

Relaciones de dependencia entre parámetros geofísicos medios regionalizados e hidrodinámicos en acuíferos cársicos. Estudio de caso.

Dependence relationships among parameters geophysical means regionalizados and hydrodynamic in acuífer cársicos. I study of case.

Autor: Eugenio Vidal Méndez.

Master en ciencias. Mención geotecnia. Especialista en hidrogeología e ingeniería geológica de la Unidad Empresarial de Base de Proyectos e Investigaciones Hidráulicas de Guantánamo. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

Dirección centro de Trabajo: Agramante # 905 Esquina Emilio Giró. Guantánamo
Teléfono y Fax 32 2451.

Resumen.

En este artículo mediante un desarrollo teórico sencillo, el autor establece la existencia de relaciones de proporcionalidad entre determinadas propiedades geoelectrica de los acuíferos, como la resistencia transversal (R_T) y la conductancia longitudinal (S) y algunas de sus propiedades colectoras. El establecimiento de estas relaciones asegura un paso de avance más, en el establecimiento de los métodos geofísicos eléctricos de superficies, como buenos estimadores de las propiedades colectoras de los acuíferos, asegurando de este modo un alto nivel de información, confiabilidad y reducción de los costos de investigación; como se muestra en este trabajo, donde el procedimiento fue aplicado a un caso real de estudio en las rocas carbonatadas del Neógeno, al noroeste de la ciudad de Holguín, con vista a garantizar nuevas fuentes de abasto a la fabrica de cerveza Bucanero S.A.

Palabras clave: Resistencia transversal, conductancia longitudinal, factor de formación, proporcionalidad, permeabilidad intrínseca, conductividad hidráulica, transmisividad.

Abstract.

By means of a simple theoretical development the author establishes in this article the existence of proportionality relations among determined geo electrical properties of the aquifers, like transversal resistance (R_t) and the longitudinal conductance (S) and some of its collecting properties. The establishment of these relations assures a step forward in the establishment of geophysical electrical methods of surfaces as good estimators of the collecting properties of aquifers. This is one of the ways that a high level of information, reliability and reduction of research costs is assured, as in the case of the present article, in which the procedure was applied to a real case in the carbonated rocks of the Neogene, northwest of Holguin city, in order to warrantee new sources for the Beer Factory Bucanero, S.A.

Keywords: Traverse resistance, longitudinal conductance, formation factor, proportionality, intrinsic permeability, hydraulic conductivity, transmisividad.

Introducción.

Numerosos investigadores, desde hace muchos años han estado trabajando con la finalidad de utilizar los métodos geofísicos para predecir el comportamiento de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos, entre estos se pueden citar los trabajos de Jones y Bufford (1951), Key y McCary (1971) y Brown (1988), entre otros. La búsqueda de relaciones de proporcionalidad entre parámetros geofísicos y las propiedades colectoras de los acuíferos resulta de gran importancia para el estudio de estos; de ahí que a lo largo de estos años, diferentes autores hayan introducido numerosas metodologías que relacionan de diferentes maneras a estas propiedades a partir de ecuaciones empíricas, como la desarrollada por Gómez Rivero (1979) y aplicada con buenos resultados por García (1996), en la determinación de la permeabilidad de rocas vulcanógenas-sedimentarias.

Sobre la base de trabajos de otros investigadores; Mazac y Landa (1985), definieron las relaciones existentes entre algunos parámetros geoelectrónicos y las propiedades hidráulicas de las rocas, reconociendo que en dependencia del tipo de acuífero así serían las relaciones de proporcionalidad, inversa o directa entre estos parámetros, destacando a su vez que tales correlaciones, dependían en gran medida de la escala de los trabajos y de otros factores.

Katsume y Hume (1987), comprobaron que relacionando los factores de formación obtenidos de los registros de corriente directa y de los registros de densidad se podía estimar la conductividad hidráulica. Además lograron establecer una ecuación de regresión que relaciona la transmisividad obtenidas de pruebas de bombeo, con la razón de dos factores de formación en un acuífero asociado a un intrusivo de granito en Canadá.

