

Distribución espacial de los parámetros hidráulicos en diversos medios hidrogeológicos

Jirí Krásný

Faculty of Science Charles University. Albertov, 6, 12843 Praha 2. Czech Republic
E-mail: krasny@natur.cuni.cz

RESUMEN

Con base en los datos hidrogeológicos de la República Checa y algunos otros países se compara la magnitud, la variabilidad y la distribución de la transmisividad en diversos medios hidrogeológicos. La transmisividad predominante se expresa por medio de una clasificación. Se presenta una imagen regional de la distribución de la transmisividad en medios fracturados y de porosidad doble e intergranular. Así es posible estimar los intervalos probables de transmisividad en estos medios. Lo que ayuda a facilitar una base para la planificación de actividades futuras en hidrogeología y en las ramas afines y sacar conclusiones prácticas para la implementación de modelos conceptuales y numéricos de flujo regional de aguas subterráneas.

Palabras clave: distribución espacial, medio hidrogeológico, permeabilidad, transmisividad

Hydraulic parameter spatial distribution in distinct hydrogeologic environments

ABSTRACT

Transmissivity magnitude, variation and distribution are compared in distinct hydrogeologic environments, based on hydrogeologic data from the Czech Republic and some other countries. Prevailing transmissivity is expressed by means of a transmissivity classification. In this way, probable intervals of transmissivity values of different fractured, double and intergranular hydrogeologic environments might be assessed in a regional scale. This can help in planning future activities in hydrogeology and allied branches and in implementation of conceptual and numerical models of regional groundwater flow.

Key words: hydrogeologic environment, permeability, spatial distribution, transmissivity

Introducción

Generalmente, el medio hidrogeológico puede definirse por unos tipos básicos caracterizados por la geometría (extensión y espesor) y morfología (estructura interna - tipo de porosidad) de los sistemas hidrogeológicos - acuíferos y acuitardos. Diferentes condiciones naturales durante la historia geológica han originado una variabilidad y distribución espacial de la porosidad y permeabilidad de los sistemas hidrogeológicos extremadamente compleja. Bajo condiciones naturales el medio hidrogeológico nunca es homogéneo e isótropo.

Pese a esta situación compleja, en los estudios hidrogeológicos habituales se usan diferentes valores de parámetros hidráulicos estimados o promedios. Eso resulta principalmente del hecho que nuestro conocimiento de las propiedades del medio hidrogeológico y de la distribución espacial de los

parámetros hidráulicos más comunes no es adecuado para las sofisticadas herramientas de investigación actualmente utilizadas, representadas por los modelos numéricos. Sin embargo, la definición correcta de la geometría y la morfología del medio hidrogeológico así como la calidad de los datos usados es el requisito indispensable a la implementación de los modelos tanto conceptuales como numéricos del flujo de agua subterránea y del transporte de las sustancias solubles.

Más abajo se presentan resultados de estudios hidrogeológicos regionales realizados en la República Checa, comparados con los de otros países, lo que hace posible estimar los intervalos probables de los parámetros hidráulicos en diferentes medios hidrogeológicos y definir su distribución. Tal conocimiento ofrece una posibilidad de predecir las condiciones hidrogeológicas, aunque como primera aproximación, hasta en terrenos sin datos suficientes.

Metodología

Acuíferos y acuitardos se distinguen cualitativamente por su morfología y cuantitativamente por los valores de sus parámetros hidráulicos. Los últimos se usan para expresar la capacidad de un medio hidrogeológico de proporcionar agua, generalmente por medio de pozos perforados o excavados. Este es el objetivo de la mayoría de los estudios hidrogeológicos, bien sea el agua subterránea un recurso de abastecimiento para la población, una molestia en diferentes construcciones subterráneas o un medio de transporte de contaminantes.

Recientemente, en muchas regiones se dispone de gran cantidad de datos de transmisividad y permeabilidad determinados mediante pruebas de bombeo de los pozos. Esto permite tratar los datos estadísticamente. Se realizaron diferentes estudios donde las poblaciones (muestras) estadísticas se han delimitado según unidades hidrogeológicas, tipos de rocas o posición estructural, geomorfológica e hidrogeológica de los pozos. Así se ha adquirido una información importante respecto a la distribución espacial de la permeabilidad y la transmisividad dentro de diferentes medios hidrogeológicos.

