

UNA DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DE VOLOBUYEV DE LA LÁMINA DE LAVADO DE SALES EN EL SUELO

Carlos Fuentes^{1*}; Carlos Chávez²; Rodolfo Namuche¹; Fernando Brambila³; Antonio Quevedo¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Seguridad Hídrica. Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8530, col. C.P. 62550, Progreso, Jiutepec, Morelos, México.
cfuentes@tlaloc.imta.mx (*Autor de correspondencia)

²Centro de Investigaciones del Agua, Departamento de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas SN, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, México.

³Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias, Ciudad Universitaria. C.P. 04510. Ciudad de México. México.

Resumen

En los últimos años, el notable incremento en la población ha llevado a la expansión de áreas dedicadas a la agricultura. No obstante, esta expansión, junto con prácticas inadecuadas de manejo y el uso excesivo de agua, ha resultado en un aumento progresivo de la salinidad del suelo, lo que ha afectado negativamente el rendimiento de los cultivos. Para combatir la acumulación de sales en el suelo, se han desarrollado diversas estrategias, que incluyen el uso de productos químicos, la implementación de plantas resistentes a la sal y métodos que combinan varias técnicas. Entre estas estrategias, una solución eficaz para la eliminación de sales en el suelo es el uso de láminas de lavado, cuya cantidad se determina mediante la ecuación de Volobuyev. Este estudio presenta la deducción de la ecuación de Volobuyev para calcular la lámina de lavado de sales, utilizando la ecuación de transferencia de agua tipo Fokker-Planck, la ecuación de transporte de solutos y la ley de Ohm, bajo la suponiendo flujo constante y un perfil uniforme. Además, al final del documento se propone una fórmula alternativa para calcular el lavado en suelos con perfiles heterogéneos. La aplicación adecuada de estos métodos es crucial para mantener la productividad agrícola y asegurar la sostenibilidad en la gestión de recursos hídricos.

Palabras claves: Flujo permanente, ecuación Fokker Planck, Ley de Ohm.

Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento acelerado de la población ha tenido una repercusión en la expansión de la superficie destinada a la producción de alimentos (Measho *et al.*, 2022). Sin embargo, el riego sin control y el uso de agua salinas para irrigar los cultivos han provocado que al menos una tercera parte de esta superficie tenga problemas de salinidad (Kulmatov, 2021; Khasanov, 2022).

Diversos estudios han demostrado que el ensalitramiento progresivo de los terrenos agrícolas tiene una repercusión en la germinación, el desarrollo de los cultivos, disminuye el rendimiento y afecta negativamente la estructura del suelo (Hafez *et al.*, 2021; Shaygan y Baumgartl, 2022). Además, el aumento de la salinidad está fuertemente asociada con la disminución de la velocidad de la infiltración y aireación del suelo (So, 1993), dando como resultado la expansión de las arcillas y el sellamiento superficial (Ben Huur, 2009). Sin embargo, para poder cumplir las necesidades alimenticias de la población es necesario buscar alternativas para recuperar los suelos afectados por las sales (Shaygan y Baumgartl, 2022).

En la actualidad existen varios métodos desarrollados para reducir la cantidad de sal presente en el perfil del suelo que incluyen el lavado de los suelos, adicción de mejoradores químicos, materia orgánica y reforestación con plantas halófitas (Mahmoodabadi, 2013; Arnol *et al.*, 2014, Shaygam, 2017), pero no todos los métodos son eficientes para la mayoría de las tierras agrícolas, por lo que se requiere en la mayoría de los casos del uso de uno o más métodos combinados (Shaygan y Baumgartl, 2022).

El lavado de los suelos mediante láminas de agua pesadas es uno de los métodos ampliamente utilizados para la recuperación de los suelos salinos (Harker, 1990; Shaw, 1985), siendo la ecuación empírica de Volobuyev (1974, 1975) la que ha dado mejores resultados (Mikayilov, 2012; Nikolskii-Gavrilov, 2014; FAO, 2018; Khojiyev *et al.*, 2020; Mukhammadkhon, 2023).

La fórmula de Volobuyev del lavado de sales en una columna de suelo saturada de agua obtenida de manera empírica es la siguiente:

$$\ell = \alpha \log \left(\frac{CE_0}{CE} \right) \quad (1)$$

donde log es el logaritmo decimal, ℓ es la lámina de agua, con un contenido de sales despreciable, adicionada a la columna del suelo de longitud L con un contenido inicial de sales estimado por la conductividad eléctrica CE_0 para llevar el contenido de sales a una conductividad eléctrica CE, tal que $CE \leq CE_0$, y α es un parámetro empírico con unidades de lámina de agua para una longitud dada que depende del tipo de suelo.