Así mismo, Valcarce (1995) estableció una correlación empírica entre la velocidad de flujo y los parámetros geofísicos de pozos en la cuenca sur de la Habana, que sirvió de base para definir un modelo hidrogeofísico para dicha cuenca (Valcarce et. Al 1999), en la que se aprecia determinadas relaciones de correlación entre los parámetros geoelectrónico del acuífero y sus propiedades hidrodinámicas que permiten confirmar que a pesar de la marcada heterogeneidad y anisotropía de este acuífero, existe una componente estructural que permite explicar la variabilidad de los parámetros geofísicos de los pozos y de los hidrodinámicos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la existencia de correlación positiva entre la conductancia y la transmisividad del acuífero, así como que ambos presentaban una distribución estadística de probabilidad log-normal, se decidió aplicar el método de Uvarov para el pronóstico de la transmisividad comparándose con el resultado de las pruebas hidrogeológicas en los pozos, obteniéndose resultados dentro de márgenes de error aceptables, lo cual permitió considerar que la conductancia es el parámetro más eficiente para explicar el comportamiento de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos.

Como se puede apreciar todas las relaciones propuestas hasta el presente se fundamentan en la existencia de correlaciones estadísticas entre las variables en

estudio, que no establecen ninguna relación de dependencia física entre ellas. De manera, que el presente trabajo tiene como objetivo demostrar la existencia de relaciones físicas entre ciertas variables geoelectricas y las propiedades físicas e hidrodinámicas del acuífero.

I. Características generales del área de estudio.

El área de estudio se localiza a unos 8 km aproximadamente al noroeste de la ciudad de Holguín y alcanza una superficie de aproximadamente 36 km².

Desde el punto de vista geológico, el área se ubica dentro de la denominada cuenca "Los Arroyos", perteneciente a la zona estructuro facial "Aura" y a la cuenca superpuesta "Guacanayabo – Nipe". La tectónica regional esta caracterizada por la presencia de fallas de sobrecorrimientos tectónicos; distinguiéndose además dos sistemas principales de alineamientos tectónicos que prácticamente surcan en toda su extensión a las secuencias rocosas del territorio en las direcciones NE – SW, NW – SE, y E – W.

El acuífero estudiado se desarrolla dentro del complejo rocoso de los sedimentos del Neógeno (N), representados fundamentalmente por las calizas cársicas, porosas, margas y areniscas. Las aguas son hidrocarbonatadas – magnesianas de variada mineralización y resistividad promedio de 6.1 ohm.m.



Figura 1: Ubicación geográfica del área de los trabajos.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por Llorens (1984) en un tramo de 27 km², mediante pruebas de bombeo, el acuífero esta caracterizado por una transmisividad media de 2800 m²/d. La razón de explotación estimada por este autor, fue de 70 l/s, con descensos promedio en la zona de influencia de las tomas de apenas 2.5 m y gastos específicos de 2.8 l/s. El espesor medio del acuífero quedo establecido en los 42 m, mientras que el gradiente hidráulico natural del acuífero fue de 0.0003.

II. Métodos de estudios empleados.

Para este trabajo el área del tramo escogido es de aproximadamente 36 km² y comprende el área estudiada por Llorens en 1984. En esta se emplearon 65 pto de SEV distribuidos lo mas regularmente posible y a lo largo de perfiles de orientación N – S.

Para el análisis topoprobabilístico de la variable resistividad obtenida de los sondeos, se utilizó el análisis variográfico. Los resultados alcanzados al estudiar su comportamiento en las dos direcciones principales en que se desarrolla la tectónica

del territorio se muestran en la tabla 1. En ella se puede apreciar que la resistividades medias regionalizadas del acuífero y del agua que la satura (24.2 y 6.1 ohm.m respectivamente), presentan un comportamiento anisotrópico según estas direcciones (NE – SW y NW – SE), alcanzando un mayor radio en la dirección NW (135°), una menor varianza y menos anomalías locales (Nugget), lo cual permite suponer la existencias de zonas de mayores acuosidades en esa dirección que en la dirección NE.

