

EFFECTO DE SALES SOLUBLES SOBRE LA FORMACION DE COSTRAS SALINAS EN SUELOS Y SU INCIDENCIA SOBRE EL MOVIMIENTO DE AGUA Y OTRAS PROPIEDADES FISICAS

Fernando A. Galizzi y Norman Peinemann

Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, 8000 Bahía Blanca, Argentina

RESUMEN

Fue estudiada la morfología de costras salinas formadas bajo condiciones de flujo saturado y no saturado, con distintas sales y en suelos de diferentes texturas y su efecto sobre el movimiento del agua en el suelo.

Se comprobó que a medida que aumenta la concentración de las soluciones salinas, la cantidad de agua evaporada del suelo se hace menor, observándose el siguiente orden de disminución: $\text{NaCl} < \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{MgSO}_4$; por lo que también quedan remanentes cantidades crecientes de agua en el suelo en el orden establecido. En presencia de sales también aumenta marcadamente la resistencia a la penetración. Bajo condiciones salinas se comprobó que la textura ejerce un efecto secundario sobre el movimiento de agua en el suelo.

Palabras claves: costras salinas, movimiento de sales, flujo de agua salina, evaporación de agua salina.

EFFECT OF SOLUBLE SALTS ON THE DEVELOPMENT OF SALT CRUSTS ON SOILS AND ITS EFFECT ON THE WATER MOVEMENT AND OTHER PHYSICAL PROPERTIES

ABSTRACT

Salt crust morphology and crust effect on water movement in soils under saturated and unsaturated flux conditions were studied as a function of salt type in soils differing in texture.

It was observed that as the concentration of the salt solutions increases the amount of evaporated water becomes smaller in the following order: $\text{NaCl} < \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{MgSO}_4$; and in consequence more water remains in the soil in the established order. Salts also increase markedly the resistance to penetration. Furthermore under high salt conditions soil texture had secondary effects on water movement in soils.

Key words: salt crusts, salt movement, salty water flux, salty water evaporation.

INTRODUCCION

Las costras o florescencias salinas son depósitos superficiales de sales que constituyen una mezcla intrincada de partículas de suelo y especies minerales evaporíticas constituidas principalmente por cloruros y sulfatos (Lavado y Reinaudi, 1986). La composición química de las mismas no es constante a lo largo del año debido a las variaciones que tienen las solubilidades de las sales minerales presentes, especialmente los sulfatos como lo han demostrado los trabajos de Gumuzzio et al. (1982) y Whittig et al. (1982).

Estos depósitos superficiales se originan como consecuencia de la acción evaporante de la atmósfera que provoca el ascenso capilar de agua y sales de una capa freática mineralizada cuando está próxima a la superficie del suelo. La composición química de la capa, así como los procesos de solubilización y precipitación que se producen durante la migración capilar a lo largo del perfil, determinan la composición aniónica y catiónica de la solución que alcanza la superficie del suelo y por ende la de la costra que se desarrollará como consecuencia de tal proceso.

La presencia de una costra salina produce un efecto de mulch en la superficie del suelo debido a que reduce la pérdida de agua del mismo. Este efecto de mulch afecta el movimiento ascendente de las soluciones salinas ya que obliga al agua a moverse en fase de vapor a través de ella a una velocidad que es inversamente proporcional al espesor del mulch (Gardner, 1958). Si bien hay información abundante sobre el proceso de evaporación del suelo y la redistribución de agua y sales que ello origina en condiciones controladas de laboratorio, la bibliografía se refiere casi exclusivamente al efecto que produce el NaCl (Bresler y Kemper, 1970; Nakayama et al. 1973) no existiendo trabajos experimentales con otras sales solubles, como así tampoco con sales poco solubles.

El propósito de este trabajo fue investigar en condiciones de laboratorio el efecto de algunas sales comúnmente halladas en suelos salinos, sobre el proceso de evaporación bajo condiciones de flujo saturado e insaturado y la consiguiente redistribución de agua y sales que ello origina. Se intenta además caracterizar morfológicamente la costra superficial producida y cuantificar la dureza de la misma.

MATERIALES Y METODOS

Fueron llevadas a cabo dos tipos de experiencias

que se diferenciaron en el aprovisionamiento de las soluciones: una con suministro limitado de solución (flujo no saturado) y otra con suministro continuo (flujo saturado).

En ambos tipos de experiencias los tratamientos efectuados fueron: testigo (H_2O), NaCl, Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , $MgSO_4$, $CaCO_3$ y $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Las sales poco solubles ($CaCO_3$ y $CaSO_4$) fueron suministradas como solución saturada, mientras que en el caso de las restantes sales de mayor solubilidad fueron utilizadas tres concentraciones, a saber: 0,1; 0,5 y 1,0 M. Con el objeto de asegurar los resultados cada uno de los tratamientos fue efectuado con cuatro repeticiones.