Si α se considera adimensional la lámina de lavado se refiere a un metro de columna de suelo. En el Cuadro 1 se presentan algunos valores de α (adimensional) para suelos de distinta textura a diferentes contenidos de cloruros en porcentaje.

Cuadro 1. Valores del parámetro α en la fórmula de Volobuyev, considerado adimensional.

TEXTURA	CONTENIDOS DE CLORUROS (%)			
	40-60	20-40	10-20	<10
Pesada	1.22	1.32	1.42	1.78
Media	0.92	1.02	1.12	1.48
Ligera	0.62	0.72	0.82	1.18

La conductividad eléctrica, expresada en las unidades de mmhos/cm o en su equivalente en dS/m, donde dS es la abreviación de decisiemens. En el Cuadro 2 se muestran algunos rangos de valores de la conductividad eléctrica de acuerdo con una clasificación de suelos según su salinidad.

Cuadro 2. Rangos de valores de la Conductividad eléctrica en el extracto de saturación de acuerdo a una clasificación del suelo por salinidad.

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL EXTRACTO DE SATURACIÓN (DS/M)
No salino	0-2
Ligeramente salino	2-4
Moderadamente salino	4-8
Salino	8-16

Una deducción aproximada de la Fórmula de Volobuyeb

El movimiento del agua en una columna vertical de suelo puede ser descrito por la ecuación de continuidad y la ley de Darcy (1856) escritas como sigue:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad ; \quad q(z,t) = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \quad (2)$$

cuya combinación conduce a la ecuación tipo Fokker-Planck para un suelo homogéneo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{dK}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (3)$$

donde $\theta = \theta(z,t)$ es el contenido volumétrico de agua, $q(z,t)$ el flujo de Darcy, z la coordenada vertical orientada positivamente hacia abajo, t el tiempo, $D(\theta) = K(\theta) d\psi/d\theta$ la difusividad hidráulica, $K(\theta)$ la conductividad hidráulica y $\psi(\theta)$ es la presión expresada como la altura equivalente de una columna de agua, negativa en la zona no saturada y positiva en la zona saturada.

Bajo la consideración de que existe un régimen permanente $\partial\theta/\partial t = 0$ y $\partial\theta/\partial z = 0$, el contenido volumétrico de agua es independiente de la posición y el tiempo, de la ecuación **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se deduce que el flujo de Darcy es el mismo a lo largo de la columna y para todo tiempo $q(z,t) = K(\theta)$.

En particular, en una columna de suelo saturado $\theta(z,t) = \theta_s$, donde θ_s es el contenido volumétrico de agua a saturación; cuando no queda aire atrapado en los poros del suelo $\theta_s = \phi$, con ϕ la porosidad volumétrica total del suelo. Se tiene que:

$$q(z,t) = K_s \quad (4)$$

donde $K_s = K(\theta_s)$ es la conductividad hidráulica a saturación.

La lámina de agua infiltrada a partir del tiempo inicial $t = 0$ en la superficie de la columna es proporcionada por:

$$I(t) = \int_0^t v_i(\tau) d\tau \quad (5)$$

donde $v_i(t) = q(0,t)$ es la velocidad de infiltración.

De acuerdo con la ecuación **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se tiene:

$$I(t) = K_s t \quad (6)$$

Por otra parte, el transporte de solutos en una columna de suelo puede ser descrito por la ecuación de continuidad y la ley de Fick, escritas como sigue:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial z} + T_s \quad ; \quad q_f(z,t) = -D_s(C) \frac{\partial C}{\partial z} \quad (7)$$

cuya combinación conduce a la ecuación de difusión, también tipo Fokker-Planck, para un suelo homogéneo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_s(C) \frac{\partial C}{\partial z} \right] + T_s \quad (8)$$

donde $C = C(z,t)$ es la concentración del soluto en el agua del suelo, $q_s(z,t)$ el flujo de Fick, $D_s(C)$ es el coeficiente de difusión del soluto y $T_s(z,t)$ es un término de fuente o sumidero.

En el caso del lavado de las sales $\partial C/\partial z = 0$, la concentración se supone igual a lo largo de la columna. T_s es un término de sumidero ya que las sales en el agua del suelo se transportan

al agua que se está adicionando, la cual contiene un contenido despreciable de sales. Generalmente este término se supone proporcional a la concentración (denominado proceso de Markov de segundo orden) quedando la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** como sigue:

$$\frac{dC}{dt} = -\mu_L C \quad (9)$$

donde $\mu_L = 1/\tau_c$ es un coeficiente igual al recíproco de un tiempo característico (τ_c) del decaimiento de la concentración de las sales, que depende del tipo de suelo y de la longitud de la columna.

