

ARTÍCULO CIENTÍFICO
SCIENTIFIC ARTICLE

**APROXIMACIÓN
GEOMATEMÁTICA A LA
PROSPECCIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN ROCAS DE BAJA
PERMEABILIDAD: MODELO RBP**

**GEOMATHEMATICAL APPROACH TO
GROUNDWATERS PROSPECTING IN LOW
PERMEABILITY ROCKS: RBP MODEL**

Manuel Núñez Lafitte
Leslie F. Molerio-León

REVISTA GEOINFORMATIVA
No.2. 2022

Manuel Núñez Lafitte¹

Instituto de Geofísica y
Astronomía

Leslie F. Molerio-León

INVERSIONES GAMMA, S.A.
Apartado 6246, CP 10 600, La
Habana. Cuba.
Correo-e
especialistaprincipal@gmail.com
0000-0001-9667-3258

RESUMEN

Se sintetiza un modelo geomatemático para orientar la exploración y alumbramiento de las aguas subterráneas en rocas duras de baja permeabilidad. El modelo ha sido derivado y aplicado exitosamente en las condiciones de Cuba, elevando la efectividad en la perforación de pozos fértiles de un 60 a un 80 %. La incertidumbre hidrogeológica logra reducirse introduciendo técnicas de exploración y clasificación numérica de evidencias cuantitativas asociadas a resultados exitosos y/o fallidos de búsqueda y desarrollo de aguas subterráneas en estos medios geológicos. El medio acuífero se conceptualiza como un entorno de porosidad simple, definido por las propiedades hidráulicas del sistema de grietas que lo dislocan y la matriz rocosa se considera impermeable o de no flujo.

Palabras clave: rocas duras; baja permeabilidad; aguas subterráneas

ABSTRACT

A geomathematical model for the survey and development of groundwaters in low-permeability hard rocks is synthesized in this paper. The model has been derived and successfully applied under Cuban geological and hydrological conditions, rising the effectivity of productive wells from 60 to 80 %. Hydrogeological uncertainty is reduced introducing to the common surveying methods, techniques of numerical exploration and classification of quantitative evidences of successful/ unsuccessful water wells. Aquifer media is conceptualized as a single fracture porosity/permeability system. Rock matrix is considered a non-flow media.

Key words: hard rocks; low permeability; groundwaters

Recibido: 9 del 8, 2022
Aprobado: 17 del 9 2022

¹ Rindo tributo en esta contribución a nuestro compañero y amigo, Manuel Núñez Lafitte (Banes, 1949. La Habana, 2021), recientemente fallecido, iniciador y promotor de los estudios sistémicos de prospección y desarrollo de las aguas subterráneas en las rocas duras de baja permeabilidad en Cuba, tema al que dedicó, desde su posición en el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos primero y, luego en el Instituto de Geofísica y Astronomía, décadas de investigación, aprovechando su formación como geólogo y geógrafo. Una prolongada enfermedad lo alejó de las investigaciones directas y no pudo ver este artículo terminado al que, por su dedicación y en su homenaje, justamente corresponde su autoría principal.

INTRODUCCIÓN

Las rocas de baja permeabilidad —RBP— (indistintamente denominadas rocas duras, de acuosidad de grietas, rocas fracturadas no cársicas, rocas cristalinas, tectonitas) constituyen extensas áreas de Cuba (aproximadamente el 30 % de la superficie del país, Figura 1). Los menores rendimientos acuíferos de la nación se encuentran en estas rocas, donde localizar pozos con caudales superiores a los 10 litros por segundo representa una probabilidad muy baja, en general, inferior al 10 %; de manera que los caudales se encuentran fuertemente agrupados en el rango de 0 a 4 lps. Por otra parte, estos territorios coinciden con áreas de extensas llanuras aptas para el desarrollo ganadero, que se limita fuertemente por la escasa disponibilidad de agua subterránea y superficial.

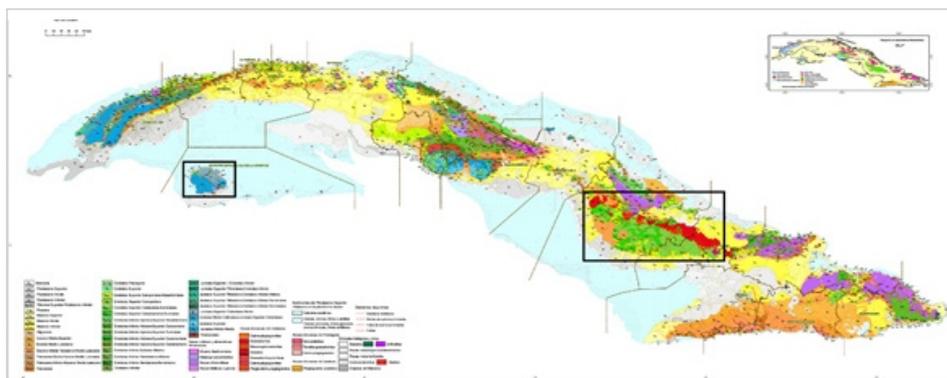


FIGURA 1. Mapa geológico de Cuba (Atlas LX Aniversario). El paquete fundamental de Rocas de Baja Permeabilidad de Cuba lo componen aquellas ígneas y metamórficas de edad Cretácica. Enmarcadas en negro, se muestran las áreas de rocas preneogénicas de ensayo exitoso del Modelo RBP

Las posibilidades acuíferas de las RBP se reducen a las grietas que dislocan el macizo de tectonitas y a la corteza de intemperismo de las rocas (en cuyo caso el tratamiento hidrogeológico es semejante al de acuíferos en medios porosos).

El índice de efectividad de la perforación de pozos en este tipo de rocas, es del orden del 60 %, como promedio nacional. El índice se define como la relación de pozos con caudales superiores a cero litros por segundo, de manera que —como promedio— el 40 % de los pozos que se perforan no satisfacen los objetivos de demanda para los cuales fueron diseñados y construidos. Esto representa, a escala mundial, una erogación de varios millones de dólares en gastos de perforación no efectiva, sin considerar el gasto adicional de demanda no satisfecha, ya que los acuíferos en rocas de baja permeabilidad constituyen el 20 % de las tierras emergidas del planeta y sostienen, prácticamente, a toda la población del Tercer Mundo (Figura 2).

La búsqueda efectiva de agua subterránea en las RBP se reduce a las posibilidades acuíferas de las grietas. Sin embargo, sucede que:

- No todas las grietas son acuíferas: ni las del mismo episodio tectónico ni las que dislocan el mismo macizo de rocas, por lo que no basta con identificar la distribución de las grietas para definir la acuosidad potencial.

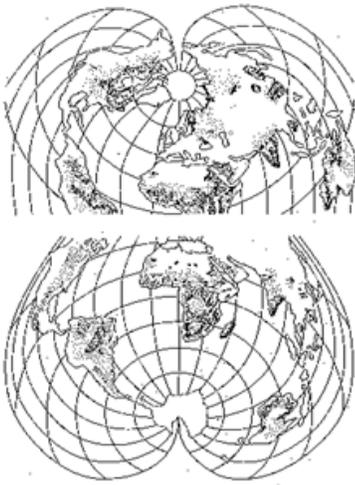


FIGURA 2. Mapa geológico de Cuba (Atlas LX Aniversario). El paquete fundamental de Rocas de Baja Permeabilidad de Cuba lo componen aquellas ígneas y metamórficas de edad Cretácica. Enmarcadas en negro, se muestran las áreas de rocas preneogénicas de ensayo exitoso del Modelo RBP

- El agrietamiento de las rocas, como regla, disminuye con la profundidad, de manera que no necesariamente pozos más profundos resultan potencialmente más acuíferos e incluso, exceder cierta profundidad límite puede provocar pérdida sensible de caudal en los horizontes superiores.
- Muchas grietas acuíferas son verticales, por lo tanto no siempre un pozo puede cortarlas y, de igual modo, pozos perforados sobre la traza de la grieta no siempre son acuíferos.