El material con el cual se realizaron estas experiencias fue un suelo franco arenoso proveniente del horizonte A de un Haplustol típico de la unidad C del predio que posee la Universidad Nacional del Sur en Palihue (Bahía Blanca) Sánchez y Kruger, inédito). A modo de comparación fueron repetidos algunos tratamientos con dos muestras de textura más fina provenientes del horizonte B de un Argiudol típico de Sierra de la Ventana y del horizonte superficial de un Ustifluvente típico de Pedro Luro. Las propiedades más importantes de estos suelos se presentan en la tabla 1.

a) **Experiencia con flujo no saturado:** 110 g de suelo seco al aire y tamizado por 2 mm fueron llevados a saturación con una solución del tratamiento correspondiente y vertidos en forma de pasta dentro de recipientes plásticos de forma cilíndrica (Fig. 1 a). Luego de 12 horas de reposo a temperatura ambiente con el objeto de equilibrar la suspensión, se llevaron a estufa a $50^\circ C$ durante 48 horas. La cantidad de agua evaporada se determinó por diferencia de pesadas a las 0, 6, 12, 24, 30, 36 y 48 horas de iniciado el ensayo.

TABLA 1: Propiedades de las muestras de suelo utilizadas en las experiencias.

Suelo:	Haplustol típico	Argiudol típico	Ustifluvente típico
arcilla (%)	8,7	36,2	26,0
limo (%)	16,8	32,0	48,5
arena (%)	74,5	31,8	25,5
calcáreo (%)	1,7	0,1	0,2
mat. org. (%)	2,2	1,4	1,5
% saturación	30	42	39
C.E. ($dS\ m^{-1}$)	0,8	0,5	1,5
pH (1 : 2,5)	8,3	6,7	8,3

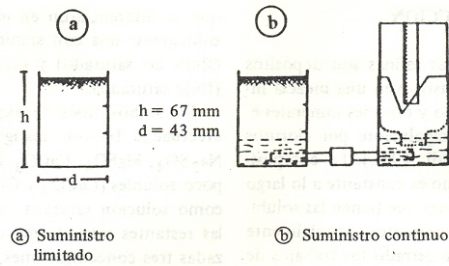


Fig. 1: Características de los recipientes experimentales.

Al cabo de ese tiempo se efectuaron las determinaciones descritas en la tabla 2 a tres profundidades: 0–5, 20–25 y 40–45 mm.

El efecto de la textura sobre el desplazamiento ascendente de agua y sales se evaluó mediante una experiencia de este tipo en la cual fueron comparadas tres muestras, las tres muestras de suelo descritas en la tabla 1, tratadas con agua, NaCl, Na_2SO_4 1,0 M en las condiciones antes mencionadas.

b) Experiencia con flujo saturado: en este caso la solución fue provista al suelo valiéndose de un segundo recipiente igual al primero, comunicado con éste por un tubo de acrílico al que se le suministró la solución por medio de otro recipiente cerrado invertido a modo de tubo de Mariotte, de forma tal que el nivel de la solución en ambos reservorios era mantenido a una altura constante de aproximadamente 10 mm por un sistema de vasos comunicantes (Fig. 1 b). 110 g de suelo se vertieron dentro del primer recipiente, el que fue luego saturado por capilaridad, y por medio de una tira de papel milimetrado adosada al recipiente invertido con la solución se midió la cantidad consumi-

da al cabo de 0, 6, 12, 24, 30, 36 y 48 horas. Una vez consumidos los 100 ml de solución el recipiente con suelo fue dejado 48 horas más en estufa y luego se efectuaron las determinaciones detalladas en la tabla 2 a las mismas profundidades que en la experiencia anterior.

La descripción morfológica de las costras formadas superficialmente se realizó mediante observación directa con la lupa binocular, utilizándose para ello aquellas provenientes de los tratamientos con mayor concentración salina.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Fig. 2 se presentan las cantidades totales de agua evaporada al cabo de 48 horas tanto bajo condiciones de flujo no saturado (I) como de flujo saturado (II) a partir de soluciones salinas de distintas concentraciones: 0,1 (a), 0,5 (b) y 1,0 M (c). En ellas los tratamientos con yeso y carbonato de calcio, debido a la baja concentración de sus soluciones saturadas fueron graficadas junto a la concentración menor (a) de las sales solubles.

En el caso de los ensayos llevados a cabo sin restitución del agua evaporada se evidencia una alta cuota de evaporación en las primeras 24 horas, principalmente a partir de soluciones diluidas, y al cabo de las cuales tiene lugar una inflexión en la curva debido a que el consumo de agua remanente se hace más lento como consecuencia de estar más fuertemente retenida a los coloides del suelo. A medida que las soluciones son más concentradas el proceso de evaporación se hace menor y por ende la trayectoria de las

TABLA 2: Determinaciones efectuadas en los cilindros de suelo.

Determinación	Método utilizado
Contenido hídrico	gravimétrico a 105°C
Contenido salino	C.E. en relación suelo:agua de 1:2,5
Resistencia a la penetración	Penetrómetro Soil Test Pocket Cl - 700
pH	potenciométrico (1:2,5)

curvas dentro del período considerado es más continua como consecuencia de una menor pérdida de agua. De esta forma el agua remanente está en el rango de bajas tensiones de retención por el suelo, lo que dará lugar a que las pérdidas sean más uniformes. Uno de los motivos de la restricción a medida que aumenta la concentración de sales se debe a la formación de una costra salina y su efecto aislante sobre el suelo subyacente, y a través de la cual el agua sólo puede moverse en estado de vapor, ya que como fue demostrado por Gardner y Fireman (1958) la cuota de eva-

poración es inversamente proporcional al espesor de la cubierta superficial cuando el movimiento de vapor a través de la misma es menor que la evaporación potencial.