La integración de la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** considerando la concentración inicial de sales igual a $C = C_0$ en $t = 0$, con $C \leq C_0$, conduce a:

$$\mu_L t = \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad (10)$$

La ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** permite calcular el tiempo para llevar el agua de la columna con una concentración inicial de sales $C = C_0$ a una concentración C .

La ley de Ohm establece que la intensidad de la corriente eléctrica (J) es directamente proporcional a la diferencia de voltaje (V) entre dos puntos de un conductor en una unidad de longitud dada e inversamente proporcional a la resistencia que este opone (R) al flujo de la corriente. Las unidades se expresan respectivamente en amperio (A), en voltio (V) y en ohmio (Ω).

La ley quedaría escrita como $J = V/R$. Sin embargo, siguiendo a Kirchhoff, se puede escribir como $J = (CE)V$, donde la conductividad eléctrica (CE) es el recíproco de la resistencia eléctrica y se mide en mho (el recíproco de ohm) por unidad de longitud. Como el mho es una unidad muy grande es común utilizar mmhos/cm que es igual a dS/m.

Se ha demostrado que la concentración de sales en el agua es altamente proporcional a la conductividad eléctrica en la misma. Esto se puede escribir como:

$$C \cong \gamma CE \quad (11)$$

donde γ es un factor de proporcionalidad.

Cuando la conductividad eléctrica se expresa en dS/m y la concentración en partes por millón (ppm) el factor toma el valor aproximado $\gamma \cong 640$. Entonces de la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se deduce:

$$t = \frac{1}{\mu_L} \ln\left(\frac{CE_0}{CE}\right) = \tau_c \ln\left(\frac{CE_0}{CE}\right) \quad (12)$$

donde ahora $C \cong \gamma CE$ corresponde a la conductividad eléctrica asociada a la concentración de sales del agua.

Ahora bien, si consideramos que t representa el tiempo para reemplazar el agua con sales con una lámina de agua y llevarla a una conductividad eléctrica dada, la combinación de las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, permiten obtener la expresión de la lámina total de lavado (ℓ) en función de la conductividad eléctrica:

$$\ell = \alpha_v \ln\left(\frac{CE_0}{CE}\right) \quad ; \quad \alpha_v = K_s / \mu_L = K_s \tau_c \quad (13)$$

Esta fórmula corresponde a la de Volobuyev, ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en logaritmo natural. Y para pasarla a logaritmo decimal se debe hacer la conversión: $\alpha_v = \alpha / \ln(10) \cong 0.434\alpha$

El parámetro α_v en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** así como el parámetro α en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de Volobuyev tienen unidades de longitud y por tal razón el valor de este último se ha referido a un metro de longitud de columna. Esta restricción puede ser eliminada si se parametriza de manera explícita la longitud de la columna como $\alpha_v = \beta L$, donde β es un parámetro adimensional que dependerá del tipo de suelo, se tiene:

$$\ell = \beta L \ln\left(\frac{CE_0}{CE}\right) \quad ; \quad \mu_L = K_s / \beta L \quad (14)$$

El parámetro original de Volobuyev α queda definido por $\alpha = \beta L \ln(10) \cong 2.303\beta L$. Nótese que de hecho se tiene la siguiente relación entre los parámetros: $\beta L = K_s \tau_c$.

Finalmente, para una columna de suelos compuesta por n estratos la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** puede ser adaptada para el cálculo de la lámina total de lavado de sales:

$$\ell = \sum_{i=1}^n \ell_i = \sum_{i=1}^n \beta_i L_i \ln\left(\frac{CE_{0i}}{CE_i}\right) \quad ; \quad L = \sum_{i=1}^n L_i \quad (15)$$

donde $i = 1, 2, \dots, n$, ℓ_i es la lámina de lavado correspondiente al estrato de espesor L_i , L la longitud total de la columna, CE_{0i} es la conductividad eléctrica inicial por estrato, CE_i la conductividad eléctrica a la que se debe llevar las sales en cada estrato y β_i el parámetro adimensional que corresponde a cada estrato.

Conclusiones

La desalinización de los terrenos agrícolas es un proceso dinámico que depende de factores como la textura del suelo, la profundidad y los horizontes presentes. De los diversos métodos empleados para recuperar los suelos ensalitrados, el lavado es uno de los más empleados en la agricultura por los resultados obtenidos y lo económico que resulta al no aplicar insumos que sean costosos. En este trabajo, se presentó una deducción de la fórmula de Volobuyev de la lámina de lavado de las sales, obtenida de manera empírica para un suelo con perfil homogéneo. Finalmente, se propone una fórmula para calcular la lámina de lavado en suelos con perfiles heterogéneos, en donde la lámina de lavado total es función de la conductividad eléctrica inicial de cada estrato, la conductividad eléctrica a la que se quiera llevar en cada estrato, el espesor de cada es-trato y un parámetro adimensional.