Las técnicas que, a escala mundial, han permitido mejorar la efectividad de la perforación en las RBP son muy costosas. Implican levantamiento (cartografía) hidrogeológico y geológico, investigaciones geofísicas, mapeo geomorfológico, caracterización físico-química e isotópica, y perforación a riesgo con equipos autopropulsados de alto rendimiento y elevada movilidad. Tales técnicas se aplican de modo individual o de conjunto.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Modelo Geomatemático RBP, diseñado por los autores, está destinado a orientar la exploración y alumbramiento de las aguas subterráneas en rocas duras de baja permeabilidad, mediante la reducción de la incertidumbre que se deriva de la aplicación de técnicas de exploración y clasificación numérica de evidencias cuantitativas asociadas a resultados exitosos o fallidos de búsqueda y desarrollo de aguas subterráneas en estos medios geológicos. El método, desarrollado entre 1997 y 2005, ha sido derivado y aplicado en las condiciones de Cuba y la conceptualización permitió extenderlo exitosamente a la prospección hidrogeológica en otros países del Trópico Húmedo (Ecuador, Guinea Ecuatorial, Panamá).

En el modelo, el medio acuífero ha sido conceptualizado como un entorno de porosidad simple, definida por las propiedades hidráulicas del sistema de grietas que lo dislocan y la matriz rocosa se considera impermeable o de no flujo. El modelo introduce el concepto de Funcional de Discriminación, que conduce a identificar los factores de diseño, de geología estructural, hidrogeológicos y de rendimiento que controlan la acuosidad de las RBP, representados en mapas de pronóstico que precisan la distribución de las zonas de búsqueda para caudales determinados y con diseños específicos de los pozos. La aplicación del Modelo RBP permitió elevar la efectividad de pozos, como promedio, en un 80 % y, en ciertas zonas hasta el 90 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESTRUCTURA DEL MODELO

La [Figura 3](#) resume el diagrama de flujo de las operaciones fundamentales del Modelo RBP. El modelo aprovecha, al máximo, la información disponible en archivo, por lo que no requiere de reinversión de tiempo y fondos para la adquisición de esta. La información que se requiere de los pozos es la siguiente:

- Coordenadas
- Profundidad total
- Nivel estático

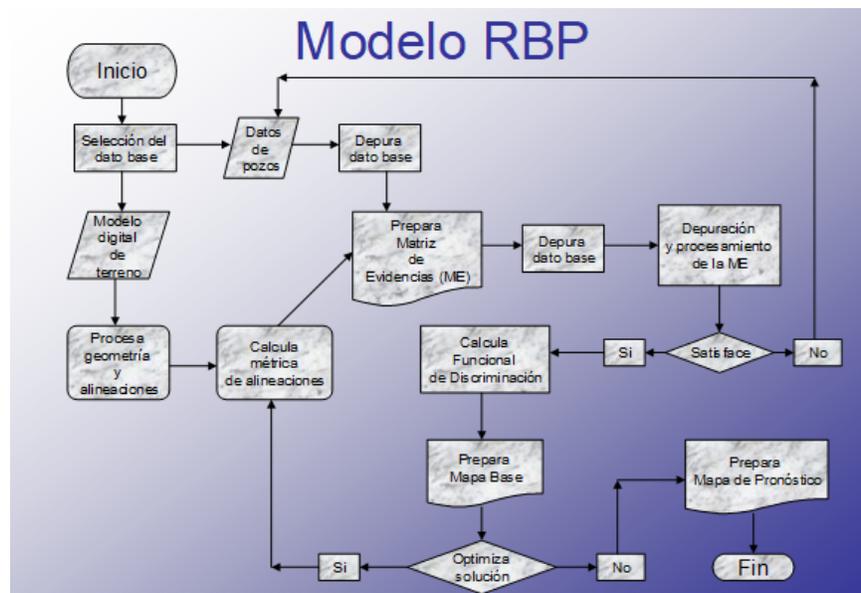


FIGURA 3. Diagrama de flujo de las operaciones del Modelo RBP

- caudal
- abatimiento
- diámetro del pozo
- transmisividad (si está disponible, de lo contrario, se calcula); y de esta se genera la siguiente:
 - caudal específico
 - caudal específico transformado
 - conductividad hidráulica
 - espesor de la zona no saturada
 - espesor acuífero máximo cortado
 - transmisividad (en caso de que sea necesario)

De la base georreferencial se genera la información siguiente:

a. Cartas topográficas y Modelo Digital de Terreno:

- Paleovalles
- escarpes tectónicos
- alineaciones estructurales

b. Cartas geológicas:

- Litología y relaciones tectonofaciales
- fallas
- diaclasas

c. Imágenes aeroespaciales:

- Alineaciones estructurales
- litología y relaciones tectonofaciales
- obras civiles e hidrotécnicas
- red fluvial
- estructuras tectónicas
- cobertura
- grado de utilización de la tierra

Geometría y alineaciones. Métrica

El cálculo de la métrica de las alineaciones consiste en definir, para cada tipo de alineación estructural:

- longitud
- orientación
- ancho de la zona de influencia
- nodos de intersección de las alineaciones
- distancia del pozo al eje de la alineación y al nodo más próximos

Preparación de la Matriz de Evidencias (ME)

Con los datos de los pozos se prepara la ME primaria, que típicamente tiene la siguiente estructura en el campo de las columnas (variables)

- coordenadas
- profundidad total
- nivel estático
- caudal
- abatimiento
- diámetro del pozo
- transmisividad
- caudal específico
- caudal específico transformado
- conductividad hidráulica
- espesor de la zona no saturada
- espesor acuífero máximo cortado
- longitud
- orientación
- ancho de la zona de influencia
- nodos de intersección de las alineaciones
- distancia del pozo al eje de la alineación y al nodo más próximos

DEPURACIÓN DEL DATO BASE

Consiste en el análisis estadístico de la ME y considera el siguiente procesamiento, encaminado a depurar el dato base y proceder a la conformación de la ME de trabajo:

- Estadística sumaria de todas las variables
- Ajuste a las funciones de probabilidad de cada variable
- Tests de validación y representatividad (análisis de colas y Kolmogorov-Smirnov, Student)
- Ajuste a la función de variable regionalizada (kriging, cokriging, fuzzy)
- Mapeo probabilístico
- Mapeo de kriging, cokriging y conjuntos fuzzy
- Análisis discriminante
- Regresión sencilla y múltiple
- Verificación de la invertibilidad de la ME
- Cálculo de informatividad
- Análisis de fractalidad

Procesamiento de la ME

Consiste en el análisis estadístico multivariado de la ME y comprende:

- Matrices de covarianza y de los coeficientes de correlación
- Cálculo de los valores y vectores propios
- Definición automatizada de los factores a extraer
- Análisis factorial en modos R y Q
- Definición de los factores y sus variables, coherencia y comunalidad de las variables

Cálculo de la Funcional de Discriminación (FD)

Se define la FD de acuerdo con el problema a resolver y se prepara el conjunto de gráficos $FD=f(\text{var})$, siendo var la variable asociada derivada del AF-R. Se precisarán los rangos $FD=f(\text{var})$ que se emplearán para preparar el mapa base para probabilidades dadas de la FD. La elaboración de los Mapas Base consiste en cartografiar la función $FD=f(\text{var})$ y superponer las imágenes individuales, optimizándolas para obtener un mapa base de pronóstico.

Optimización de la solución

Pretende aplicar un conjunto de técnicas de optimización para elevar la precisión del pronóstico y del mapa definitivo y que consisten en definir e implementar, según el caso:

- las relaciones entre FD y las funciones objeto (FO)
- variables de decisión
- limitaciones (condiciones de frontera o restricciones)
- definición del espacio objetivo (EO) y del espacio de decisión (ED)
- simulación multivariada
- simulación por función de variable regionalizada
- solución por rangos
- soluciones discretas y no lineales

Mapa Definitivo de Pronóstico (Mapa de Zonas Perspectivas —MZP):

Resume todo el proceso anterior en la preparación de un Mapa de Zonas Perspectivas para diferentes probabilidades de caudal, diseño de las obras de toma y posición espacial.