Bajo flujo saturado la cantidad y velocidad del agua evaporada son mayores y las curvas obtenidas presentan una trayectoria análoga a las correspondientes a las soluciones más concentradas bajo condiciones no saturadas, es decir que debido a la continua restitución del agua perdida, ésta siempre se encuentra a bajos valores de tensión lo que en cierta forma explica

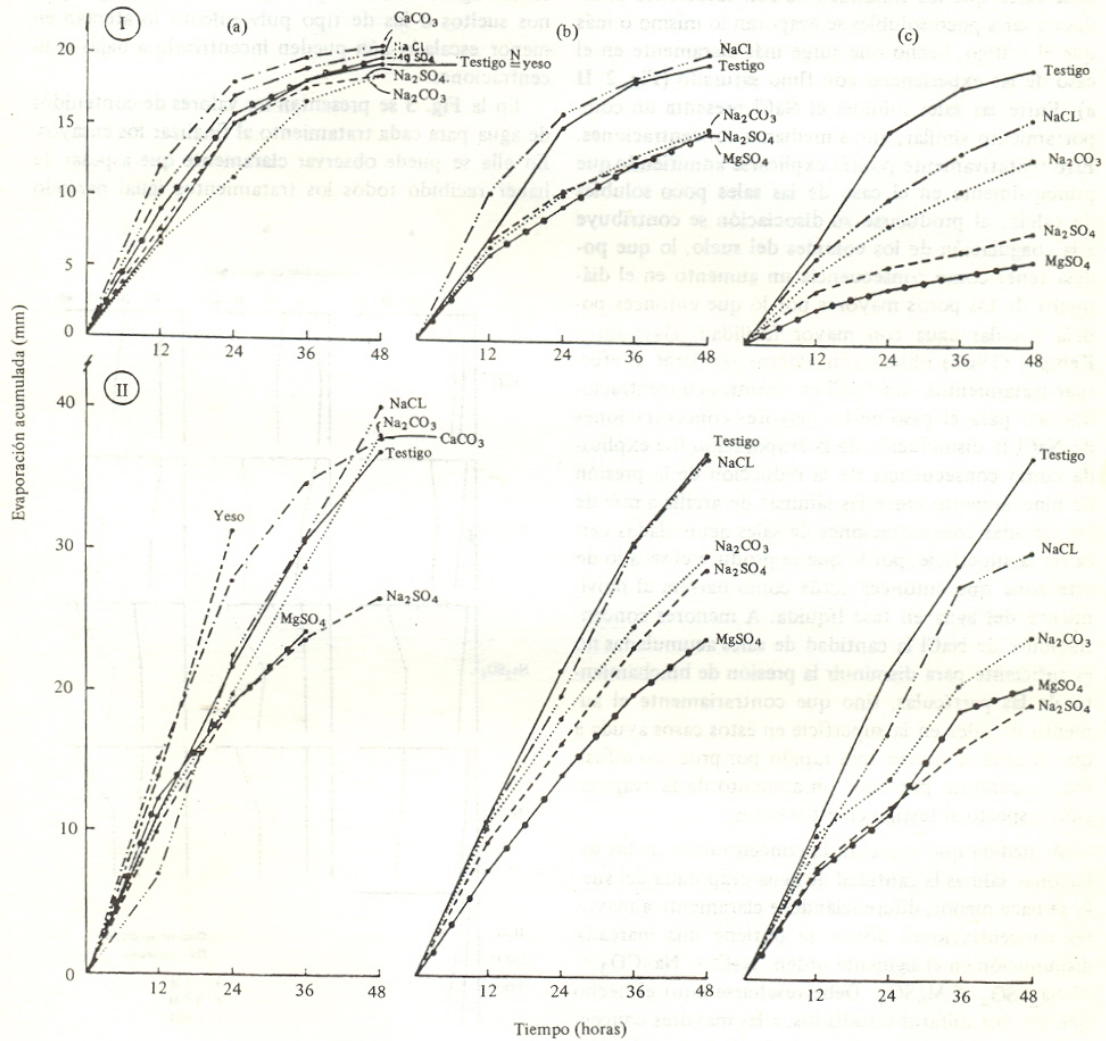


Fig. 2: Curvas de evaporación acumulada en función del tiempo.

I = flujo no saturado; II = flujo saturado.
a = 0,1 M; b = 0,5 M; c = 1,0 M.

su trayectoria más o menos rectilínea. En todos los casos la capa superficial de suelo permanece húmeda a diferencia de lo que sucede en condiciones de flujo no saturado donde al producirse el secado de ésta, disminuye abruptamente la evaporación, como fuera observado por Bresler et al. (1969) y Mc Intyre (1982) quien lo atribuyó a una consecuencia de la reducción en el flujo ascendente.

