

Ra Ximhai

Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo
Sustentable

Ra Ximhai
Universidad Autónoma Indígena de México
México

2010

**ESTIMACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE
FINOS A PARTIR DE LEYES EXPERIMENTALES QUE RELACIONAN
PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y ELÉCTRICOS**

Héctor José Peinado-Guevara; Carlos René Green-Ruiz; Omar Delgado-Rodríguez;
Jaime Herrera-Barrientos; Salvador Belmonte-Jiménez; María de los Ángeles Ladrón de
Guevara Torres y Vladimir Shevnin.

Ra Ximhai, septiembre-diciembre, año/Vol. 6, Número 3

Universidad Autónoma Indígena de México

Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 469-478.



ESTIMACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE FINOS A PARTIR DE LEYES EXPERIMENTALES QUE RELACIONAN PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y ELÉCTRICOS

ESTIMATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND CONTENT OF FINES FROM EXPERIMENTAL LAWS THAT CORELATE HYDRAULIC AND ELECTRIC PARAMETERS

Héctor José Peinado-Guevara¹; Carlos René Green-Ruiz²; Omar Delgado-Rodríguez⁴; Jaime Herrera-Barrientos⁴; Salvador Belmonte-Jiménez⁵; María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres⁵ y Vladimir Shevnin⁶.

¹Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, C.P. 04510 México, Distrito Federal y ECEA-UAS, Carretera a las Glorias, Guasave, Sinaloa, México; ²Inst. de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Av. Joel Montes Camarena s/n, C.P. 82040, Mazatlán, Sin. México; ³Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, San Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero, 07730, Distrito Federal; ⁴CICESE, km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada C.P. 22860, Ensenada, B.C. México; ⁵CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca, México, sbelmont@prodigy.net.mx; ⁶Lomonosov Moscow State University, Geological faculty, Moscow, Rusia., Vorobiev Gory, MSU, Phone: (095)939-2970.

RESUMEN

La conductividad hidráulica es un elemento básico en el avance del conocimiento de un medio geológico, tanto en los procesos de flujo y transporte de contaminantes como en proyectos de protección, gestión y manejo del medio ambiente, así como en el desarrollo de políticas públicas para la protección de ecosistemas, entre otros. El objetivo de este trabajo es obtener la conductividad hidráulica (K) y el contenido de finos (C) de un medio saturado granular mediante el uso de dos leyes empíricas. Una relaciona la conductividad eléctrica de un medio granular saturado σ_0 y el agua saturante σ_w la cual depende del factor de formación (F), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y del contenido de finos en el subsuelo saturado. A través de datos obtenidos de 18 muestras de materiales de 6 pozos se obtuvo la relación entre F-C y CIC-C y $Q_v - C$, de forma que la ecuación se reduce a una función de σ_0 en términos de σ_w y C, con un valor de ajuste $R=0.97$. Una segunda ley experimental usada es la que resulta de la relación experimental entre K y C, obteniéndose

$K = 0.1804 \cdot C^{1.4054}$ con un $R=0.96$. De ambas expresiones experimentales se construyen relaciones entre K y C, Fa y C, Q_v y C, de forma que, de cada par conociendo una se obtiene la otra. Bajo el esquema indicado se obtienen secciones de conductividad eléctrica del medio saturado y contenido de finos, obteniéndose que el subsuelo en el área de estudio está constituido por una capa superior de materiales finos e infrayaciendo a éste está un medio en el que predominan las arenas.

Palabras Claves: Conductividad hidráulica, Contenido de finos, Resistividad eléctrica, Factor de Formación, Porosidad, Tomografía eléctrica.

SUMMARY

Hydraulic conductivity is a basic element in the advancement of knowledge of a geological environment in both the flow and transport processes of pollutants for conservation projects, management

and environmental management and also for the development of public policies for protection of ecosystems, among others. The aim of this paper is to obtain the hydraulic conductivity (K) and the fines content (C) of saturated granular half using two empirical laws. One correlates the electrical conductivity of saturated granular media σ_0 and water saturated σ_w which depends on the formation factor (F), cation exchange capacity (CEC) and the fines content in the saturated soil. Using data obtained from materials of 18 samples from 6 wells the relationships between F-C and CEC-C were obtained, so the equation reduces to a σ_0 function in terms of σ_w and C, with a correlation coefficient of $R = 0.97$. A second experimental law is the one that results from the experimental relationship between K and C,

being $K = 0.1804 \cdot C^{1.4054}$ with a correlation coefficient of $R = 0.96$. From both experimental expressions relationships between K and C, Fa and C, Q_v and C are created so from every pair knowing one of them you get to know the other one. Under the scheme outlined electrical conductivity sections for the saturated medium and fines content are obtained, finding that the groundwater in the study area consists of a thin top layer and beneath it there is a predominantly sandy environment.