DESCRIPCIÓN DE UNA APLICACIÓN

Para definir las Combinaciones Lineales Estandarizadas (SLC) entre los factores de control de acuosidad de las RBP, se seleccionó el territorio ocupado por la Hoja Cartográfica 4679-III "Batalla de Guisa", de unos 400 km² de superficie, y se dispuso de la información litológica y estructural proveniente del Mapa Geológico de la provincia de Camagüey, a escala 1:100 000 y de levantamientos de detalle a escala 1:50000. La base de datos respecto a la acuosidad de las unidades litofaciales fue obtenida del procesamiento de los catálogos de afloramientos de pozos de la Empresa de Proyectos e Investigaciones Hidráulicas de Camagüey.

El territorio estudiado presenta un relieve ondulado, cuya altura promedio es de unos 40 m sobre el nivel del mar y las cotas más altas no rebasan los 100 m, si se exceptúan las pequeñas elevaciones de las sierras de Najasa, Guaicamar y Cerro Cochimbo, que llegan a superar ligeramente los 200 m. Una extensa red fluvial, integrada mayoritariamente por ríos de funcionamiento estacional o episódico, disecta en muy pequeño grado la región, donde también se encuentra una red permanente, igualmente poco incidida en la superficie, representada por los ríos Najasa y Contra maestre. Las unidades litoestructurales, esencialmente del Cretácico, las integran asociaciones magmáticas efusivas, del tipo basáltico y andesítico, que se encuentran en extensos cuerpos de variada textura. Se encuentran rocas conglomeráticas con fragmentos de material volcánico y tobas (Fm. Contra maestre), terrígenas y terrígeno-carbonatadas (fms. Florida y Vertientes), y rocas carbonatadas (Fm. Jimaguayú) y fragmentarias terrígenas (Fm. Durán).

Selección de la información primaria

En el territorio seleccionado se dispuso de información sobre 111 pozos aforados, de los cuales fueron seleccionados poco más de la mitad. La información morfométrica se derivó de la interpretación y trazado, a escala 1:50 000, de morfoisohipsas, relieve residual y morfoalineamientos. La información litológica y estructural se obtuvo del mapa geológico mencionado.

De esta forma se construyó una matriz de evidencias compuesta por 17 variables y 58 casos, cuya estadística sumaria se presenta en la [Tabla 1](#). Las variables seleccionadas fueron las siguientes:

- Profundidad total en m (PT)
- Profundidad del nivel estático en m (NE)
- Espesor acuífero cortado en m (H)
- Abatimiento registrado en m (s)
- Caudal de extracción durante el ensayo en lps (Q)
- Transmisividad de Borevskii-Schoeller en m²/d (QCH)
- Conductividad hidráulica en m/d (K)
- Transmisividad calculada en m²/d (T)
- Distancia a los paleovalles en m (DP)
- Rumbo del eje principal de los paleovalles en grados sexagesimales (RP)
- Longitud de los paleovalles en m (LP)
- Distancia a las fallas en m (DF)
- Rumbo del eje principal de las fallas en grados sexagesimales (RF)
- Longitud del escarpe tectónico en m (LF)
- Distancia a las fallas en m (DF)
- Rumbo del eje principal del escarpe tectónico en grados sexagesimales (RF)
- Longitud del escarpe tectónico en m (LF)

Análisis en Componentes Principales (ACP)

El ACP ([Mardia, Kent y Bibby, 1979](#); Braud y Obled, 1990) tiene, como objetivo fundamental, la búsqueda de combinaciones lineales estandarizadas entre las variables originales, que exhiban un máximo de varianza. Ello conduce a la determinación de unas pocas combinaciones lineales que describen la estructura y relaciones entre los elementos de la matriz de evidencias. En este proceso de reducción de dimensionalidad se debe perder un mínimo de información.

Las transformaciones de las componentes principales ocurren tanto en el contexto de la muestra como de la población, son de tipo ortogonal, y transforman cualquier conjunto de variables en un nuevo conjunto no correlacionado. Ello supone que si x es un vector aleatorio con media μ y matriz de covarianza Σ la transformación de la componente principal es:

$$x \rightarrow y = \Gamma'(x - \mu)$$

En la que Γ es ortogonal; $\Gamma'\Sigma\Gamma = \Lambda$, es diagonal, y $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$. Los autovalores λ_i garantizan ser estrictamente positivos y Σ es definida positiva con arreglo al Teorema de la Descomposición Espectral. La i -ésima componente principal de x puede ser definida como el i -ésimo elemento del vector y , de manera que:

$$y_i = \gamma_{(i)}(x - \mu)$$

Donde y_i es la i -ésima columna de Γ , y puede definirse como el vector de las cargas de las componentes principales. La función y_p , es la última componente principal de x . En el caso de un vector multinormal aleatorio, las primeras componentes principales representan el eje mayor de los elipsoides de concentración. Las últimas componentes principales de x exhiben una varianza menor que cualquier otra combinación lineal estandarizada. El análisis se realizó para definir las componentes en función de aquellos valores propios $\lambda \geq 1$. En este caso se alcanzó una explicación de varianza del orden del 70% con seis (6) componentes principales.

TABLA 1. Estadística sumaria de las variables seleccionadas

	Media M	Mediana	Moda	Mínimo M	Máximo	Std.Dev. V	Varianza	Coef. De Variación	Rango
PT	21.6681	20	múltiple	11	47	8.180419	66.91925	0.377533	36
NE	4.446034	4.115	6.800000	0.25	13.8	2.466798	6.085095	0.554831	13.55
H	17.22069	14.985	múltiple	5.45	42.95	7.787463	60.64458	0.452216	37.5
S	7.103103	7	múltiple	0.64	26.19	5.37384	28.87815	0.756548	25.55
Q	1.888103	1.29	1.000000	0.2	6	1.353459	1.831851	0.716835	5.8
QCH	64.58793	22.8	9.900000	3.8	458.7	88.25997	7789.822 1	.366509	454.9
K	5.212069	1.215	múltiple	0.1	29.3	7.261492	52.72927	1.393207	29.2
T	60.66207	19.3	Ausente	1.7	471	88.37006	7809.268 1	.45676	469.3
DP	320.6897	300	múltiple	0	1300	232.2722	53950.39	0.72429	1300
RP	100.3621	110	múltiple	5	178	47.34817	2241.849 0	.471774	173
LP	1450	1300	múltiple	100	5000	794.1121	630614	0.547664	4900
DF	585.3448	350	200.0000	50	2700	568.779	323509.5 0	.971699	2650
RF	117.8966	140	177.0000	0	178	64.80705	4199.954 0	.549694	178
LF	2613.793	2000	múltiple	500	7300	1677.974	2815596	0.641969	6800
DE	128.4483	100	100.0000	0	600	118.8808	14132.64	0.925515	600
RE	94.60345	97.5	múltiple	4	178	51.16877	2618.243 0	.540876	174
LE	300.8621	250	200.0000	50	1000	169.2324	28639.59	0.562492	950

Aplicación del Criterio de Kaiser ($\lambda \geq 1$)

En la matriz de evidencias estandarizada se eliminó el atributo H, por ser redundante, y fue rotada mediante el método Varimax Normalizado. Las Tablas 2-4 muestran los resultados del ACP.