Tabla 1. Resultado del análisis variográfico de la resistividad del acuífero y del agua en las dos direcciones principales de la red de agrietamiento.

Área. (Km ²)	Dirección	Anis.	Alcance Máx. (m)	Nugget.	Varianza	IGF	R _s (ohm.m)	R _w (ohm.m)
36	85°	0.5	1540	347.2	585.8	0.014	24.2	6.1
	135°	0.5	2288	69.6	582.8	0.004		

Para el cálculo de la conductividad hidráulica media regionalizada de acuíferos cársicos a partir de la resistividad del acuífero, Vidal (2001), ha propuesto un método en el que el factor de formación de las rocas saturadas y el espacio poroso efectivo a través del cual se filtra el flujo en el acuífero juegan un papel preponderante en la determinación de la permeabilidad intrínseca. De acuerdo con esto el factor de formación de las rocas se determina según la expresión:

$$F = \frac{R_s}{R_w} \quad (2.1)$$

Donde R_s es la resistividad de la roca saturada y R_w es la resistividad del agua de saturación.

Así mismo, Vidal (2006^a) ha demostrado que la permeabilidad se relaciona con el factor de formación (F) de manera inversamente proporcional, a través de la siguiente relación;

$$k = \frac{1}{F \delta S_\phi^2} \quad (2.2)$$

En la que δ es un coeficiente que determina el grado de consolidación de las rocas y que según Kozeny, tome el valor de 2 para las rocas consolidadas y de 2.5 para las no consolidadas. Mientras que S_ϕ (el espacio poroso efectivo de la sección transversal del flujo), se determina por la ecuación:

$$S_\phi = \phi_f AER \quad (2.3)$$

Donde:

ϕ_f : Es la porosidad de flujo o activa.

AER : El área elemental representativa de la sección de flujo.

Dicha área se determina de acuerdo con la expresión:

$$AER = LER \times H_m \quad (2.4)$$

En la cual, LER es el ancho o longitud elemental representativa transversal al flujo y H_m el espesor medio saturado del acuífero. Este parámetro se determina del radio de alcance máximo ($A_{max.}$) obtenido del variograma de dirección transversal a la dirección en que se estiman los parámetros.

$$LER = 2A_{\max} \quad (2.5)$$

De acuerdo con Mendoza (1998), la porosidad de flujo se relaciona con el factor de formación a través de la relación:

$$F = 1 + G(\varphi_f^{-1} - 1) \quad (2.6)$$

Por lo que despejando la porosidad de flujo se tendrá;

$$\varphi_f = \left(\frac{F-1}{G} + 1 \right)^{-1} \quad (2.7)$$

Aquí, G es un parámetro que depende de la geometría interna de las rocas y que según este autor, múltiples investigaciones de laboratorio y técnicas de mínima desviación, muestran que toma valores promedios de 0887 para las rocas carbonatadas y 1.03 para las arenas.

Como se conoce, la conductividad hidráulica de un acuífero se determina por la conocida ecuación;

$$K = k \frac{g}{\nu} \quad (2.8)$$

Donde:

g ; Es la aceleración de la gravedad

ν : Es la viscosidad cinemática del agua. A los efectos prácticos, dada las condiciones de temperatura media de los acuíferos cársicos cubanos (21° C), se toma $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Conociendo la potencia del acuífero, la transmisividad media del acuífero se puede conocer aplicando la ecuación:

$$T = KH_m \quad (2.9)$$

Al aplicar este nuevo método al área investigada en las terrazas aluviales del río Báez, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultado de la evaluación de los parámetros hidrogeofísicos del acuífero. (Vidal 2006)

Área (km ²)	Direc. De Cálculo.	F	φ_f	S_φ (m ²)	k (m ²)	LER (m)	AER (m ²)	K (m/d)	T (m ² /d)
36	NE – SE 85°	3.97	0.23	44204.16	6.45x10 ⁻¹¹	4576	192192	54.57	2293.2
	NW- SE 135°			29752.8	1.42x10⁻¹⁰	3080	129360	120.68	5065.2
Valor med. Regional		3.97	0.23	36978.48	1.03x10⁻¹⁰	3828	160776	81.2	3408.3