Keywords: Hydraulic conductivity, fines content, electrical resistivity, formation factor, porosity, electrical tomography.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la conductividad hidráulica (K), tanto saturada como no saturada, es necesario como dato inicial en modelos numéricos para predecir el comportamiento del flujo del agua o fluidos a través del suelo (Rojas *et al*, 2008) el cual depende de las características de la matriz y del fluido contenido en el suelo.

principalmente controlado por la porosidad

El conocer el valor de la conductividad hidráulica es importante en acciones como la explotación y gestión de agua potable y riego, así como en la definición de perímetros de protección de las captaciones, en modelos de simulación y de gestión orientados a plantear regulaciones de los sistemas de explotación y monitoreo de las aguas subterráneas. Es de gran relevancia en la realización de modelado numérico (problema directo e inverso) de flujo y transporte. Además, se puede destacar su empleo en estudios tanto de calidad como de contaminación de las aguas subterráneas, estudios de contaminación ya sea puntual o difusa, almacenamiento de residuos y descontaminación de acuíferos entre otras (Donado-Garzón, 2004).

Existen diferentes métodos para determinar las propiedades físicas e hidráulicas de suelos, lo que permite evaluar la eficiencia predictiva de esas funciones en determinados lugares (Landini *et al*, 2007). Existen métodos directos e indirectos para determinar la conductividad hidráulica, los métodos eléctricos se encuentran entre los indirectos. En algunas publicaciones se muestran relaciones entre el cociente de la resistividad del espesor saturado y la resistividad del agua de la formación denominado factor de formación aparente (F) con la conductividad hidráulica (K) (Yadav y Abolfazli, 1998; Salem, 2001; Vidal-Méndez, 2008; Peinado-Guevara *et al*, 2009), las cuales han sido obtenidas a través de la experimentación en diversos ambientes geológicos, sin embargo, estas no consideran la textura de los suelos.

En general, estas relaciones son empíricas y semi-empíricas, limitándose por lo general solo al lugar de estudio, teniendo una correlación positiva en algunos estudios y negativos en otros. Así como la corriente eléctrica sigue en su viaje la ruta de menor resistencia eléctrica al pasar por un medio, igual sucede con el agua. Dentro y alrededor de los poros, el modelo de conducción de electricidad es iónico y, por tanto, la resistividad del medio está

y la conductividad del agua más que por la resistividad de la roca matriz. Así, en el poro, el flujo eléctrico es similar al hidráulico y la ruta de resistividad debería reflejar la conductividad hidráulica (Khalil y Monterio, 2009).

El contenido de arcilla influye sobre la conductividad hidráulica y es un importante factor de relación entre parámetros geofísicos y conductividad hidráulica para sedimentos no consolidados (Shevnin *et al*, 2006).

El objetivo de presente trabajo es, mostrar la funcionalidad de un modelo que permite la estimación de K y contenido de finos a partir de mediciones de resistividad eléctricas en campo y en laboratorio, siendo este método más rápido y menos costoso que la realización de perforaciones para obtener muestras para su posterior análisis.

Descripción del área estudiada

El área de estudio se encuentra en el municipio de Guasave, Sinaloa, México, entre las coordenadas 25° 34' 37" y 25° 36' 59.8" de latitud norte y de 108° 26' 49.9" a 108° 28' 57" de longitud oeste (ver figura 1), abarca una superficie de 15.42 km², yace sobre un acuífero sedimentario costero constituido principalmente por gravas, arenas, limos y arcillas, productos de la erosión del flanco occidental de la Sierra Madre Occidental (CNA, 2002). Los suelos son de origen aluvial cuaternario, siendo su clima seco y cálido, con una temperatura media anual de 25.4°. La precipitación media anual en la estación Guasave es de 449.0 mm considerando el periodo 1986- 2005. (INEGI, 2007).

En el área de estudio la presencia de arcilla es mínima en comparación a los limos y arenas debido a la cercanía del río