TABLA 2. Valores propios y varianza explicada

Componente	Valor propio	% Varianza total	Valor propio acumulado	% Varianza acumulada
1	4.07524006	25.4702504	4.07524006	25.4702504
2	1.96183386	12.2614616	6.03707392	37.731712
3	1.64075175	10.2546984	7.67782567	47.9864104
4	1.47602956	9.22518476	9.15385523	57.2115952
5	1.16251783	7.26573645	10.3163731	64.4773316
6	1.08621367	6.78883543	11.4025867	71.2661671

TABLA 3. Cargas factoriales

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
PT	-0.18439187	0.21128183	0.08913154	-0.87526357	0.05615948	-0.00862564
NE	0.00485859	0.67087322	-0.003646	-0.25435631	0.17027033	-0.06050086
S	-0.44617011	-0.28913189	-0.05103228	-0.6824371	-0.08542557	-0.02593455
Q	0.7359833	-0.17012203	-0.2470831	-0.36090029	0.00949095	0.20052101
QCH	0.94867826	0.06415716	0.09599525	0.20338924	0.05500435	0.03170264
K	0.87563601	0.06697529	0.00144934	0.34719971	0.06932955	0.0581593
T	0.95608227	0.06636419	0.06989201	0.18610799	0.04511255	0.00761738
DP	-0.15275281	-0.50080555	0.15273325	0.07524174	-0.0794307	-0.59826223
RP	0.25292948	-0.13362115	-0.06674931	0.31147965	0.24271008	0.57040044
LP	-0.04901743	-0.04444231	-0.28052716	-0.12309416	-0.67550429	0.16857438
DF	0.0117303	0.67536307	0.17802244	-0.05065885	-0.37540348	-0.06211193
RF	0.07533636	0.1495798	-0.83834497	0.08896209	-0.13162282	0.06878038
LF	-0.06914632	0.04261946	0.05446539	0.10686516	-0.75079564	-0.19604961
DE	0.07050777	0.0640368	-0.349604	0.08527585	0.11106065	-0.67187138
RE	0.10498995	0.14786236	0.70097157	0.0387466	0.01382444	0.18173231
LE	0.02780611	0.74240982	-0.07182471	0.24522905	-0.00715328	0.05974498

Seis factores contribuyen a explicar solamente el 71 % de la varianza total. Puede observarse que la estructura del espacio de las componentes principales reconoce, en la primera componente, variables de la estructura del campo de propiedades físicas (CPF), es decir: T, QCH, K y Q; en la segunda componente, se combinan la métrica del escarpe (LE) y la profundidad del nivel de las aguas subterráneas (NE), lo que conforma una interesante relación, que sugiere que la longitud de los escarpes tectónicos ejerce un control sobre la profundidad a que yacen las aguas subterráneas; en la tercera

componente, se combinan factores estructurales, en ese orden los rumbos de las fallas (RF) y de los escarpes (RE). La cuarta componente involucra un factor de diseño, la profundidad total de los pozos (PT); la quinta un factor estructural, la longitud de las fallas (LF) y la sexta componente, un factor de diseño, la distancia del pozo a los escarpes tectónicos.

TABLA 4. Comunalidades observadas

	De 2 factores D	e 3 factores D	e 4 factores D	e 5 factores D	e 6 factores R	² Múltiple
PT	0.07864037	0.0865848	0.85267111	0.855825	0.8558994	0.60478958
NE	0.45009448	0.45010777	0.51480491	0.54379689	0.54745725	0.29532756
S	0.28266502	0.28526931	0.75098971	0.75828724	0.75895984	0.64926578
Q	0.57061292	0.63166298	0.761912	0.76200208	0.80221076	0.54208301
QCH	0.90410658	0.91332166	0.95468885	0.95771432	0.95871938	0.9842371
K	0.77122412	0.77122622	0.89177386	0.89658045	0.89996295	0.89373458
T	0.91849751	0.92338241	0.95801859	0.96005373	0.96011176	0.98553963
DP	0.27413962	0.29746707	0.30312839	0.30943762	0.66735532	0.3516916
RP	0.08182793	0.0862834	0.18330298	0.24221116	0.56756782	0.34559904
LP	0.00437783	0.08307331	0.09822549	0.55453153	0.58294886	0.16942679
DF	0.45625288	0.48794487	0.49051119	0.63143896	0.63529685	0.32907403
RF	0.02804969	0.73087198	0.73878624	0.7561108	0.76084155	0.42827756
LF	0.00659763	0.00956411	0.02098427	0.58467836	0.62311381	0.19368266
DE	0.00907206	0.13129501	0.13856698	0.15090145	0.6023126	0.15012301
RE	0.03288617	0.5242473	0.5257486	0.52593972	0.55896635	0.27770757
LE	0.55194553	0.55710431	0.6172416	0.61729277	0.62086223	0.40082697

Con tales asociaciones, las componentes principales de la acuosidad de las RBP en el territorio vienen definidas por factores de la estructura del campo de propiedades físicas que, en suma, parecen estar controlados, casi exclusivamente, por factores estructurales y por factores de diseño (Tabla 3). Estos factores tectónicos, y a los que es necesario dedicar la mayor atención, son, en orden de importancia, los escarpes tectónicos y las fallas. De los factores de diseño, los más importantes resultan la profundidad total del pozo y la distancia a que este se perfora de los escarpes y, en menor grado, de las fallas. Este es un resultado de una importancia excepcional, y parece que se trata de una regularidad en el control de la acuosidad de las RBP, como ha sido destacado en trabajos anteriores (Molerio, 1993, 1994, 1997; Molerio, Núñez y Guerra, 1992; Molerio et al., 1997a, 1997b, 1997c, 1998; Núñez, 1997, 1998a, 1998b, 2011, Núñez y Guerra, 1995, 1996; Núñez y Polo, 2010).

Las comunalidades observadas (Tabla 4) muestran la extraordinaria importancia del campo de transmisividad en el control de la acuosidad de las RBP. Los atributos T y QCH comparten más del 90 % de la varianza de las 16 variables seleccionadas finalmente. Las funcionales de discriminación del caudal respecto a los factores estructurales y de diseño, ajustadas a un polinomio de cuarto grado y 95 % de certidumbre se presentan en las Figuras 4-11.