Si se compara la magnitud de la evaporación del suelo con las distintas soluciones y el testigo, puede observarse que los tratamientos con soluciones diluídas de sales poco solubles se evaporan lo mismo o más que el testigo, hecho que surge más claramente en el caso de las experiencias con flujo saturado (Fig. 2, II a). Entre las sales solubles el NaCl presenta un comportamiento similar, aún a medianas concentraciones. Esto tentativamente podría explicarse admitiendo que principalmente en el caso de las sales poco solubles de calcio, al producirse su disociación se contribuye a la coagulación de los coloides del suelo, lo que podría tener como consecuencia un aumento en el diámetro de los poros mayores por lo que entonces podría circular agua con mayor facilidad. Qayyum y Kemper (1962) observaron efectos similares al efectuar tratamientos con NaCl en distintas concentraciones; así para el caso de las mayores concentraciones de NaCl la disminución de la evaporación fue explicada como consecuencia de la reducción de la presión de hinchamiento entre las láminas de arcilla a raíz de las elevadas concentraciones de sales acumuladas cerca de la superficie, por lo que se produce el secado de esta zona que entonces actúa como barrera al movimiento del agua en fase líquida. A menores concentraciones de NaCl la cantidad de sales acumuladas no es suficiente para disminuir la presión de hinchamiento de las partículas, sino que contrariamente el aumento de sales en la superficie en estos casos ayuda a que el agua se mueva más rápido por procesos difusivos, lográndose por ende un aumento de la evaporación respecto al testigo en estos casos.

A medida que aumenta la concentración de las soluciones salinas la cantidad de agua evaporada del suelo se hace menor, diferenciándose claramente a mayores concentraciones donde se obtiene una marcada disminución en el siguiente orden: $\text{NaCl} < \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{MgSO}_4$. Debe resaltarse aquí el hecho que los dos sulfatos estudiados, a las mayores concentraciones provocan una disminución de la evaporación de agua a menos de la mitad respecto al testigo. Frie-

del (1976) realizó algunos ensayos similares a los que aquí se describen con un suelo areno limoso durante un período de 50 días, constatando que si bien la evaporación de las soluciones utilizadas está en relación directa a la presión de vapor de las mismas, los valores medidos en suelos sometidos a estas soluciones no seguían este orden ya que dependían más de las distintas formas de acumulación de sales que tenían lugar en superficie. Así es que aquellas que forman películas continuas son las que más afectan el desplazamiento del agua, mientras que aquellas formadas por granos sueltos o las de tipo pulverulento lo afectan en menor escala o aún pueden incentivarlo a bajas concentraciones.

En la Fig. 3 se presentan los valores de contenidos de agua para cada tratamiento al finalizar los ensayos. En ella se puede observar claramente que a pesar de haber recibido todos los tratamientos igual período

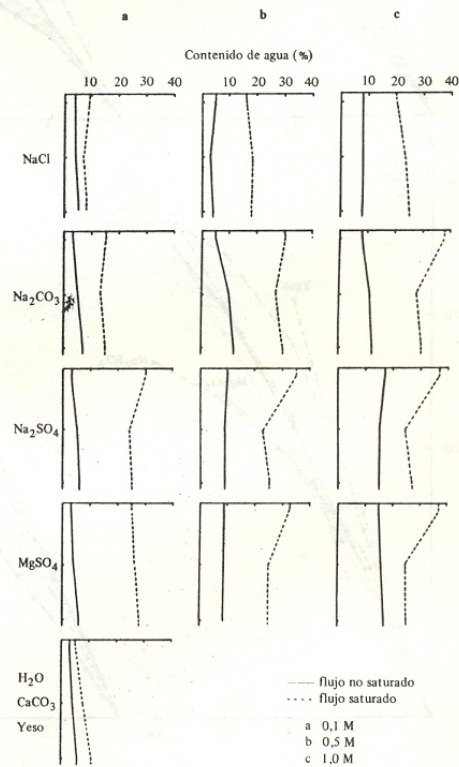


Fig. 3: Contenidos de agua en suelos al finalizar las experiencias.

de secado (48 horas), los contenidos remanentes de agua son mayores bajo condiciones de flujo saturado como consecuencia de la mayor acumulación salina producida en superficie.

Como consecuencia de la diferente velocidad de evaporación, la que se hace más evidente a medida que aumenta la concentración de sales solubles, al cabo del mismo tiempo en el suelo quedan mayores contenidos remanentes de agua en el siguiente orden: $\text{NaCl} < \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{MgSO}_4$. Por el contrario en el caso de las sales poco solubles prácticamente no se observan diferencias en este sentido respecto al testigo.

