drenaje parcelario.

##### Revestimiento de canales

En el plan director del distrito se propone el revestimiento con concreto de 112.3 km de canales de red mayor (10.5 km a corto plazo) y de 528.3 km de canales de red menor (147.0 km a corto plazo), abarcando los 16 módulos de riego que comprende el distrito, aunque el ritmo de

inversiones dependerá de la capacidad financiera de cada asociación civil (CNA, 2005).

##### Conservación de la red de drenaje y construcción de obra complementaria

La conservación anual de la red de drenaje del distrito ha sido insuficiente, ya que, hasta antes del ciclo 2003-2004, se estimaba que el estado de conservación de la red de drenaje era considerado como malo en un 87%, regular en un 9% y bueno en un 4%. Sin embargo, durante el ciclo 2004-2005 se realizaron obras de conservación en alrededor de 500 km de la red de drenaje, revirtiendo así la situación para tener en buen estado el 67% de la red (CNA, 2005). El cumplimiento en tiempo y forma del programa anual de conservación debe ser suficiente para la buena conservación de la red, pero desafortunadamente existe rezago al respecto.

##### Ajuste del patrón de cultivos

Desde el comienzo de la década de los noventa se ha observado una modificación en el patrón de cultivos, que se relaciona más con la sequía y con factores de mercado de las cosechas, que por problemas de salinidad *per se*. Esto se debe a que las suelos salinos se ubican en áreas muy localizadas, que requieren de una atención especial, lo cual, a su vez, está en función de las necesidades de los usuarios afectados. Cultivos tolerantes a la deficiencia de humedad (efecto inmediato de la salinidad), como cártamo, garbanzo y algunas variedades forrajeras han sido sembrados en mayor superficie desde mediados de la década de los noventa. Se requiere mayor investigación y apoyo para trabajar en la productividad de suelos salinos.

##### Cambio de uso del suelo

Aunque esporádicas, existen experiencias favorables en el DR 038 derivadas de investigaciones llevadas a cabo por el Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste (Ciano, Inifap), para la producción de forraje en suelos afectados por sales. Además de que se logran producciones aceptables de forraje, los niveles de salinidad y sodicidad disminuyen por efecto tanto de la evapotranspiración, ya que las plantas extraen sales para su crecimiento y desarrollo, como de la cobertura que las plantas proporcionan a los suelos (Inifap, 2001).

##### Instalación de drenaje parcelario

Hasta el año 2005 se habían instalado 4 851 ha con drenaje parcelario en el DR 038. Aunque el costo por

hectáreas de aproximadamente \$15000.00 (Ing. Rodolfo Namuche Vargas, IMTA, comunicación personal, 2007), los beneficios del drenaje parcelario son contundentes, habiendo casos de parcelas improductivas que en el ciclo inmediato posterior a la instalación del sistema producen arriba del rendimiento medio (Infante y Huaranga, 1999 y 2000), por lo que se considera que esta medida es una solución factible, siempre y cuando el usuario pueda sufragar la inversión.

#### Mezcla de las aguas de pozos y de la presa

En general, la mezcla de las aguas de pozos con la de la presa es una medida que ha dado buenos resultados para disminuir la concentración de sales del agua de los pozos que tienen altos niveles de SDT. El agua para riego de la presa no presenta problemas en cuanto a su calidad química, pero al mezclarla con el agua de algunos pozos profundos la calidad cambia, ya que su conductividad eléctrica aumenta. La S. de R.L. monitorea mensualmente la calidad del agua resultante, de tal forma que no se rebase la concentración considerada como restrictiva para los cultivos de  $>450 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (Ayers y Westcot, 1987). En los años de sequía en los que no hay disponibilidad del agua de la presa para los cultivos del ciclo de primavera-verano, como durante el periodo 1987-2002, la única fuente de agua para riego es la que se extrae de los pozos profundos existentes en el acuífero del DR. Aunque en algunos casos la concentración de SDT no es alta, algunos otros parámetros como la salinidad efectiva, la salinidad potencial, el pH y el contenido de cloro pueden indicar restricciones para el uso del agua. En algunos pozos de bombeo se han detectado altos contenidos de sodio, por lo que debe evitarse en lo posible el uso de estas aguas para mezclarlas con agua del canal. La aplicación de mejoradores y el lavado de suelos son prácticas recomendadas a mediano plazo para aminorar el efecto tóxico de la aplicación de aguas mezcladas.