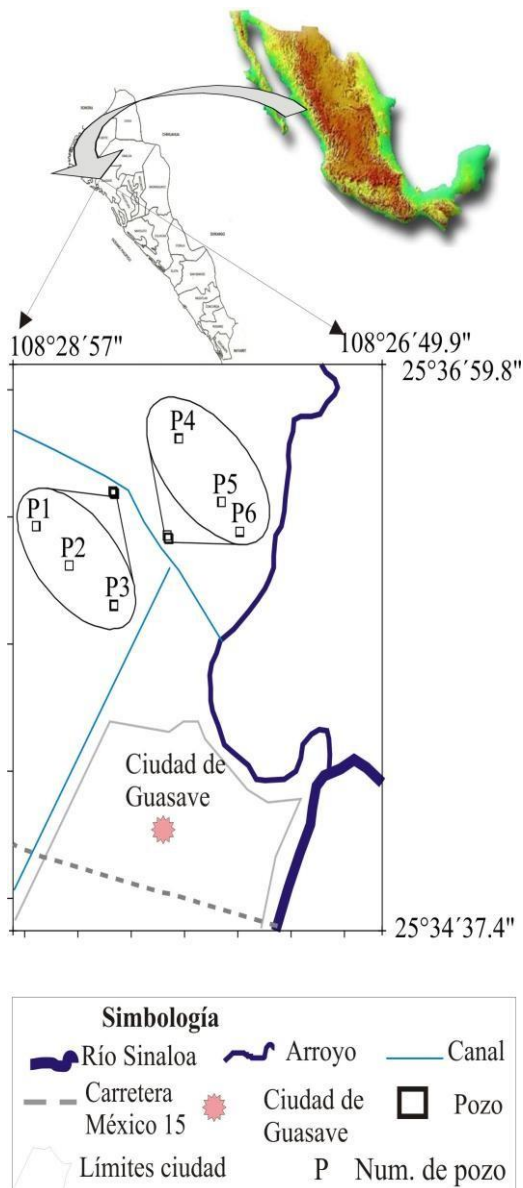


Figura 1. Localización del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron seis perforaciones de 4 metros de profundidad (ver figura 1) las cuales fueron georeferenciadas mediante un GPS portátil eTrex H marca Garmin y se obtuvo una muestra de agua en cada pozo para determinar su conductividad eléctrica con un equipo Hanna HI98130. Del total de los pozos se obtuvieron 18 muestras de suelo (de 2 a 4 por cada pozo) con el objetivo de determinar sus características petrofísicas y texturales en laboratorio.

Las muestras de suelo colectadas en campo fueron sometidas a un proceso de secado y homogeneizado, a las que se les determinó la textura (limos, arenas y arcillas) por el procedimiento de Bouyoucos. La porosidad y conductividad hidráulica se obtuvo mediante los procedimientos señalados por Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (1999). Para el caso de la conductividad hidráulica se utilizó un permeámetro de carga variable. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se obtuvo con acetato de amonio de acuerdo al procedimiento descrito en el manual para análisis de suelos y aguas de SARH (1974).

Cada muestra de suelo se divide en cinco porciones iguales y se coloca cada una de ellas en un resistivímetro, como el propuesto por Shevvin *et al.* (2004), añadiéndosele agua a temperatura conocida y a cierta concentración hasta su saturación al 100%. La temperatura es la ambiental y la concentración del agua varía de 0.1 a 80 g l⁻¹.

El resistivímetro consiste en un recipiente plástico en forma de paralelepípedo. En cada sección menor del recipiente fue colocado un electrodo de corriente I (electrodos A y B), los cuales están conectados a un equipo de resistividad. En cada sección mayor se coloca un electrodo de medición de potencial (M y N) para la obtención de las mediciones de diferencia de potencial (ΔV), las que son registradas en el medidor del equipo de resistividad. El valor de resistividad (ρ) de la porción de la muestra de suelo en cada resistivímetro es determinado mediante la expresión:

$$\rho = \kappa \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Donde κ es un factor de calibración que incluye la geometría del resistivímetro y la posición de los electrodos. Para la obtención de mediciones confiables el valor de κ

Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y eléctricos

Para determinar el comportamiento de la resistividad en profundidad se realizó un perfil de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) a partir de sondeos eléctricos verticales (SEV) en cada sitio perforado, para ello se utilizó el arreglo tetraelectródico Schlumberger, obteniéndose 11 valores de resistividad por SEV, ya que la separación entre electrodos fue de 2 m y la abertura máxima de inyección de corriente AB/2 fue de 20 m.

Se obtuvo una relación empírica entre la conductividad hidráulica y el contenido de finos basado en la fórmula empírica propuesta por Shevnin *et al.* (2006) para medios granulares, la cual es de la forma:

$$K = A * C^m \quad (2)$$

Donde K es el coeficiente de filtración en (m día⁻¹), C es el contenido de finos, A y m son constantes.

Considerando que el medio de estudio es granular y hay presencia de arcillas las cuales contribuyen al valor de la conductividad eléctrica del medio saturado, la magnitud de la porosidad y el factor de formación se utilizó la ley empírica de Sen *et al* (1988) la cual considera el efecto de las arcillas en la conductividad del medio saturado a través de su capacidad de intercambio catiónico, porosidad y factor de formación. Dicho autor para encontrar la ley empírica primero desarrolló un modelo matemático y vía extrapolación lo aplicó en muestras de pozos. Dicha ley empírica relaciona la conductividad eléctrica del medio saturado (σ_o) con la conductividad eléctrica del agua de saturación (σ_w), factor de formación (F), porosidad (ϕ) y la capacidad de intercambio catiónico mediante.