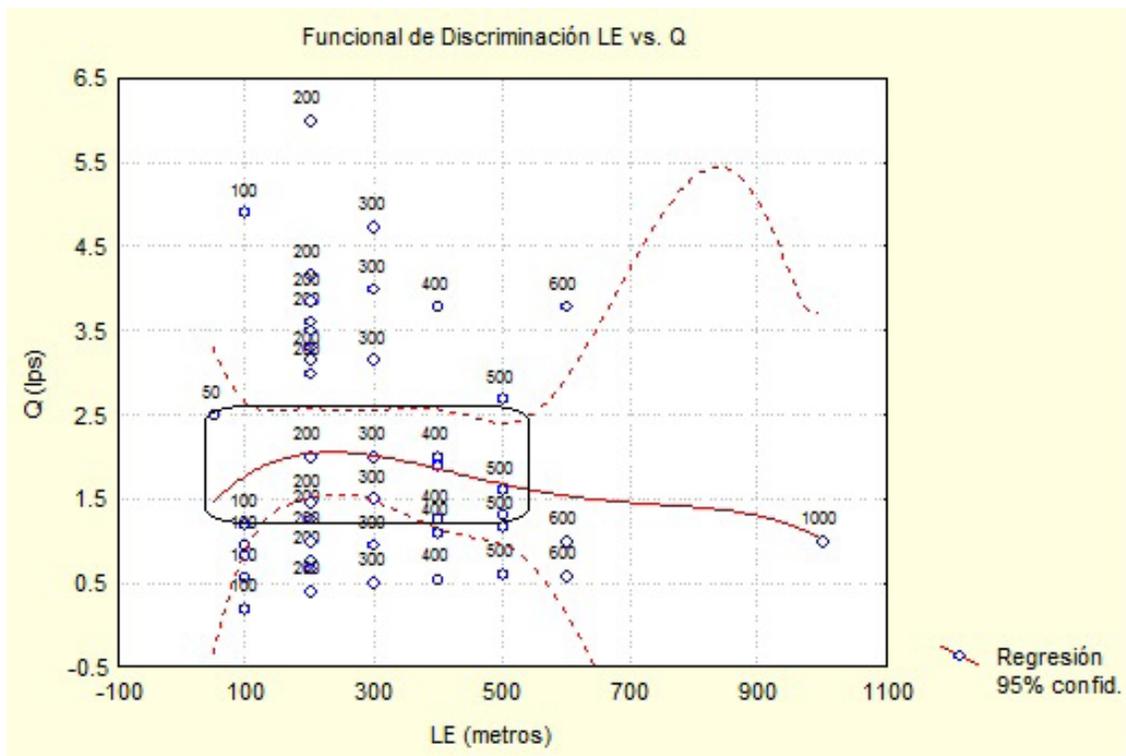


FIGURA 4. Funcional de discriminación $LE=f(Q)$

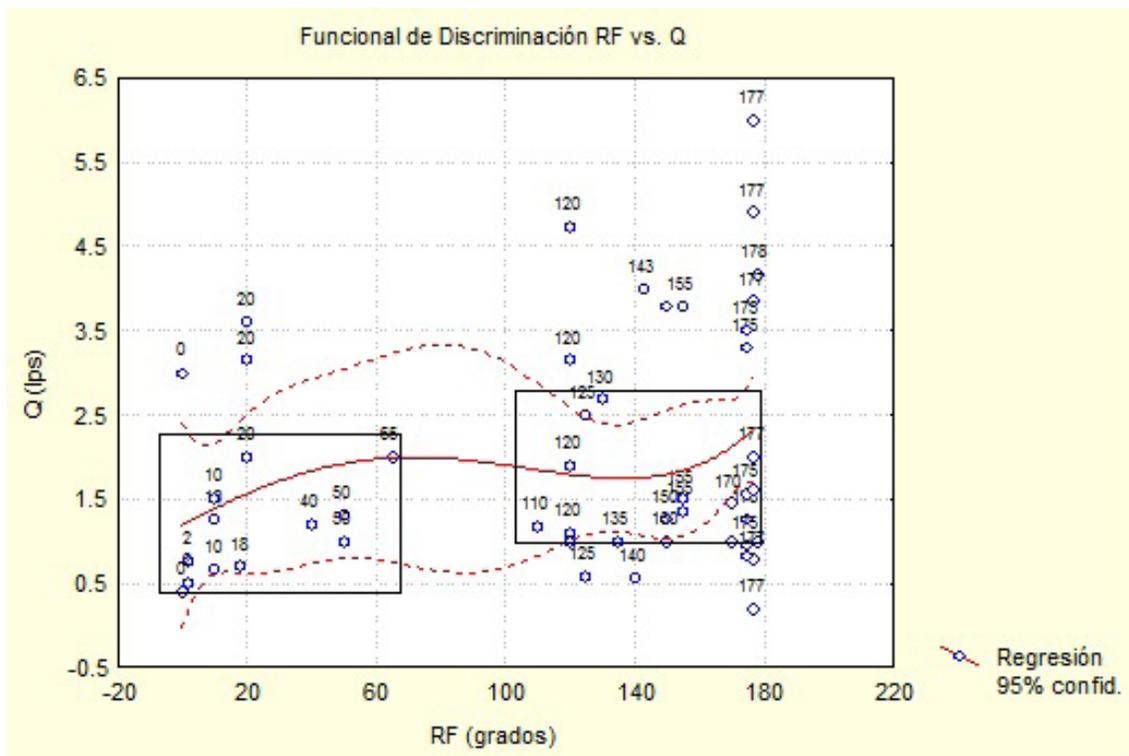


FIGURA 5. Funcional de discriminación $RE=f(Q)$

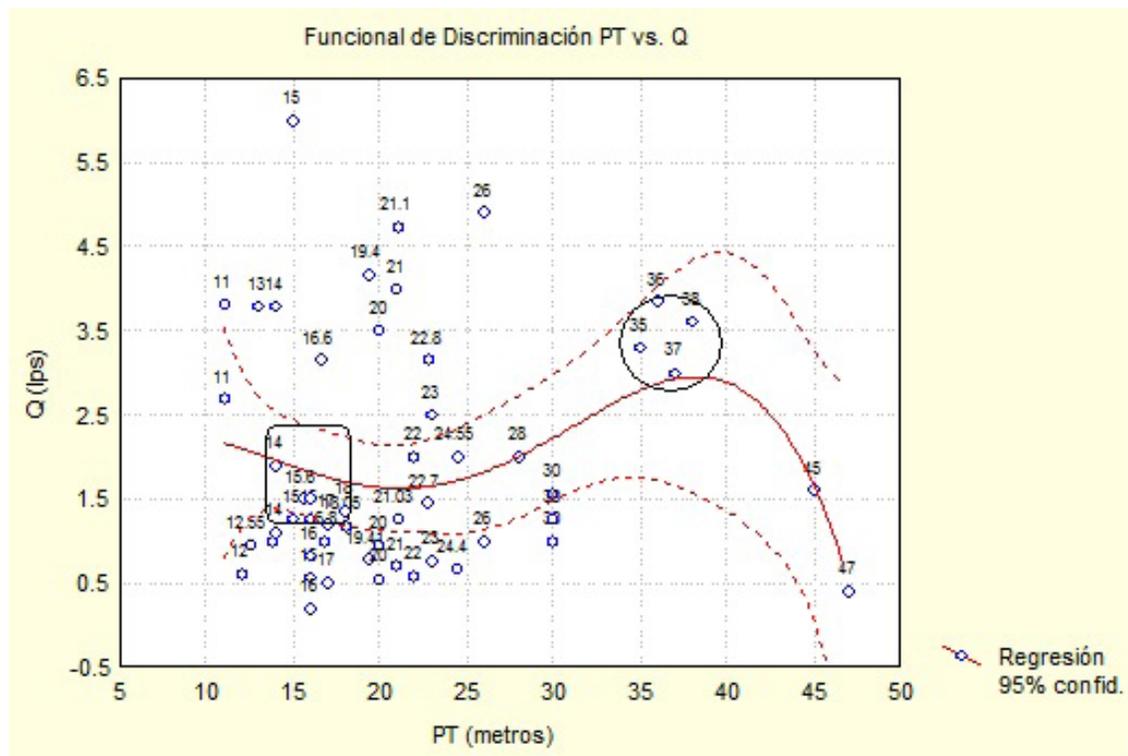


FIGURA 6. Funcional de discriminación $PT=f(Q)$

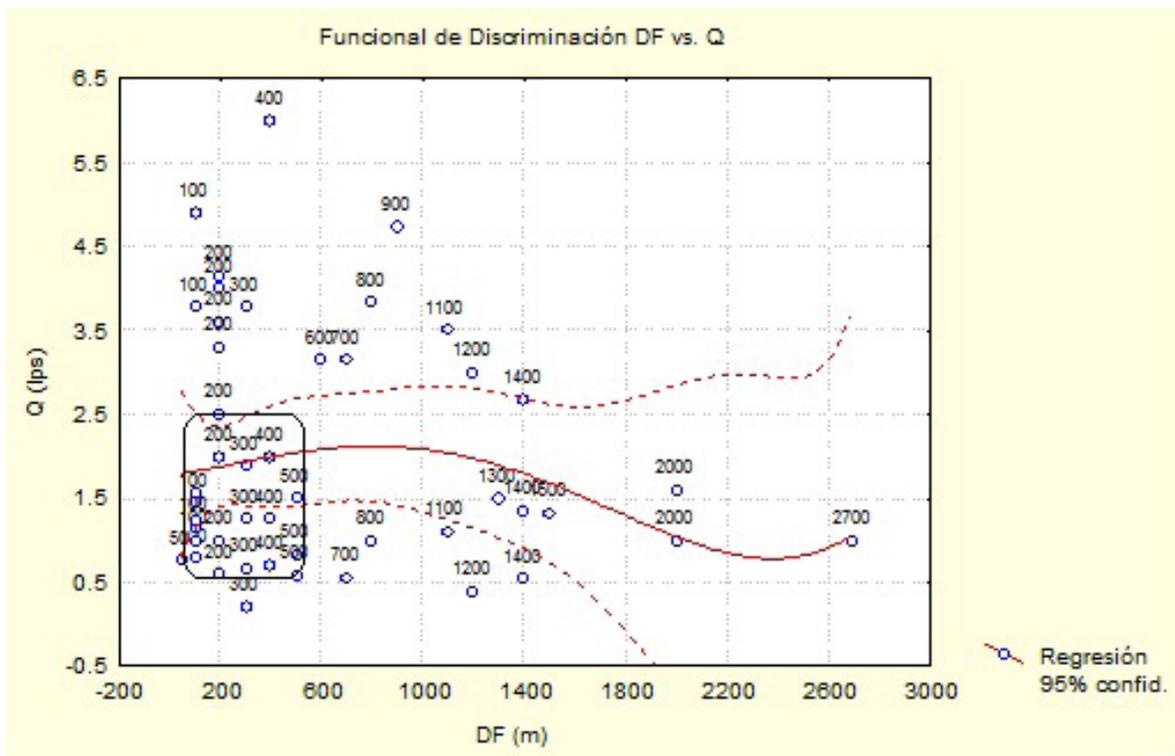


FIGURA 7. Funcional de discriminación $DF=f(Q)$

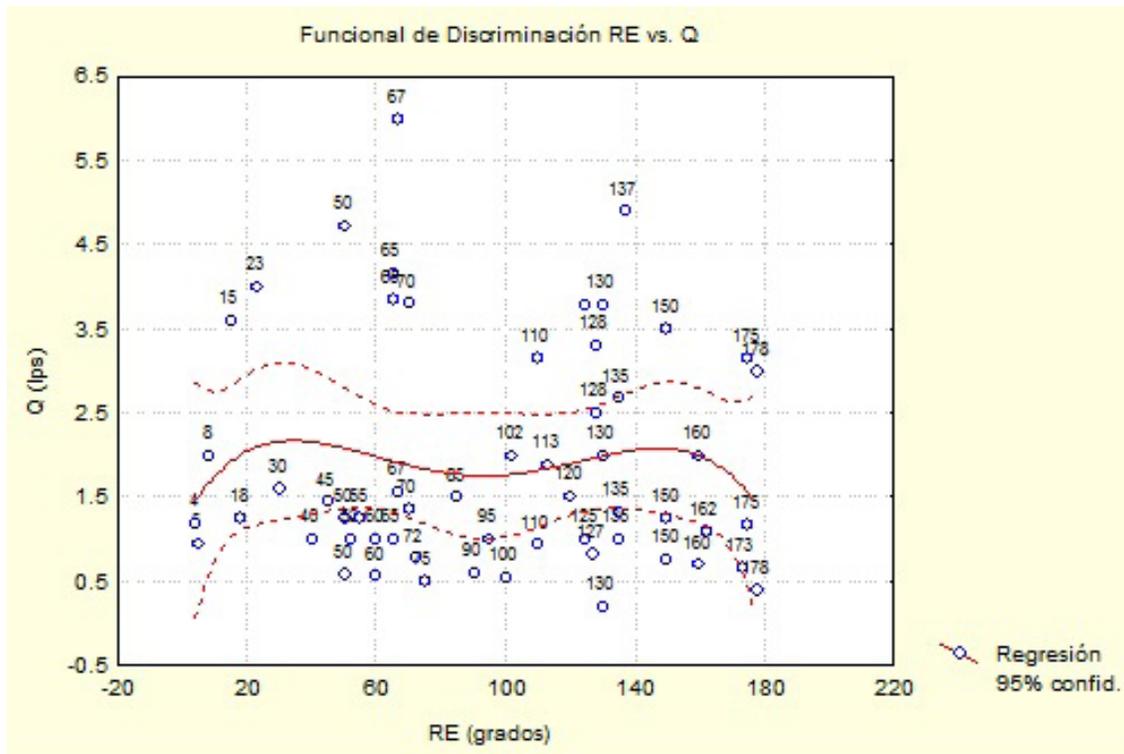


FIGURA 8. Funcional de discriminación $RE=f(Q)$

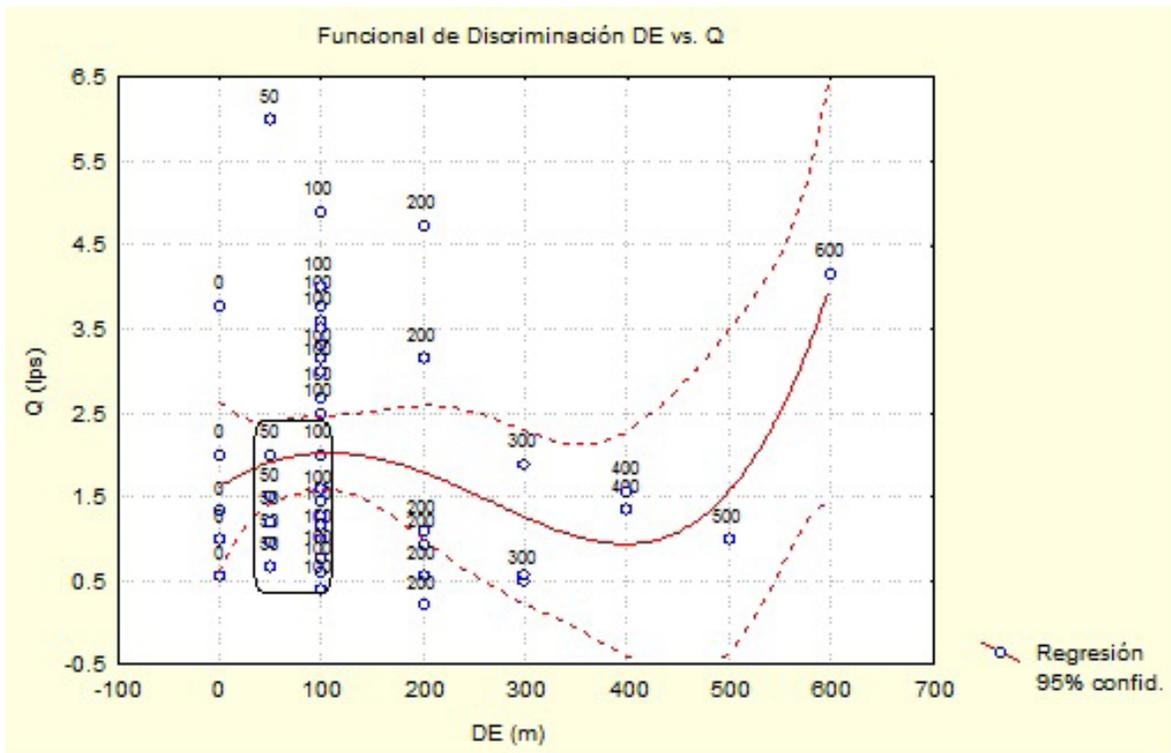


FIGURA 9. Funcional de discriminación $DE=f(Q)$

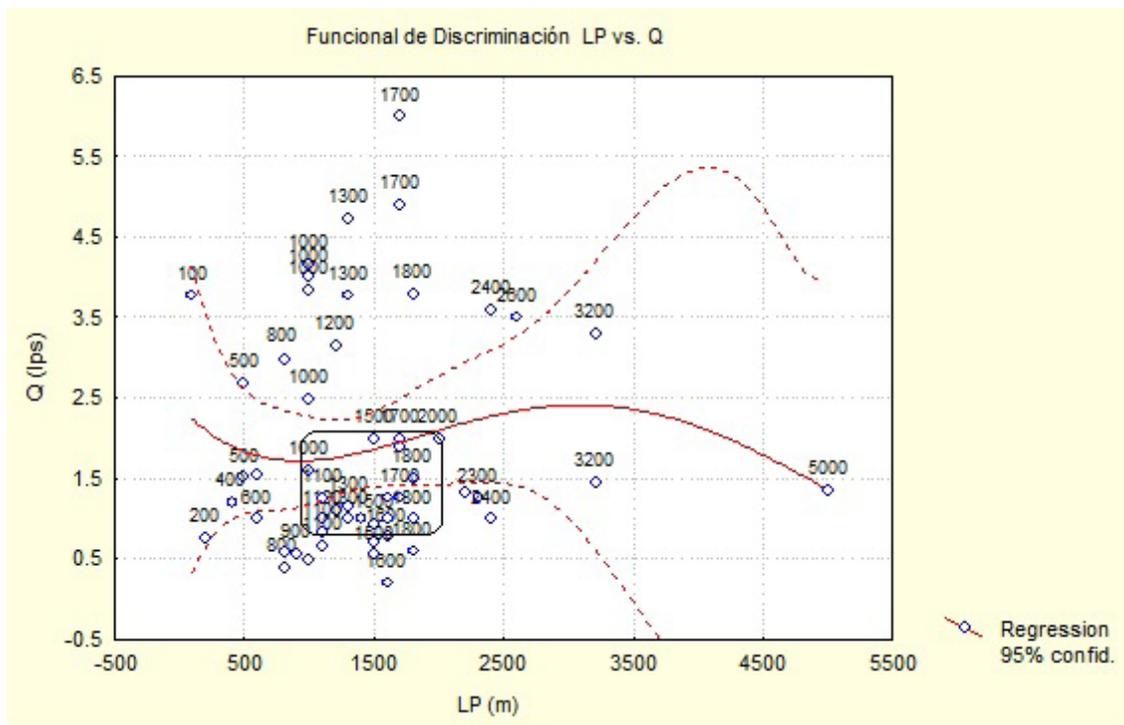


FIGURA 10. Funcional de discriminación $LP=f(Q)$

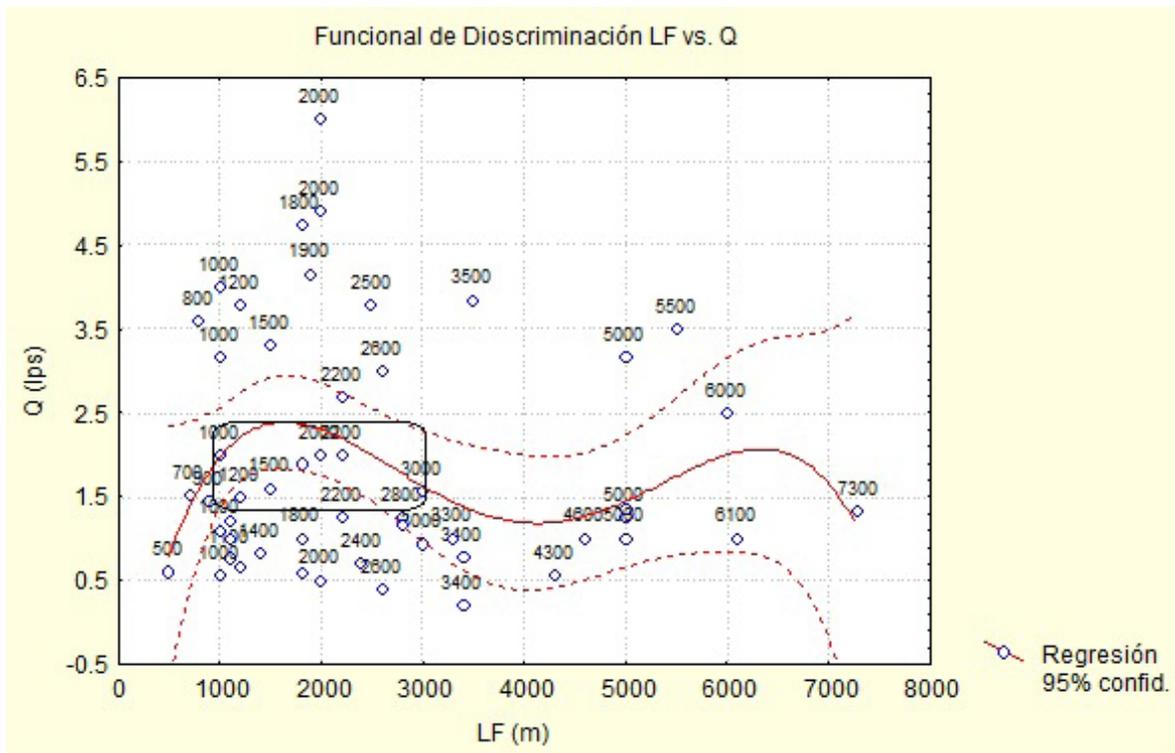


FIGURA 11. Funcional de discriminación $LF=f(Q)$

Las SLC que se derivan de la matriz de cargas factoriales, tomando los indicadores significativos 0,7, son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 0,96T + 0,95QCH + 0,88K + 0,74Q \\
 y_2 &= 0,74LE + 0,68DF + 0,67NE \\
 y_3 &= -0,84RF + 0,70RE \\
 y_4 &= -0,88PT - 0,68S \\
 y_5 &= -0,75LF - 0,68LP \\
 y_6 &= -0,67DE
 \end{aligned}$$