#### Uso del agua residual para lavar suelos

En la práctica, el agua residual municipal cruda ha sido utilizada para el riego de trigo, principalmente. Se ha sugerido que esta agua debería utilizarse únicamente para lavar suelos, pero no debe perderse de vista que contiene altos niveles de salinidad, sodio en particular, perjudiciales para los cultivos, porque alteran las propiedades físicas del suelo. Además, el agua residual municipal lleva consigo sólidos disueltos o en suspensión, y materiales contaminantes como plaguicidas, fertilizantes, residuos industriales y detergentes.

#### Evaluación de los efectos de las medidas correctivas aplicadas

La medición del impacto de las medidas correctivas aplicadas se debe realizar a través del monitoreo de las áreas afectadas por salinidad y por manto freático superficial, y con el auxilio de gráficas áreas-tiempo.

#### Monitoreo de la salinidad del suelo y del nivel freático

Se requiere hacer evaluaciones periódicas del estatus de la salinidad de los suelos y del nivel freático del distrito, y relacionar esos resultados con el agente causal más significativo, lo cual debería ser una tarea obligatoria y permanente de la CNA y de la S. de R.L. Desde 1987 no se elaboran gráficas áreas-tiempo, por lo que se considera necesario que tanto el distrito de riego de la CNA como la S. de R.L. retomen esta práctica para comparar la evolución de las áreas con manto freático superficial con los volúmenes de agua aplicados para el riego.

#### Conclusiones

La aplicación de la metodología para el manejo y control de la salinidad permitió identificar y jerarquizar las causas del ensalitramiento del suelo del Distrito de Riego 038 Río Mayo, y determinar las medidas correctivas.

En orden de importancia, las causas que dan origen al problema de salinidad y de manto freático superficial en el DR 038 son los métodos de riego ineficientes, el mantenimiento deficiente de la red de drenaje, las pérdidas de agua por conducción, la falta de capacitación de usuarios, las condiciones de topografía, la ubicación y condiciones de descarga de la red de drenaje, la calidad del agua de riego y el material parental.

Recibido: 05/04/2007  
Aprobado: 25/04/2008

#### Referencias

- AYERS, R.S. y WESTCOT, D.W. La calidad del agua en la agricultura. *Estudio FAO Riego y Drenaje*. Núm. 29, Rev. 1, Roma, 1987, 172 pp.
- BELTRÁN, F.M. DE J., CABRERA, F., LAM, J.M. y LOZANO, A.Z. *Efecto del uso conjunto del agua subterránea y superficial en la productividad de los suelos del Valle del Mayo*. Informe 1998. Navojoa, México: Inifap, Campo Agrícola Experimental Valle del Mayo, 1999.