$$\sigma_o = \frac{1}{F} \left(\sigma_w + \sigma_w \frac{A Q_v}{\sigma_w + B Q_v} \right) + E Q_v \quad (3)$$

Donde A, B y E son constantes y la variable Q_v puede ser expresada en términos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la densidad de la matriz del medio saturado y el contenido de finos (C), mediante la siguiente expresión.

$$Q_v = C \cdot CIC(1 - \phi) / \phi \quad (4)$$

Archie (1942) definió el factor de formación (F) mediante la relación entre la resistividad de la arena saturada por salmuera (R_o) y la salmuera (R_w)

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (5)$$

Cuando los materiales no son arenas limpias, es decir, que contienen limos y arcillas, el cociente indicado de la resistividad de la formación saturada de agua (R_o) y la resistividad del agua de la formación (R_w) recibe el nombre de factor de formación aparente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de la textura de las 18 muestras, correspondientes a 6 perforaciones, se encontró que en el 52.8% de corresponde a arenas, el 31.9% a limos y en menor porcentaje arcillas con un 15.3%.

En el cuadro 1 se muestra, las texturas de acuerdo a la técnica de Bouyoucos, su correspondiente conductividad hidráulica, porosidad y CIC. Obsérvese que los valores de K coinciden con la clasificación propuesta por Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (1999), quienes indican que para arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de arena, limo y arcilla y depósitos de arcilla, les corresponde una K comprendida entre 8.64×10^{-5} y 0.864 mdía⁻¹ y para arenas limpias, mezcla de grava y arenas limpias el rango de K oscila entre 0.864 y 864 mdía⁻¹.

Cuadro 1. Datos de textura, conductividad hidráulica, porosidad y CIC en seis perforaciones.

Pozo	Profundidad (m)	% arena	% limo	% arcilla	% C	Kf (mdia ⁻¹)	Porosidad %	CIC (meq/100 gr)
P1	0-1	41.6	33.3	25.1	58.4	0.7516	47.2%	25.47
P1	1-1.4	58.9	40.0	1.1	41.1	0.6026	42.4%	17.80
P1	1.4-4	82.9	11.3	5.8	17.1	0.6668	38.5%	6.97
P2	0-1.8	18.0	30.0	52.0	82	0.0852	61.6%	29.61
P2	1.8-4	73.0	24.0	3.0	27	0.9757	44.2%	6.40
P3	0-1	30.9	20.0	49.1	69.1	0.3784	49.0%	24.17
P3	1-1.9	25.6	29.3	45.1	74.4	0.1506	55.6%	28.90
P3	1.9-4	83.6	13.3	3.1	16.4	3.0790	33.3%	6.13
P4	0-1.2	45.6	51.1	3.2	54.3	0.3855	41.7%	21.13
P4	1.2-1.7	54.9	41.8	3.2	45	0.4716	45.0%	17.80
P4	1.7-2.7	89.5	7.3	3.2	10.5	4.0416	32.8%	3.97
P5	0-1	48.0	46.0	6.0	52	1.1507	58.0%	28.19
P5	1-2.2	7.0	55.0	38.0	93	0.1614	54.0%	23.55
P5	2.2-4	93.0	1.0	6.0	7	7.7129	30.0%	3.97
P6	0-0.8	45.0	42.0	13.0	55	0.3987	45.0%	13.04
P6	0.8-1.3	35.5	59.3	5.2	64.5	0.2363	43.5%	15.79
P6	1.3-2	38.8	54.0	7.2	61.2	0.4302	41.0%	18.33
P6	2-3.4	78.8	16.0	5.2	21.2	2.3819	33.3%	4.40

La figura 2 muestra un ajuste exponencial entre K y C, en la que se observa que a medida que aumenta la concentración de finos disminuye la conductividad hidráulica, es decir, son inversamente proporcionales. El coeficiente de correlación del ajuste es de 0.965 y los coeficientes del ajuste A y m tienen los valores 0.1804 y -1.4054, respectivamente, esto para una ecuación de la forma

$$K = A.C^m$$

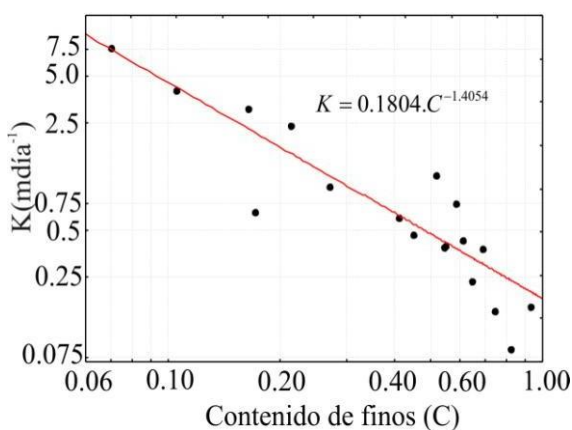


Figura 2. Relación entre conductividad hidráulica (K) y contenido de finos (C).