Puede notarse que, en conjunto, las variables estructurales directas; es decir, aquellas relacionadas con elementos tectónicos, se distribuyen en tres componentes (y_2 , y_3 , y_5), que acumulan la tercera parte de la varianza total. Los factores de diseño se reúnen en otras dos componentes (y_4 , y_6), que explican el 17 % de la varianza total. Es fácil concluir que el papel fundamental en el control del campo de propiedades físicas (y_1) se deba a factores estructurales locales.

INDICACIONES PARA LA PROSPECCIÓN EN EL CASO DE ESTUDIO

La distribución en el espacio n-factorial de las variables que integran las seis componentes principales, permite descubrir un conjunto de relaciones funcionales y estructurales bajo el criterio de máxima semejanza. Estas relaciones se emplean para, en el caso que nos ocupa, seleccionar el atributo Q como elemento patrón en la funcional de discriminación y abordar las restricciones que los restantes atributos imponen. Como resultado del estudio puede concluirse que las condiciones más favorables de acuosidad se encuentran en la convergencia de los rangos de los atributos. Así, acuosidades entre 0,5 y 2,3 lps, pueden encontrarse en las convergencias de la Tabla 5.

TABLA 5. Convergencias recomendables para caudales esperados en el rango 0,5-2,3 lps en el territorio examinado

Factores estructurales	Rango
Longitud de escarpe tectónico (m)	100 - 500