- CNA. *Plan director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 038, Río Mayo, Sonora*. Informe Final. México, D.F.: Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, 2005.
- DE LA PEÑA, I. Principios y solución del drenaje parcelario. *Boletín Técnico*. Núm. 9, SARH, 1979, 131 pp.
- DE LA PEÑA, I. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación. *Boletín Técnico*. Núm. 10, SARH, 1982, 107 pp.
- DE LA PEÑA, I. *Problemas de salinidad y drenaje en México*. Documento de circulación interna. Ciudad Obregón, México: CNA, Gerencia Regional en el Noroeste, 1993.
- DE LA PEÑA, I. *Problemática de la salinidad y el drenaje, y su control en los distritos de riego de la región noroeste*. Ciudad Obregón, México: Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego del Río Yaqui, 2001.
- GONZÁLEZ, C.A., DE LEÓN, B. y FUENTES, C. *Impacto del drenaje agrícola en México*. IX Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 2. Drenaje, Salinidad y Contaminación Agrícola, Culiacán, Sinaloa, México, del 27 al 29 de octubre de 1999, pp. 1-7.
- GONZÁLEZ, C.A. *Principales Indicadores de los distritos de riego (98-99 y 00-01)*. Disco compacto. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002.
- IMTA. *Proyecto ejecutivo de drenaje parcelario para recuperar 5,000 ha en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997.
- IMTA. *Plan director para el manejo y control de la salinidad en un distrito de riego*. 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. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, 2001.
- INFANTE, R.J. y HUARANGA, L.E. *Impacto económico del drenaje parcelario subsuperficial en el Distrito de Riego No. 038, Río Mayo, Sonora*. IX Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 2. Drenaje, Salinidad y Contaminación Agrícola, Culiacán, Sinaloa, México, del 27 al 29 de octubre de 1999, pp. 41-44.
- INFANTE, R.J. y HUARANGA, L.E. *Impacto del drenaje parcelario subsuperficial en el Distrito de Riego No. 038, Río Mayo, Sonora*. Congreso Internacional de Transferencia de Sistemas de Riego. Mesa 2: Operación y Conservación, Mazatlán, Sinaloa, México, del 2 al 9 de abril de 2000, pp. 153-158.
- INIFAP. *Recuperación de suelos ensalitrados con praderas irrigadas en el Valle del Mayo*. Informe final, Navojoa, México: Campo Experimental Valle del Mayo, 2001.
- JURINAK, J.J. and SUÁREZ, D.L. *The Chemistry of Salt-Affected Soils and Waters. Agricultural Salinity Assessment and Management*. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, 1990, pp. 42-63.
- MARTÍNEZ, B.J. *Drenaje agrícola*. Volumen I. Manual Técnico núm. 5. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1986, pp. 239.
- MASHALI, A.M. SPUSH: A Newsletter on Sustainable Productive Use of Salt-affected Habitats. *Newsletter of the Network on Integrated Soil Management for Sustainable Use of Salt-affected Soils*. Vol. 4. FAO, IUSS, 2000, 31 pp.
- NAMUCHE, V.R., SAUCEDO, H., LÁZARO, P. y FUENTES, C. *Transferencia de tecnología para el diseño e instalación de sistemas de drenaje parcelario en el Valle de Mexicali, México*. Congreso Internacional de Transferencia de Sistemas de Riego. Mesa 3: Desarrollo y Transferencia de Tecnología, Mazatlán, Sinaloa, México, del 2 al 9 de abril de 2000, pp. 333-348.
- ORTEGA, E.M. *Los suelos salinos, salino sódicos y sódicos del Valle del Mayo, Sonora*. Informe final. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997.
- ORTEGA, E.M. y VELÁZQUEZ, M. *Análisis sintético de las condiciones de salinidad de los suelos y aguas del Valle de Mexicali, B.C.N. Distrito de Riego 014 Río Colorado. Con referencia especial a los efectos de las aguas del Canal Sánchez Mejorada de alta concentración y altos RAS*. Montecillos, México: Colegio de Postgraduados, 1997, 101 pp.
- PALACIOS V.O.L., NIKOLSKY, Y.N., LANDEROS, S.C., PIMENTEL, L.J. y RAMÍREZ, A.C. *Manual de drenaje parcelario de los distritos de riego*. Montecillos, México, IMTA, CNA, 1993.
- PAREDES, M. *La salinización de los suelos en el Distrito de Riego No. 014, R. C.* Documento de circulación interna. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de B.C., Distrito de Riego 014, Río Colorado, Mexicali, 2001.
- PLANIMEX, INGENIEROS CONSULTORES, S.A. *Estudio geohidrológico de los acuíferos en el Valle del Río Mayo-Sonora*. Vol. 1. Informe final. México, D.F.: Ingenieros Consultores, S.A., 1970.
- PRATT, P.F. and SUÁREZ, D.L. *Irrigation Water Quality Assessments. Agricultural Salinity Assessment and Management*. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, 1990, pp. 220-236.
- PULIDO, M.L., ROBLES, B.D., GONZÁLEZ, J. e INFANTE, J. *Programa de jerarquización de inversiones para la recuperación de suelos con problemas de salinidad y drenaje en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora*. Informe final. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997.