Para encontrar la relación entre la conductividad eléctrica tanto del agua de

saturación (σ_w) como de la formación saturada (σ_o) se obtienen mediante mínimos cuadrados las constantes A, B y E de la ecuación propuesta por Sen *et al* (1988), para ello se obtuvieron previamente el factor de formación, porosidad y CIC, mismos que se muestran en el cuadro 1.

Para obtener el factor de formación aparente (F), se tomó en cuenta la recomendación realizadas por Kirsch (2009) sobre las limitaciones de la ley de Archie, quien establece que a medida que la resistividad eléctrica de las muestras de suelo aumenta, la ley de Archie deja de ser válida. Este efecto se puede apreciar en la figura 3, donde se observa con línea discontinua la relación entre la resistividad de la formación y la del agua de saturación para cinco diferentes concentraciones del agua de la formación. Con línea negra se muestra la relación según la Ley de Archie. En base a este comportamiento se tomó como valor del factor de formación F el correspondiente a la resistividad del agua de saturación menor, ya que ésta se encuentra en la zona de validez de la Ley de Archie.

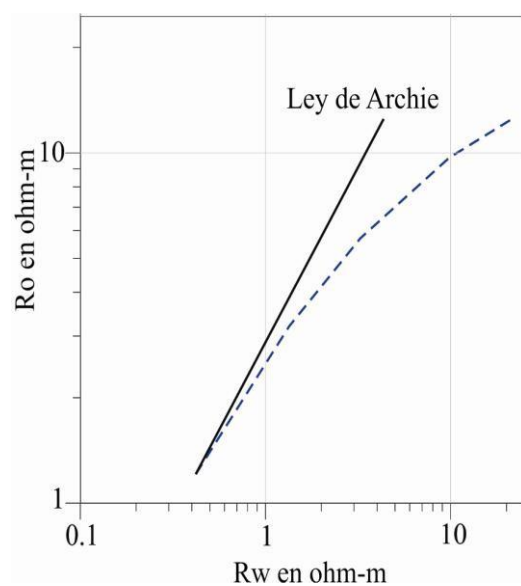


Figura 3. Comportamiento de la resistividad eléctrica de una muestra de pozo sujeta a diferentes resistividades del agua saturante.

En la figura 4, se muestra la relación entre el factor de formación aparente (F) y el

Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y eléctricos

contenido de finos (C), encontrando que existe un comportamiento exponencial de la forma $F = aC^m + b$, donde a, m y b son constantes que dependen del tipo de suelo y sus valores son 37.6549, -0.03924 y -35.273 respectivamente, con un valor de ajuste R=0.904.

$$F = 37.6549C^{-0.03924} - 35.273 \quad (6)$$

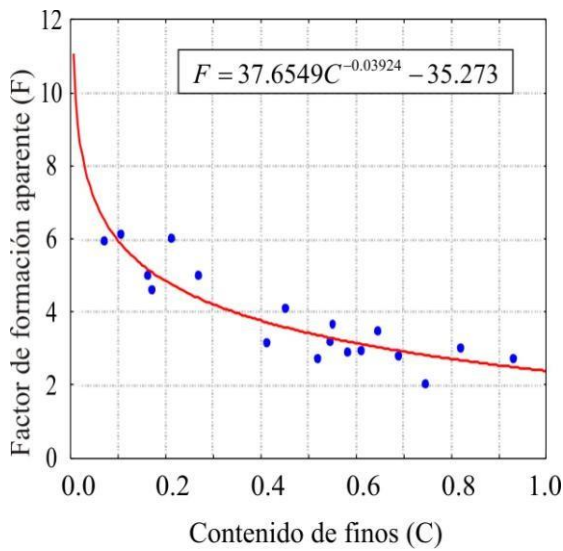


Figura 4. Relación entre el factor de formación aparente versus contenido de finos.

En la figura 5 se observa que la porosidad y contenido de finos son directamente proporcionales, es decir, en la medida en que aumenta el contenido de finos también aumenta la porosidad, por lo que el valor de ajuste es R=0.837 y la expresión correspondiente es:

$$\phi = 0.292524C + 0.304217 \quad (7)$$

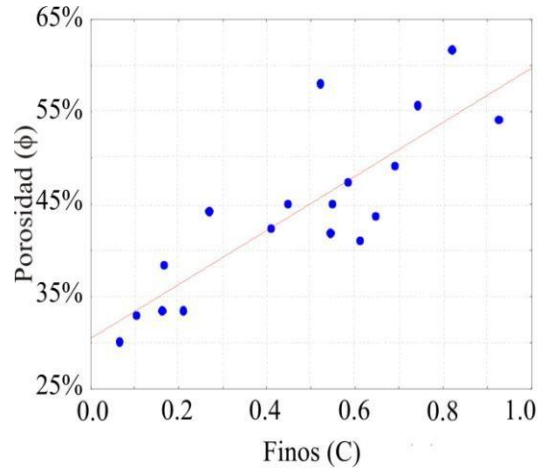


Figura 5. Comportamiento de la porosidad de las muestras de suelo a distintas concentraciones de finos.