Los contenidos de agua por lo general son menores en superficie que en profundidad donde muchas veces éstos duplican (NaCl , Na_2CO_3) y hasta cuadruplican (Na_2SO_4 , MgSO_4) a los primeros como consecuencia de un fuerte gradiente ascendente, lo que es bien visible especialmente en las experiencias con flujo no saturado a elevadas concentraciones comparadas con las concentraciones más bajas. No obstante en aquellos casos en que se produjo una fuerte reducción en la evaporación (Na_2SO_4 , MgSO_4), estos no muestran diferencias significativas en función de la profundidad, observándose contenidos de agua remanentes de has-

ta cuatro veces superiores a los del testigo. Este efecto fue atribuido por Bresler y Kemper (1970) a la marcada disminución en el tamaño de los poros que tiene lugar en la costra superficial como consecuencia de la acción dispersante del sodio. Si bien esta explicación pareciera contradictoria con los resultados de este experimento, ya que las distintas sales de sodio ensayadas ejercen distinto efecto sobre el agua retenida, debe tenerse en cuenta que la dispersión de partículas por acción del sodio se produce como efecto de la hidrólisis de sus sales y en consecuencia una marcada elevación del pH. De este modo en el caso de Na_2SO_4 y Na_2CO_3 se produce una fuerte alcalinización y una consecuente dispersión de partículas y no así para el NaCl donde aún se observa una reducción de pH en superficie en relación al testigo.

La distinta distribución del agua remanente en los tratamientos sometidos a las diferentes sales hace presumir variaciones en la permeabilidad de las costras salinas formadas al paso de las soluciones subyacentes, las que deberían ser ordenadas de acuerdo a ello del siguiente modo: $\text{NaCl} < \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{MgSO}_4$.

Si bien la resistencia a la penetración del suelo es inversamente proporcional al contenido de agua que

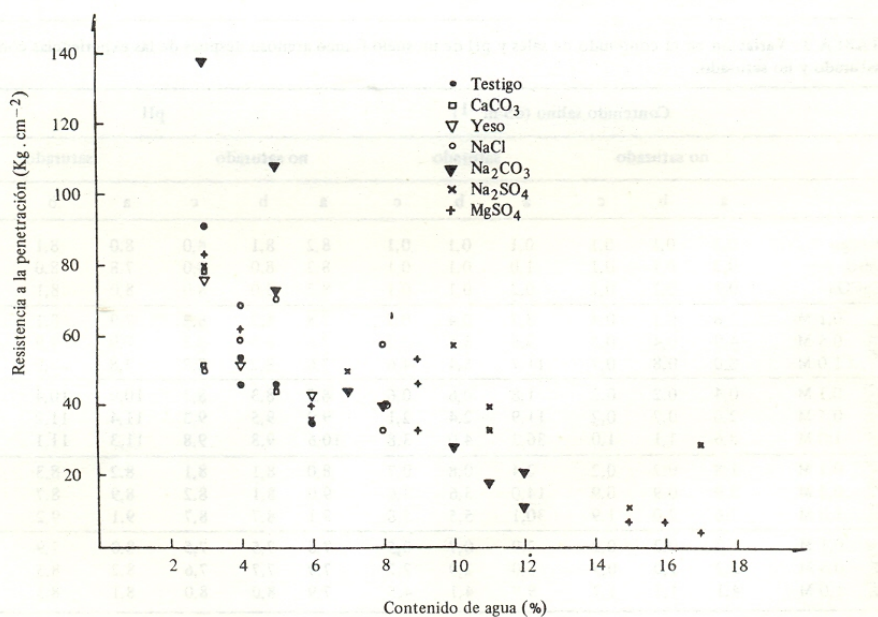


Fig. 4: Resistencia a la penetración de los suelos en función de sus contenidos de agua.

éste posee (Fig. 4) ($r = 0,65^{**}$), a elevadas tensiones de agua o mayor secado del suelo ésta aumenta considerablemente debido a la presencia de sales (Na_2CO_3 , NaCl) aún a contenidos de agua superiores al testigo. Las grandes diferencias obtenidas entre los valores con los ensayos con flujo no saturado deben atribuirse principalmente a la forma de acondicionamiento de las muestras en los recipientes, motivo por el cual estos tratamientos no pueden ser comparados entre sí en este aspecto; no obstante los mismos son útiles para apreciar el efecto que tienen las distintas sales en particular.

A medida que aumenta la concentración de la solución salina, mayor es la barrera de la costra formada en superficie por la sal depositada al producirse la pérdida del agua, y por ende más brusca será la disminución de la evaporación. A su vez esto se refleja claramente en la mayor acumulación relativa de agua que tiene lugar en la capa superficial respecto a las subyacentes como consecuencia de una mayor impermeabilización al paso de nuevas soluciones (Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , MgSO_4). El Na_2CO_3 con contenidos de agua retenidos en el suelo tres veces superiores al testigo por efecto aislante de las sales, ya puede lograrse

aún a bajas concentraciones la formación de costras cuya resistencia a la penetración sea mayor que el testigo. Este efecto probablemente se deba a la fuerte dispersión de los coloides que produce esta sal. En el caso de los sulfatos, por el contrario, como consecuencia de los elevados contenidos de agua retenida en la capa superficial, debido a la fuerte reducción al paso de soluciones acuosas, la mayor acumulación de sales no necesariamente se ve reflejada en un aumento de compactación en superficie.