Longitud de falla (m) 1	000 - 3000
Longitud de paleovalle (m) 1	000 - 2000
Rumbo de falla (°)	10 - 20; 40 - 50; 150 - 155; 170 - 180
Rumbo de escarpe tectónico (°)	40 - 60; 120 - 135
Factores de diseño	Rango
Profundidad total del pozo (m)	14-18
Distancia del pozo al escarpe tectónico (m)	50 - 100
Distancia del pozo a las fallas (m)	100 - 500

CONCLUSIONES

1. Seis factores contribuyen a explicar el 71 % de la varianza total.
2. La estructura del espacio de las componentes principales reconoce, en la primera componente, variables de la estructura del campo de propiedades físicas (CPF), es decir: T, QCH, K y Q; en la segunda componente, se combinan la métrica del escarpe (LE) y la profundidad del nivel de las aguas subterráneas (NE), lo que

sugiere que la longitud de los escarpes tectónicos ejerce un control sobre la profundidad a que yacen las aguas subterráneas; en la tercera componente, se combinan factores estructurales, en ese orden los rumbos de las fallas (RF) y de los escarpes (RE). La cuarta componente involucra un factor de diseño, la profundidad total de los pozos (PT); la quinta un factor estructural, la longitud de las fallas (LF) y la sexta componente, un factor de diseño, la distancia del pozo a los escarpes tectónicos.