Referencias Bibliográficas

- Khojiyev, A., T. Khaydarov, N. Rajabov and J Pulatov. (2020). Optimal solution leaching rates with a deficit of irrigation water. *Mater.* doi:10.1088/1757-899X/883/1/012091
- Arnold, S.; Kailichova, Y.; Baumgartl, T. (2014). Germination of *Acacia harpophylla* (Brigalow) seeds in relation to soil water potential: Implications for rehabilitation of a threatened ecosystem. *PeerJ*, 2, e268.
- Ben-Hur, M.; Yolcu, G.; Uysal, H.; Lado, M.; Paz, A. (2009). Soil structure changes: Aggregate size and soil texture effects on hydraulic conductivity under different saline and sodic conditions. *Aust. J. Soil Res.*, 47, 688–696.
- Darcy, H. (1856). Détermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable. In *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris. pp. 590-594.
- FAO. (2018). Handbook for saline soil management. Editors: R. Vargas, E.I. Pankova, S.A. Balyuk, P.V. Krasilnikov and G.M. Khasankhanova.
- Hafez, E.M.; Omara, A.E.D.; Alhumaydhi, F.A.; El-Esawi, M.A. (2021). Minimizing hazard impacts of soil salinity and water stress on wheat plants by soil application of vermicompost and biochar. *Physiol. Plant*, 172, 587–602.
- Harker, D.; Mikalson, D. (1990). Leaching of a highly saline-sodic soil in southern Alberta: A laboratory study. *Can. J. Soil Sci.*, 70, 509–514.
- Khasanov, S.; Li, F.; Kulmatov, R.; Zhang, Q. (2022). Evaluation of the perennial spatio-temporal changes in the groundwater level and mineralization, and soil salinity in irrigated lands of arid zone: As an example of Syrdarya Province, Uzbekistan. *Agric. Water Manag.*, 263, 107444.
- Kulmatov, R.; Khasanov, S.; Odilov, S.; Li, F. (2021). Assessment of the space-time dynamics of soil salinity in irrigated areas under climate change: A case study in sirdarya province, Uzbekistan. *Water Air Soil Pollut.*, 232, 1–13.
- Mahmoodabadi, M.; Yazdanpanah, N.; Sinobas, L.R.; Pazira, E.; Neshat, A. (2013). Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agric. Water Manag.*, 120, 30–38.
- Measho, S.; Li, F.; Pellikka, P.; Tian, C.; Hirwa, H.; Xu, N.; Qiao, Y.; Khasanov, S.; Kulmatov, R.; Chen, G. (2022). Soil Salinity Variations and Associated Implications for Agriculture and Land Resources Development Using Remote Sensing Datasets in Central Asia. *Remote Sens.*, 14, 2501.

- Mikayilov, F.D. (2012). Analysis of solutions of the equation for the convective diffusion of ions in soil. *Eurasian Soil Sc.*, 45, 408–415.
- Khamidov, M., & Khamraev, K. (2023). Modern salinity leaching technology of agricultural land reclamation (A case study from Bukhara region, Uzbekistan). *E3S Web of Conferences*.
- Nikolskii-Gavrilov. (2014). Evaluation of Soil Fertility Indices of Freshwater Irrigated Soils in Mexico Across Different Climatic Regions.
- Shaw, R.J.; Thorburn, P.J. (1985). Prediction of leaching fraction from soil properties, irrigation water and rainfall. *Irrig. Sci.* 1985, 6, 73–83.
- Shaygan, M.; Baumgartl, T. (2022). Reclamation of Salt-Affected Land: A Review. *Soil Syst.* 6, 61.
- Shaygan, M.; Reading, L.P.; Baumgartl, T. (2017). Effect of physical amendments on salt leaching characteristics for reclamation. *Geoderma*, 292, 96–110.
- So, H.; Aylmore, L. (1993). How do sodic soils behave—The effects of sodicity on soil physical behavior. *Soil Res.*, 31, 761–777. [CrossRef]
- Volobuev, V.R., (1975). Calculation of Water Rates to Leach Saline Soils(Kolos, Moscow) [in Russian]
- Volobuev, V. R. (1974). Introduction into the Energy of Soil Formation. Nauka Publ., Moscow, USSR [in Russian].