Bajo condiciones no saturadas para el período de las experiencias, la mayor compactación se obtiene con las soluciones salinas de menor concentración por producirse un más rápido secado del suelo. En esta situación particular es posible efectuar una comparación cuantitativa de los diferentes tratamientos debido a que quedaron remanentes de agua similares, lo que permitió establecer el siguiente ordenamiento: Na_2CO_3 (3,8) > MgSO_4 (3,1) > Na_2SO_4 (2,2) > NaCl (1,9).

En la redistribución de sales que tuvo lugar al evaporarse las soluciones aplicadas, en la tabla 3 se observa una acumulación en la capa superficial cuya intensidad a su vez fue función de la concentración salina

TABLA 3: Variación en el contenido de sales y pH de un suelo franco arenoso después de las experiencias con flujo saturado y no saturado.

	Contenido salino (dS m ⁻¹)						pH						
	no saturado			saturado			no saturado			saturado			
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
testigo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	8,2	8,1	8,0	8,0	8,1	8,1	
yeso	0,2	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	8,2	8,0	8,0	7,8	8,0	8,1	
CaCO_3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	8,2	8,0	8,0	8,0	8,1	8,1	
NaCl	0,1 M	2,8	0,4	0,4	3,7	0,4	0,7	7,8	8,2	8,2	7,9	8,1	8,2
	0,5 M	4,9	0,4	0,3	9,6	3,4	2,2	7,6	8,3	8,3	7,9	7,9	8,0
	1,0 M	8,0	0,8	0,7	11,7	5,4	4,6	7,6	8,2	8,2	7,8	7,9	7,9
Na_2CO_3	0,1 M	0,4	0,2	0,2	1,8	0,6	0,6	8,5	8,3	8,3	10,9	10,4	10,7
	0,5 M	2,0	0,7	0,2	11,9	2,4	2,1	9,9	9,5	9,3	11,4	11,2	11,2
	1,0 M	8,6	1,1	1,0	36,3	4,0	3,8	10,6	9,8	9,8	11,3	11,1	11,0
Na_2SO_4	0,1 M	1,8	0,2	0,2	2,4	0,8	0,7	8,0	8,1	8,1	8,2	8,3	8,3
	0,5 M	5,9	0,9	0,9	14,0	3,6	3,6	9,0	8,1	8,2	8,9	8,7	8,8
	1,0 M	7,6	2,0	1,9	30,1	5,5	5,8	9,1	8,7	8,7	9,1	9,2	9,1
MgSO_4	0,1 M	1,3	0,2	0,2	2,0	0,7	0,5	7,5	7,5	7,5	8,0	7,9	7,9
	0,5 M	3,2	1,0	0,9	5,0	2,9	2,7	7,9	7,7	7,6	8,2	8,3	8,2
	1,0 M	4,1	1,7	1,7	9,7	4,1	4,5	7,9	8,0	8,0	8,1	8,3	8,3

Nota: a, b y c representan las submuestras a las profundidades de 0-5, 20-25 y 40-45 mm respectivamente.

de la solución aplicada tal como fue previsto por Gardner (1958), y por el contrario en las capas subyacentes las concentraciones tendieron a permanecer constantes coincidiendo en este aspecto con los hallazgos de Nakayama et al. (1973).

Las sales de la solución del suelo se mueven arrastradas por ésta, pero a su vez cerca de la superficie pueden desplazarse a velocidades mayores o menores como consecuencia de gradientes de concentración (Tood y Kemper, 1972) o gradientes térmicos (Weeks et al., 1968). Además, Scotter y Raats (1970) observaron que cuando una sal es agregada a un suelo saturado, el agua se mueve predominantemente en estado de vapor en respuesta a un gradiente de potencial total causado por el potencial osmótico debido a la sal. Esta se disuelve y se mueve en estado líquido hacia el suelo vecino en respuesta al gradiente de potencial mátrico. La interacción de estos efectos hacen compleja la interpretación de los desplazamientos salinos que tienen lugar, no obstante pueden remarcarse algunas diferencias observadas en la movilización de las diferentes sales hacia la superficie como consecuencia de su efecto sobre el movimiento del agua en las distintas capas del suelo. Así en el caso del flujo no saturado puede observarse que los sulfatos presentan mayores gradientes sólo a bajas concentraciones, mien-

tras que en el caso del Na_2CO_3 éstas sólo tienen lugar a las mayores concentraciones; contrariamente en los tratamientos con NaCl en todo el rango de concentraciones ensayadas se observan elevados gradientes. Bajo condiciones saturadas en general los gradientes de concentración entre la capa superficial y las capas subyacentes son menores, observándose en estos casos sólo un marcado aumento en las mayores concentraciones en el estado del Na_2CO_3 y en las menores en el NaCl ; en los restantes tratamientos no se observan variaciones importantes de la movilidad en función de la concentración de la solución actuante. En la naturaleza estas diferenciaciones de movilidades son más complejas aún ya que en el transporte también influye el tipo de catión presente como lo demostrara Pakshina (1972), dependiendo esto del espesor de la doble capa difusa; así fue establecido por Pakshina et al. (1981) que SO_4 , Ca y Mg son transportados por el flujo de agua, mientras que Na y Cl son transportados por el flujo pelicular.