La CIC y el contenido de finos guardan una relación lineal dada por:

$$CIC = 31.508C + 1.557 \quad (8)$$

Se obtuvo un ajuste R=0.87.

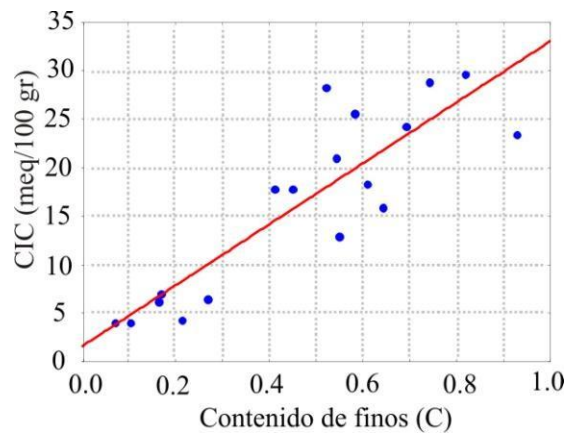


Figura 6. Relación entre CIC y contenido de finos.

Con los datos del cuadro 1 y mediante mínimos cuadrados se determinaron las constantes A, B y E, las cuales son 0.1540, 0.01611 y 0.07703 con una R=0.9766, de esta forma la ecuación (3) adquiere la forma.

$$\sigma_o = \frac{1}{F} \left(\sigma_w + \sigma_w \frac{(9)}{\sigma +} \right)_w + \frac{0.1540Q_v}{0.01611Q} \quad (9)$$

0
·
0
7
7
0
3
Q
v

σ_o (mScm^{-1}) en términos de resistividad eléctrica R_o ($\text{ohm}\cdot\text{m}$) se da mediante la expresión:

$$R_o = \frac{10}{\sigma_o} \quad (10)$$

En la figura 7 se observa la relación entre R_o y ϕ para diferentes contenidos de finos. La línea punteada vertical corresponde a la conductividad eléctrica promedio del agua acuífera de los pozos 4, 5 y 6 de 0.67 mScm^{-1} . En dicha figura se observa que la resistividad del medio saturado depende de la conductividad eléctrica del agua de saturación y del contenido de finos, disminuyendo aquella conforme aumenta ésta y, para una determinada conductividad eléctrica del agua de saturación la resistividad del medio acuífero disminuye conforme aumenta el contenido de finos.

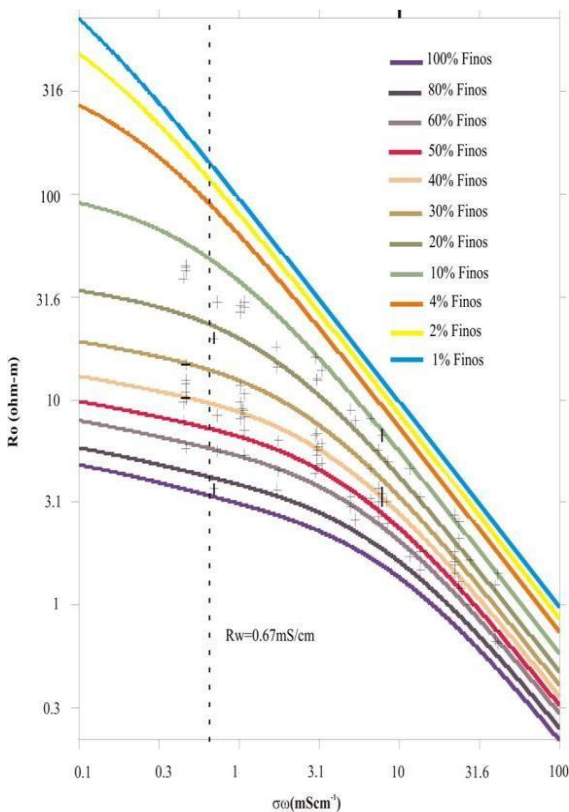


Fig. 7. Relación R_o versus σ_w para diferentes concentraciones de finos.

En la figura 8 se muestra una sección del subsuelo en la cual se puede observar la ubicación de tres pozos, la distribución del contenido de finos y de la conductividad hidráulica. Tanto en la sección b como en la c se aprecia la presencia de un medio arenoso a partir de los 2 metros de profundidad, por lo que en forma simplificada se puede decir que el subsuelo está conformado por una primera capa de materiales finos (predominantes en limos y arcillas) y una segunda que actúa como sustrato de la primera conformada predominantemente por arenas.