Los resultados confirman, tal y como se había supuesto por el análisis variográfico, la existencia de una zona de mayor conductividad hidráulica hacia la dirección NW – SE, lo cual es indicativo de una mayor preponderancia del flujo de alimentación que llega al acuífero en esa dirección. Además; se puede constatar, que el valor medio regional que caracteriza la transmisividad del acuífero teniendo en cuenta la anisotropía que lo caracteriza, es de **3682.35 m²/d**, un tanto superior a los encontrados por Llorens (1984), debido al efecto del factor de escala (EFE) que se introduce en las pruebas de bombeo y que aquí

prácticamente no afectan la determinación del valor medio de las propiedades físicas del acuífero.

III. Existencia de relaciones de proporcionalidad entre otros parámetros geoelectrónicos del medio y las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos.

Según se sabe; Orellana (1972), definió dos parámetros geoelectrónicos del medio acuífero que han adquirido gran importancia en el estudio de los parámetros hidrogeológicos. Estos parámetros son:

La resistencia transversal del acuífero, definida como:

$$R_T = hR_S \quad (3.1)$$

Y en la que:

R_S : Es la resistividad de la capa acuífera.

h : es el espesor de la capa acuífera.

La conductancia longitudinal del acuífero (S), definida por:

$$S = \frac{h}{R_S} \quad (3.2)$$

Para demostrar la existencia de relaciones de proporcionalidad entre estos parámetros y algunas propiedades hidrogeológicas de los acuíferos, partiremos de la ecuación (3.1) de la cual si despejamos la resistividad de la capa acuífera (R_S) y la sustituimos en la ecuación (2.1), se tendrá que;

$$F = \frac{R_T}{hR_W} \quad (3.3)$$

Mientras que si realizamos la misma operación para par la ecuación (3.2), tendremos que:

$$F = \frac{h}{SR_W} \quad (3.4)$$

Con las cuales se demuestra que el factor de formación de un acuífero establece una relación de proporcionalidad directa con su resistencia transversal e inversa con su conductancia longitudinal.

Ahora bien por la ecuación (2.2) ha quedado bien establecido que el factor de formación se relaciona de manera inversamente proporcional a la permeabilidad intrínseca del acuífero; de manera si sustituimos las ecuaciones (3.3) y (3.4) en (2.2) respectivamente se podrá apreciar que;

$$k = \frac{hR_W}{R_T \delta S_\phi^2} \quad (3.5)$$

Mientras que:

$$k = \frac{SR_W}{h\delta S_\phi^2} \quad (3.6)$$

Estas ecuaciones muestran, que la permeabilidad intrínseca se relaciona de manera inversamente proporcional a la resistencia transversal del acuífero y directa con la conductancia longitudinal.

Teniendo en cuenta esto si sustituimos (3.5) y (3.6) respectivamente en ; (2.8) se podrá apreciar que:

$$K = \frac{hR_w}{R_T \delta S_\phi^2} \frac{g}{v} \quad (3.7)$$

y

$$K = \frac{SR_w}{h \delta S_\phi^2} \frac{g}{v} \quad (3.8)$$

De las cuales se ve claramente, que la conductividad hidráulica también cumple las relaciones de proporcionalidad señaladas anteriormente.

Así mismo, se sabe que la transmisividad de un acuífero esta dada por la relación;

$$T = KH \quad (3.9)$$

de manera que si en esta ecuación hacemos $H = h$ y la sustituimos en las ecuaciones (3.7) y (3.8) respectivamente se podrá apreciar que:

$$T = \frac{h^2 R_w}{R_T \delta S_\phi^2} \frac{g}{v} \quad (3.10)$$

y

$$T = \frac{SR_w}{\delta S_\phi^2} \frac{g}{v} \quad (3.11)$$

IV. Aplicación práctica de estas nuevas relaciones de dependencia en el tramo evaluado.

Las dependencias (3.3) a la (3.11), fueron aplicadas a modo de comprobación en el tramo de cuenca investigado por Vidal (2006), utilizando las relaciones de dependencia existente entre la permeabilidad intrínseca y el factor de formación del acuífero y cuyo resultados se mostraron en la tabla 2.