En la Fig. 5 y la tabla 4 se presentan los datos de evaporación, contenidos de agua y sales, resistencia a la penetración y pH de las muestras analizadas correspondientes a suelos de diferentes texturas sometidos a tratamientos con agua, NaCl y Na_2SO_4 . De ellas puede concluirse que la pérdida de agua en estos sue-

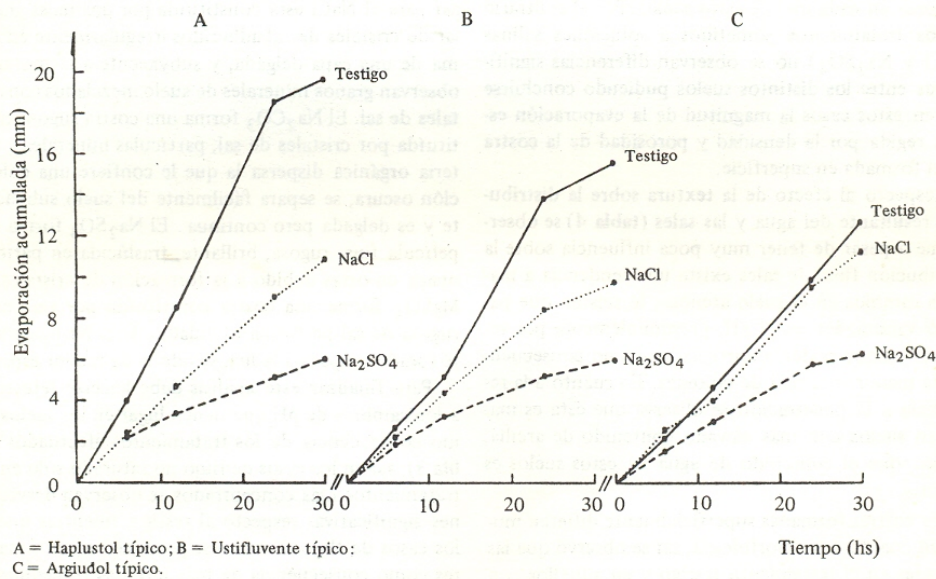


Fig. 5: Curvas de evaporación acumulada desde suelos de distinta textura en función del tiempo.

TABLA 4: Contenidos de agua y sales, resistencia a la penetración y pH de suelos de distinta textura tratados con soluciones salinas, luego de un período de evaporación de 48 horas a 50°C.

Suelo	Tratamiento	Contenido de agua (%)			Contenido de sales (dS m ⁻¹)			Resistencia a la penetración (Kg. cm ⁻²)			pH		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Haplus- tol típico	H ₂ O	2,2	5,2	7,0	0,2	0,1	0,1	90	52	38	8,2	8,2	8,2
	NaCl	9,0	11,5	12,0	10,9	0,8	0,8	17	14	12	7,6	8,3	8,3
	Na ₂ SO ₄	17,0	17,0	18,2	9,8	2,0	2,1	6	6	5	9,0	8,8	8,8
Ustiflu- vente típico	H ₂ O	3,3	9,0	10,5	0,2	0,1	0,1	150	104	86	8,0	7,9	8,0
	NaCl	11,4	14,0	14,3	8,2	0,8	0,8	47	42	37	7,2	7,9	7,9
	Na ₂ SO ₄	18,4	17,2	17,9	7,8	2,1	2,0	16	12	9	8,2	8,0	8,0
Argiudol típico	H ₂ O	5,4	11,2	12,1	0,2	0,1	0,1	150	150	98	6,5	6,6	6,7
	NaCl	9,9	13,9	14,4	10,3	0,8	0,8	81	52	51	6,0	6,3	6,4
	Na ₂ SO ₄	14,8	19,0	20,1	8,8	2,2	2,2	17	6	5	6,3	6,2	6,3

Nota: a, b y c representan submuestras a las profundidades de 0-5, 20-25 y 40-45 mm respectivamente.

los es inversamente proporcional a la superficie específica del suelo, es decir su contenido de coloides, o en otras palabras el suelo de textura más fina pierde más agua que el de textura más gruesa. Esto se manifiesta claramente en el tratamiento testigo y está estrechamente relacionado al tamaño predominante de poros en cada uno de estos suelos. Por el contrario en los tratamientos sometidos a soluciones salinas (NaCl y Na₂SO₄) no se observan diferencias significativas entre los distintos suelos pudiendo concluirse que en estos casos la magnitud de la evaporación estaría regida por la densidad y porosidad de la costra salina formada en superficie.

Respecto al efecto de la textura sobre la distribución resultante del agua y las sales (tabla 4) se observa que a pesar de tener muy poca influencia sobre la distribución final de sales existe una tendencia a mayores cambios en el suelo arenoso, lo mismo que para las variaciones en el pH, presumiblemente por tener un menor poder amortiguador como consecuencia de menor cantidad de coloides. En cuanto a la resistencia a la penetración se observa que ésta es mayor en suelos con más elevado contenido de arcilla, a pesar que el contenido de agua en estos suelos es mayor.