Una vez obtenidas las relaciones entre σ_o y σ_w en términos de C ; K y C ; F_a y C ; mediante datos de pozos. Estas tienen una aplicación práctica en la misma zona de estudio donde no hay pozo para obtener F_a , C , K o ϕ , para ello se determina en forma indirecta σ_o mediante la interpretación de datos de resistividad eléctrica obtenidos de secciones de tomografía de resistividad eléctrica que, en conjunto con los valores de σ_w de los pozos se obtienen los parámetros indicados de la manera siguiente: obtenida σ_o y conocida σ_w del gráfico de la figura 7 se determina el contenido de finos (C) y, a partir de ésta de la relación C - K (figura 2) se obtiene K , de la relación ϕ y C se puede obtener ϕ .

Bajo el esquema antes indicado se obtuvieron en el área de pozos las secciones del subsuelo de σ_o , C y K . La figura 9 muestra cada una de las secciones. La figura 9a obtenida mediante mediciones indirectas de la resistividad eléctrica de la formación saturada y la 8b obtenida por la relación de Sen *et al* (1988), son muy semejantes, ambas definen la primera y segunda capa descrita en párrafos anteriores. Respecto a las secciones de las figuras 9b y 9c las distribuciones de el contenido de finos y conductividad hidráulica, respectivamente corresponden a la relimitación de la primera y segunda capa, la primera compuesta por materiales predominantemente finos y la segunda subyacente por materiales predominantemente arenosos.

CONCLUSIONES

La determinación de la conductividad hidráulica y el contenido de limos mediante el uso de leyes empíricas en conjunto con los valores de la resistividad eléctrica del subsuelo (obtenida mediante tomografía eléctrica) y la resistividad del agua de la formación constituyen un medio útil y práctico para caracterizar los materiales del subsuelo en lugares del área de estudio donde no hay pozos.

La relación empírica de Sen permitió tomar en cuenta la presencia de arcillas y sus efectos en la conductividad eléctrica del subsuelo.

calculada.

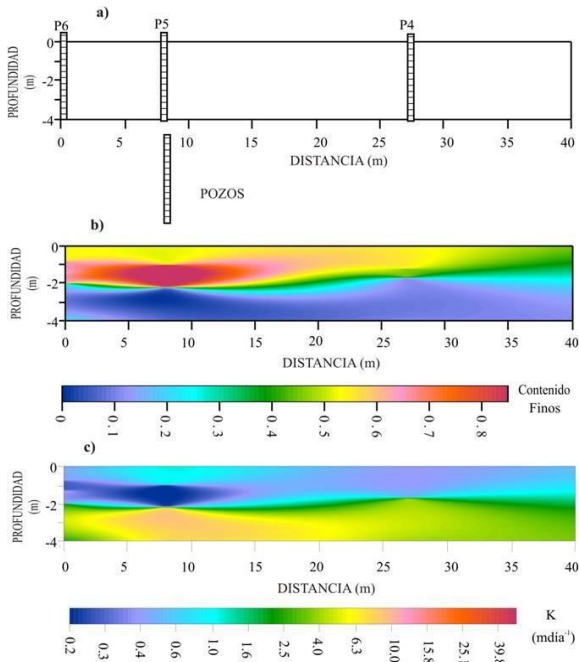


Figura 8. Secciones transversales. a) Localización de pozos; b) contenido de finos y c) conductividad hidráulica.

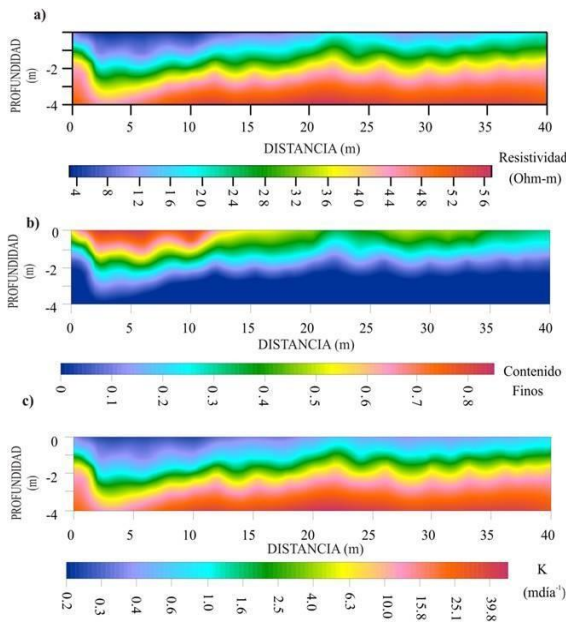


Figura 9. Secciones transversales del área comprendida por los pozos 4, 5 y 6. a) resistividad de la zona saturada obtenida por tomografía eléctrica; b) contenido de finos calculados y c) conductividad hidráulica

El subsuelo del área de estudio se caracterizó considerando la distribución de la conductividad eléctrica e hidráulica, así como la presencia de finos. Estas determinaciones permiten, además de la caracterización reducir la ambigüedad sobre el tipo de materiales y su distribución en el subsuelo. En el caso del área de estudio se delimitó la primera capa del subsuelo la cual tiene un grosor del orden de los dos metros, mismo que descansa sobre un medio predominantemente arenoso.