- PULIDO, M.L. *Informe de las reuniones de consulta con expertos en salinidad, realizadas en el Centro Nacional de Transferencia en Riego y Drenaje y en el Distrito de Riego 038 Río Mayo*. Documento interno. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, 2001.
- PULIDO, M.L., WIEGAND, C.L., GONZÁLEZ, J., ROBLES, B.D., CISNEROS, O.X. y LEMUS, O. 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, abril-junio de 2003, pp. 83-97.
- PULIDO, M.L., GONZÁLEZ, J., INFANTE, J. y DELGADO, J.M. Monitoreo de la salinidad en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, mediante sensores remotos. *Terra*. Chapingo, México, 2007 (por publicarse).
- REYES, Q.C. *Levantamiento semidetallado de suelos del Distrito de Riego No. 038 Río Mayo, Sonora*. Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, 1993.
- RICHARDS, L.A. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. México, D.F.: Limusa, 1974.
- RHOADES, J.D. Overview: *Diagnosis of Salinity Problems and Selection of Control Practices*. Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, 1990, pp. 18-41.
- TANJI, K.K. *Nature and Extent of Agricultural Salinity*. Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, 1990, pp. 1-17.
- UVALLE, B.J.J. y OSORIO, R. *Dictamen técnico sobre el origen de la salinidad y el funcionamiento de pozos de bombeo en los módulos 1, 5 y 6 del Distrito de Riego No. 038, Río Mayo, Sonora*. Navojoa, México: Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego 038 Río Mayo, 1996.



#### **Abstract**

*PULIDO-MADRIGAL, L., GONZÁLEZ-MERAZ, J. & VILLARREAL-PULIDO, M. Methodology for the diagnosis, management, and control of salinity applied in Irrigation District 038, Río Mayo, Sonora. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIV, no. 1, January-March, 2009, pp. 55-72.*

*The methodology for soil salinity control and management consists of five steps: assessment of the actual soil salinity condition; identification of the causes that promote soil salinity, hierarchical classification of all the causes promoting salinity, application of corrective measures, and assessment of the benefits obtained from the corrective measures. The causes that promote soil salinity were determined as parent material, irrigation water quality, land physiography and topography, inappropriate irrigation systems, water losses during conveyance, deficient surface drainage system maintenance, location and discharge conditions of the collector drains, and the lack of training on water management issues. For the study case, it was determined that the most important causes that promote soil salinity were the use of inappropriate irrigation systems, water losses during conveyance, the land topography, and the lack of training. The application of the present methodology allowed the hierarchical classification of the causes promoting soil salinity.*

**Keywords:** *soil salinity, irrigation agriculture, deficient drainage, water quality, salinity causes, hierarchization, salinity effect, crop production.*

#### **Dirección institucional de los autores:**

*M.C. Leonardo Pulido-Madrigal  
M.C. Jorge González-Meraz*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532  
Colonia Progreso  
62550 Jiutepec, Morelos, México  
teléfono: + (52) (777) 329 3659, 329 3600, extensiones 109 y 196  
fax: + (52) (777) 329 3659  
lpulido@tlaloc.imta.mx  
jgmeraz@tlaloc.imta.mx

*Ing. Mario Villarreal-Pulido*

Comisión Nacional del Agua  
Insurgentes Sur 2416  
Colonia Copilco El Bajo  
04340 México, D.F.  
teléfono: + (52) (55) 5174 4513  
mario.villarreal@conagua.gob.mx