Las costras formadas superficialmente difieren mucho en cuanto a su morfología; así se observó que las formadas en el tratamiento testigo y en aquellos con sales poco solubles son similares entre sí y están cons-

tituidas por partículas minerales de distintos tamaños bien ordenadas formando una capa delgada y lisa. La costra formada en el tratamiento con yeso se diferencia por la presencia de cristales entre las partículas del suelo. En el caso de las sales solubles las costras formadas difieren notablemente de las anteriores, así para el NaCl está constituida por una masa granular de cristales de sal adheridos irregularmente en forma de una capa delgada, y subyacente a la misma se observan granos minerales de suelo mezclados con cristales de sal. El Na₂CO₃ forma una costra rugosa constituida por cristales de sal, partículas minerales y materia orgánica dispersa la que le confiere una coloración oscura, se separa fácilmente del suelo subyacente y es delgada pero continua. El Na₂SO₄ forma una película fina, rugosa, brillante, traslúcida en partes y opaca en otras debido a la formación de cristales. El MgSO₄ forma una costra constituida por una masa rugosa de sal de forma ondulada, de color ligeramente rosado y opaca a la luz, siendo la de mayor espesor.

Para finalizar este análisis debe hacerse referencia a los cambios de pH que tienen lugar en los suelos como consecuencia de los tratamientos efectuados (tabla 3); así en los casos de flujo no saturado sólo en los tratamientos más concentrados se observan desviaciones significativas respecto al testigo, mientras que en los casos de flujo saturado se producen efectos mayores como consecuencia de más intensas reacciones de hidrólisis. La mayor alcalinización se produce con

Na_2CO_3 (aproximadamente tres unidades de pH), siguiéndole Na_2SO_4 (alrededor de una unidad), luego MgSO_4 y finalmente NaCl en cuyo caso no se producen cambios apreciables.

Aunque en la naturaleza las costras generalmente están formadas por una mezcla de sales (Driessen y Schoorl, 1973; Lavado y Reinaudi, 1986) y su comportamiento será intermedio al de los tipos puros aquí descritos, puede obtenerse una idea aproxima-

da de su futuro comportamiento conociendo su composición química, ya que como se demostrara a raíz del tipo de textura de costra formada pueden ser obtenidas grandes diferencias en las pérdidas de agua a través de las mismas y con relación a ello en su compactación. Además es factible que se produzcan aumentos (Na_2CO_3 , Na_2SO_4) o disminuciones (MgSO_4 , NaCl) del pH, como así también tener distintas movi-

REFERENCIAS

- Bresler, E.; W.D. Kemper y R.J. Hanks, 1969. Infiltration, redistribution and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate hysteresis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 827-832.
- Bresler, E. y W.D. Kemper, 1970. Soil water evaporation as affected by wetting methods and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 3-8.
- Driessen, P.M. y R. Schoorl, 1973. Mineralogy and morphology on salt efflorescences on saline soils in the Great Konya Basin, Turkey. *J. of Soil Sci.* 24: 436-442.
- Friedel, B., 1976. Formen der Salzakkumulation an der Bodenoberfläche und deren Einfluss auf die Evaporation. *Mitteilungen des Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*; Heft 50: 401-412.
- Gardner, W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85: 228-234.
- Gardner, W.R. y M. Fireman, 1958. Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water table. *Soil Sci.* 85: 244-249.
- Gumuzzio, J.; J. Batlle y J. Casas, 1982. Mineralogical composition of salt efflorescences in a typical Salorthid, Spain. *Geoderma* 28: 39-51.
- Lavado, R.S. y N.B. Reinaudi, 1986. Wind-blown dust from salty areas. A source of fluoride in plants. *Fluoride* 19, 14-18.
- Mc Intyre, D.S., 1982. Capillary rise from saline groundwater in clay soil cores. *Austr. J. of Soil Res.* 20: 305-313.
- Nakayama, F.S.; R.D. Jackson; B.A. Kimball y R.J. Reginato, 1973. Diurnal soil water evaporation: chloride movement and accumulation near the soil surface. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 509-513.
- Pakshina, S.M., 1972. Effect of the electrokinetic properties of soil on the transport of chlorides. *Soviet Soil Sci.* No 4: 352-356.
- Pakshina, S.M.; E.N. Esafova; P.M. Sapozhnikov y Yu. A. Matroshilov, 1981. Effect of hydrophobic interlayers on evaporation of water and transport of salts in southern chernozems. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* 36: 40-44.
- Qayyum, M.A. y W.D. Kemper, 1962. Salt concentration gradients in soils and their effects on moisture movement and evaporation. *Soil Sci.* 93: 333-342.
- Scotter, D.R. y P.A.C. Raats, 1970. Movement of salt and water near crystalline salt in relatively dry soil. *Soil Sci.* 109: 170-178.
- Tood, R.M. y W.D. Kemper, 1972. Salt dispersion coefficients near an evaporating surface. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 539-543.
- Weeks, L.V.; S.J. Richards y J. Letey, 1968. Water and salt transfer in soil resulting from thermal gradients. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 193-197.
- Whittig, L.D.; A.E. Deyo y K.K. Tanji, 1982. Evaporite mineral species in Mancos Shale and salt efflorescence, Upper Colorado River Basin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 645-651.