BIBLIOGRAFÍA

- Archie, G.E. 1942. **The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some reservoir characteristics.** Trans. AIMME. 146: 54-62.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. 2002. **Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Sinaloa.** México, D.F.: 36 pp.
- Donado-Garzón, L. D. 2004. **Modelo de conductividad hidráulica en suelos.** Tesis de magíster en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Colombia. 162. pp.
- Ersahin, S., Gunal, H., Kutlu, T., Yetgin, B. and Coban, S. 2006. **Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal of particle-size distribution.** Geoderma. 136: 588-597.
- INEGI. 2007. **Cuaderno estadístico municipal, Guasave, Sinaloa.** Aguascalientes, México, Edición 2006: 225 pp.

- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. 1999. **Mecánica de Suelos. Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos.** 3ra. Vigésimo primera reimpresión. Ed. Limusa. 642 pp.
- Khalil, M. A and Monterio-Santos F. A.. 2009. **Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity–Hydraulic Conductivity Relationship.** *Surveys in Geophysics.* 30(6):601-615.
- Kirsch, R. 2009. **Groundwater Geophysics. A tool for Hydrogeology.** 2nda. edición. Springer Berlin Heidelberg, Germany. 542 pp.
- Landini, A. M., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agnes, D. y Sainato, C. 2007. **Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura.** *C. Suelo (Argentina).* 25 (2): 123-131.
- Peinado-Guevara, H.; Herrera-Barrientos, J. y Ladrón de Guevara, M. 2009. **Determinación de la conductividad hidráulica mediante medidas de resistividad eléctrica.** *Ingeniería Hidráulica en México.* XXIV (4): 123-134.
- Rojas, L. M., Rojas-Palacio, H., Menjívar-Flórez, J. C. 2008. **Estimación de la conductividad hidráulica saturada in situ en un suelo tratado con vinaza.** *Acta Agron (Palmira).* 57 (2): 125-128.
- Salem, H.S. 2001. **Modelling of lithology and hydraulic conductivity of shallow sediments from resistivity measurements using Schlumberger Vertical Electric Soundings.** *Energy Sources.* 23: 599-618.
- SARH 1974. **Manual para análisis de suelos y aguas.** Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F. 241 pp.
- Sen, P.N., Goode, P.A., and Sibbit, A. 1988. **Electrical conduction in clay bearing sand-stone at low and high salinities.** *J. Appl. Phys.* 63: 4832-4840.
- Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A. and Ryjov, A. 2004. **Soil resistivity measurements for clay content estimation and its application for petroleum contamination study.** SAGEEP-2004, Colorado Springs: 396-408.
- Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A. and Ryjov, A. 2006. **Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data.** *Geofísica Internacional.* 45 (3): 195-207.
- Vidal-Méndez, E. 2008. **Cálculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de la resistividad eléctrica.** *Minería y Geología Revista de Ciencias de la Tierra, Cuba.* 24(2): 1-8.
- Yadav G.S. and H. Abolfazli, 1998. **Geoelectrical soundings and their relationship to hydraulic parameters in semiarid regions of Jalore, northwestern India.** *Journal of Applied Geophysics.* 39 (1): 35-51
- Héctor José Peinado Guevara**
Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, C.P. 04510 México, Distrito Federal y ECEA-UAS, Carretera a las Glorias, Guasave, Sinaloa, México. Correo electrónico: hpeinado75@hotmail.com.
- Carlos René Green Ruíz**
Inst. de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Av. Joel Montes Camarena s/n, C.P. 82040, Mazatlán, Sinaloa, México. Correo electrónico: cgreen@ola.icmyl.unam.mx.
- Omar Delgado Rodríguez**
Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, San Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero, 07730, Distrito Federal. Correo electrónico: odelgado@imp.mx.
- Jaime Herrera Barrientos**
CICESE, km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada C.P. 22860, Ensenada, B.C. México. Correo electrónico: jherrera@cicese.mx.
- Salvador Belmonte Jiménez**
CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca, México. Correo electrónico: sbelmont@prodigy.net.mx.
- María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres**
CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca, México.
- Vladimir Shevnin**
Lomonosov Moscow State University, Geological faculty, Moscow, Rusia., Vorobievsky Gory, MSU, Phone: (095)939-2970. Correo electrónico: Shevninv@rambler.ru.

Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y eléctricos

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se llevó a cabo con el apoyo del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México (UNAM), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y a la Comisión Nacional del Agua a través del distrito 063.