Tabla 3. Resultado de la evaluación de los parámetros hidrodinámicos del acuífero según las nuevas dependencias encontradas.

Área (km ²)	Direc. De Cálculo.	F	R _T (ohm. m ²)	S (ohm ⁻¹)	S _φ (m ²)	k (m ²)	K (m/d)	T (m ² /d)
36	NE – SE 85 ⁰	3.97	1016.4	1.7355	44204.16	6.45x10 ⁻¹¹	54.67	2293.18
	NW-SE 135 ⁰	3.97	1016.14	1.7355	29752.8	1.42x10 ⁻¹⁰	120.67	5065.2
Valor Regional	med.	3.97	1016.14	1.7355	36978.48	3.93x10⁻¹⁰	87.67	3408.00

Al comparar los resultados aquí obtenidos con los de la tabla 2, se puede apreciar que con la aplicación de estas nuevas relaciones encontradas, se producen resultados idénticos a los alcanzados por Vidal (2006) utilizando la relación de proporcionalidad entre el factor de formación y la permeabilidad intrínseca.

Conclusiones.

El desarrollo teórico aquí seguido y la aplicación práctica de las relaciones de dependencia encontradas, permitió:

1. Demostrar la existencia de relaciones físicas entre la resistencia transversal del acuífero y su conductancia longitudinal, con los parámetros hidrodinámicos de los acuíferos.
2. Dotar a los métodos geoelectrónicos de superficies de nuevas herramientas para estimar con un elevado grado de precisión los principales parámetros hidrodinámicos que caracterizan a los acuíferos que abarcan grandes áreas.

Bibliografía.

- BLANCO J. L Y C LLORENS (2003). "Investigaciones hidrogeológicas de la nueva zona Managua – El Aserrio para el abasto a la fabrica de cerveza bucanero S.A". Archivo de la EIPH de Holguín.
- CUADOR J. Q. Y A. QUINTERO (1999). "Análisis estructural. Punto de partida de todo estudio geoestadístico". Revista Geología y Minería. Vol. XVI, N° 3. ISMM. Moa Cuba. Pp. 160 -22.
- LEGRÁ L. A Y R. GUARDIOLA (1999). "Contribución a la práctica del análisis variográfico y la estimación por Kriging". Revista Geología y Minería ISMM. Moa. Cuba. Pp. 16 – 22.
- LEGRÁ L, R. SILVA Y M. A. PUENTES (1998). "Interpretación lineal en R^n a partir de su relación con el Kriging". Geología y Minería 98. Memorias. Vol. II. Edit. CNIG. Instituto cubano de paleontología. La Habana. Pp. 127 – 129.
- LEGRÁ L (1994). "Consideraciones sobre el cálculo de volúmenes geólogo minero por métodos clásicos". Revista Geología y Minería Vol. 2. No. 2. ISMM. Moa. Cuba.
- LLORENS C. (1984). "Estudio hidrogeológico para el abasto subterráneo a la fábrica de cerveza de Holguín. Archivo de la EIPH de Holguín.
- LLORENS C (1999). "Evaluación de recursos de agua subterránea en el área de los pozos de la fabrica de cerveza con la utilización del método del gráfico de control del balance". Archivos de la EIPH de Holguín.
- RODRÍGUEZ E Y C. BUZA. (1982). "Informe sobre los trabajos geofísicos orientados a la investigación de agua subterránea, para el abasto industrial, de regadío y poblacional en la cuenca San German – Maceo de la provincia de Holguín". Archivos de la EIPH de Holguín.
- VIDAL M. E. (2001). "Evaluación de nuevas Zonas perspectivas de agua subterránea para el abasto a la fabrica de cerveza Bucanero S.A. Utilizando una nueva óptica. Archivos de la UEBPI de Guantánamo.

Fecha de recibido: 23 oct. 2007
Fecha de aprobado: 19 dic. 2007