3. Con tales asociaciones, las componentes principales de la acuosidad de las RBP en el territorio vienen definidas por factores de la estructura del campo de propiedades físicas que, en suma, parecen estar controlados, casi exclusivamente, por factores estructurales y por factores de diseño.
4. Estos factores tectónicos, y a los que es necesario dedicar la mayor atención, son, en orden de importancia, los escarpes tectónicos y las fallas.
5. De los factores de diseño, los más importantes resultan la profundidad total del pozo y la distancia a que este se perfora de los escarpes y, en menor grado, de las fallas.
6. Las comunalidades observadas (Tabla 4) muestran la extraordinaria importancia del campo de transmisividad en el control de la acuosidad de las RBP. Los atributos T y QCH comparten más del 90 % de la varianza de las 16 variables seleccionadas finalmente.
7. El criterio de máxima semejanza aplicado al tratamiento de la funcional de discriminación, permite concluir que pueden esperarse caudales entre 0,5 y 2,3 lps, asociados a escarpes tectónicos, fallas y paleovalles, cuya longitud se encuentre, respectivamente, en los rangos de 100-500, 1000-3000 y 1000-2000 metros. De las fallas y escarpes tectónicos, las más acuíferas son las que se encuentran, respectivamente, en los rumbos 10 – 20; 40 – 50; 150 – 155; 170 – 180 y, 40 – 60; 120 – 135 grados.
8. En tales casos, las profundidades de los pozos no deben sobrepasar el rango 14-18 m y situarse a distancias de los escarpes tectónicos y a las fallas, respectivamente, de 50 – 100 y 100 – 500 metros.

RECONOCIMIENTOS

Los estudios sistémicos de prospección y desarrollo de aguas subterráneas fueron iniciados y promovidos en nuestro colectivo en Cuba por el coautor Núñez Lafitte, motivados por la necesidad de reducir los costos de perforación no efectiva en las rocas de baja permeabilidad del país, particularmente aquellas en la región de Camagüey. En paralelo, revisó y diseñó métodos efectivos de construcción de pozos, dedicando una atención especial al tema del ranurado y los filtros. Animó la introducción de métodos de modelación geomatemática y de geoestadística para orientar las perforaciones y siempre agradeceré su invitación a participar en esos proyectos. Mi gratitud, también, a los colegas que contribuyeron eficazmente a los estudios que aquí se resumen en apretada síntesis; en particular, Gladys Yera, Daniel Mendoza Pupo, Iván González, Ernesto Varela, José A. Valdés, Luis A. Barreras Abella y Maritza Elías Rodríguez.

REFERENCIAS

- Braud, I. & Obled, Ch. (1990): Utilisation de l'Analyse en Composantes Principales dre Processus pour la Simulation de Champs Bidimensionnels. *Sci. De la Terre*.
- Mardia, K. V.; Kent, J. T. & Bibby, J. M. (1979): *Multivariate Analysis*. Academic Press.
- Molerio León, Leslie F. (1993): *Dinámica del Flujo Regional en el Macizo Metamórfico de la Isla de la Juventud*. Taller sobre Aplicación de Técnicas Isotópicas en el Estudio de los Recursos y la Contaminación de las Aguas, OIEA, Maracaibo. Venezuela.

- Molerio León, Leslie F. (1994): *Isotopic and Geochemical Regionalization of a Tropical Karst Aquifer*. Internatl. Symp. Isotopes in Water Resources Management. OIEA, Vienna. Austria. Paper IAEA-SM-336/88P.
- Molerio León, L. F. (2005): Prospección hidrogeológica en rocas de baja permeabilidad: Modelo RBP. Mapping, *Revista Internacional Ciencias de la Tierra* (106). Madrid. Noviembre: 30-38.
- Molerio León, Leslie F.; Núñez Laffitte, M. y Guerra Oliva, M. (1992): *Índices de acuosidad de las tectonitas de la Cuenca Central de Cuba*. 1er. Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana: 30.
- Molerio León, Leslie F.; Guerra Oliva, M. G.; Flores Valdés, E. & Rocamora Álvarez, E. (1997 a): *Hydrogeological Prospecting with Geomathematical Tools in Karstic and Fissured Non-Karstic Aquifers*. Internatl. Symp. Hydrology in the Humid Tropic Environment. Kingston, Jamaica. AIHS: 19.
- Molerio, L. F.; Guerra, M.; Rocamora, E.; Flores, E. & Núñez, M. (1997 b): Prospección Hidrogeológica en Rocas de Baja Permeabilidad en Cuba. Resultados de la Aplicación de Técnicas Geomatemáticas y Geometría del Fractal. in/ Yélamos, J. G. & F. Villarroya (Eds): *Hydrogeology of Hard Rocks. Some Experiences from Iberian Peninsula and Bohemian Massif*. Madrid: 79-87.
- Molerio León, L. F.; Guerra Oliva, M. G.; Flores Valdés, E.; Rocamora Álvarez, E.; Núñez Laffitte, M.; Portuondo López, Y. & Batista, J. C. (1997c): Técnicas Geomatemáticas en Hidrogeología: Aplicaciones en Cuba. in/ Arellano, D. M.; Gómez-Martín, M. A. & I. Antigüedad (Eds): *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. Eibar, País Vasco: 25-42.
- Núñez Lafitte, M. (1997): Aplicación de técnicas geográficas en la hidrogeología de rocas duras. Casos de Estudios. *Revista Voluntad Hidráulica*. 87-88.
- Núñez Lafitte, M. (1998 a): *Los acuíferos en rocas duras, su ocurrencia e importancia*. III Congreso de Geología y Minería. La Habana.
- Núñez Lafitte, M. (1998 b): *Los modelos fluviales en rocas duras. Su significación en la perforación de pozos, casos de estudios en Cuba*. Propuesta de Tesis para la obtención del grado científico de Dr. en Ciencias Geográficas. 104.
- Núñez Lafitte, M. (2011): Un análisis de la transmisividad en las fracturas en los ensayos de bombeo. Estudio de caso en el macizo central de la Isla de la Juventud. *Mapping*. España. marzo-abril: 48-53.
- Núñez Lafitte, M.; Guerra, M. (1995): *Análisis de los riesgos en la perforación de pozos en rocas de baja permeabilidad*. V Congreso Internacional de Geógrafos. La Habana.
- Núñez Lafitte, M.; Guerra, M. (1996): *Los acuíferos en rocas duras. Su ocurrencia, uso e importancia*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. La Habana.

Núñez Lafitte, M.; Guerra Oliva, M.; Molerio León, L. (2011): Un enfoque a la prospección de aguas subterráneas en rocas ígneas y metamórficas en zonas de Cuba. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. Versión impresa. ISSN 1316-4821. uct v.15 n.58. Puerto Ordaz mar. 5.

Núñez Lafitte, M.; Polo, B. (2010): Un análisis hidrogeológico en rocas duras. Casos de estudio a nivel mundial y en Cuba. *Mapping*: 26-30. UNESCO (1985): *Aguas subterráneas en rocas duras*. Proyecto 8.6 Programa Hidrológico Internacional. París. 298.

Como citar:

Núñez Lafitte, M.; Molerio-León, M.F. (2022): Aproximación geomatemática a la prospección de aguas subterráneas en rocas de baja permeabilidad: Modelo RBP. *Geoinformativa*. 15 (2) 17-35.

Licencia:

Este artículo está protegido bajo una licencia Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA) la cual permite compartir (copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato) y adaptar (remezclar, transformar y crear a partir del material), por lo que los autores, son libres de compartir su material en cualquier repositorio o sitio web.