En los estudios hidrogeológicos regionales es conveniente utilizar los valores de transmisividad en vez de correspondientes a permeabilidad (Krásný, 1996). Esto se debe a que el conocimiento de la transmisividad hace posible, en una primera aproximación, estimar las posibilidades de aprovechamiento de agua subterránea en un área, por lo que se trata de una propiedad hidráulica muy importante desde el punto de vista práctico. Para el tratamiento estadístico de la transmisividad se recomienda el parámetro hidráulico regional (comparativo) - índice de transmisividad $Y = \log(10^6 q)$, introducido por Jetel y Krásný (1968), donde q es el caudal específico, expresado en l/s por metro. El índice Y se estima con sencillez y posibilita aprovechar la mayor cantidad de datos, lo que es una ventaja para el tratamiento estadístico, e incluso aquellos de menor precisión que no servirían para la estimación del parámetro hidráulico exacto como es el coeficiente de transmisividad. Además, siendo el parámetro logarítmico, el índice Y es muy conveniente para el tratamiento de las muestras estadísticas de distribución logarítmico-normal a la que pertenece la mayoría de las muestras de transmisividad. Así, por el índice Y la distribución logarítmico-normal se convierte a la normal. Por eso resulta sencillo determinar los parámetros estadísticos elementales (\bar{x} = media aritmética de los valores logarítmicos, es decir media geométrica de las muestras estadísticas de los valores originales, s = desviación estándar) de los valores

de transmisividad de cada muestra estadística y consecuentemente el intervalo $\bar{x} \pm s$, donde se encuentra el 68% de los valores del índice Y de toda la muestra estadística alrededor de la media aritmética. Este intervalo es representativo para el área respectiva, formando así lo que consideramos el fondo hidrogeológico. Los valores de transmisividad fuera del intervalo $\bar{x} \pm s$ representan anomalías positivas o negativas (Figura 1).

El procedimiento mencionado forma una base para la clasificación de la magnitud y variabilidad de la transmisividad (Tablas 1 y 2) por la que puede expresarse de modo compacto el carácter de la transmisividad predominante en el área estudiada (Krásný, 1993). Por eso la clasificación puede aprovecharse bien en los mapas hidrogeológicos, tablas y figuras.

Los valores de transmisividad en áreas (muestras estadísticas) diferentes pueden representarse por frecuencias acumuladas relativas en un papel probabilístico (Figuras 1, 4, 5). De las figuras pueden estimarse las diferencias entre la magnitud (según la posición de la línea) y la variabilidad (según la inclinación de la línea) de la transmisividad en áreas particulares.

Más detalles sobre la metodología usada y ejemplos concretos de su aprovechamiento pueden encontrarse por ejemplo en Krásný (1993, 1997) y Krásný y Hecht (1998).

Cambios de permeabilidad en las rocas: causas principales

La distribución espacial de los parámetros hidráulicos depende del tipo de medio hidrogeológico y de su estructura, determinada por el tipo de porosidad. Se conoce bien que el tipo de porosidad, en general, cambia con la edad de las rocas. En los acuíferos detríticos no cementados o poco cementados de cuencas hidrogeológicas predomina la porosidad intergranular. Por los procesos de compactación y cementación hasta el metamorfismo y por los movimientos tectónicos la porosidad intergranular disminuye y a la vez aparece la porosidad de fisuración, lo que resulta en una doble porosidad. Las rocas bien compactadas (rocas duras) de gran edad geológica son caracterizadas por su porosidad de fisuración. El proceso de estos cambios suele acelerarse por plegamiento de las rocas.

Además del tipo de porosidad, los valores de permeabilidad y transmisividad determinados muestran un "efecto de escala". Eso significa que, dependiendo del tamaño y carácter de los poros, un volumen muy pequeño de una roca puede considerarse extre-

madamente heterogéneo y anisótropo. Bajo estas condiciones, es decir a escala local, los valores promedio de permeabilidad (conductividad hidráulica) varían extremadamente desde un lugar a otro, dependiendo del hecho de si predominan los poros o la roca sólida. Si el área -volumen- se extiende, los valores promedio y también los predominantes se acercan (Schulze-Makuch y Cherkauer, 1998; Rovey II ChHW, 1998). Así puede deducirse que los valores representativos de los parámetros hidráulicos dependen en general de los métodos usados para su determinación (Rats, 1967; Rats y Chernyshov, 1967; Király, 1975). Una estimación de permeabilidad de laboratorio, por ejemplo, puede diferir considerablemente de los resultados de una testificación geofísica en un pozo o de una prueba de bombeo. En un área de estudio suficientemente extensa (a escala regional), los

valores promedio resultan casi los mismos prescindiendo de la posición dentro de este medio. Así, en un medio hidrogeológico caracterizado por los elementos de heterogeneidad del mismo tipo y dimensión (poros intergranulares, fisuras pequeñas o zonas fracturadas extensas etc.) la distribución de la conductividad hidráulica y de la transmisividad y sus valores promedio son análogos en diferentes áreas extensas.

La dimensión (volumen) de un área que representa un límite inferior sobre el cual no aparecen cambios de los valores de permeabilidad o transmisividad promedio, se define como un volumen elemental representativo, VER (Bear, 1972). Sin embargo, la presencia de elementos de heterogeneidad más grandes puede resultar en otras diferencias suplementarias de los valores de transmisividad y la magnitud del VER

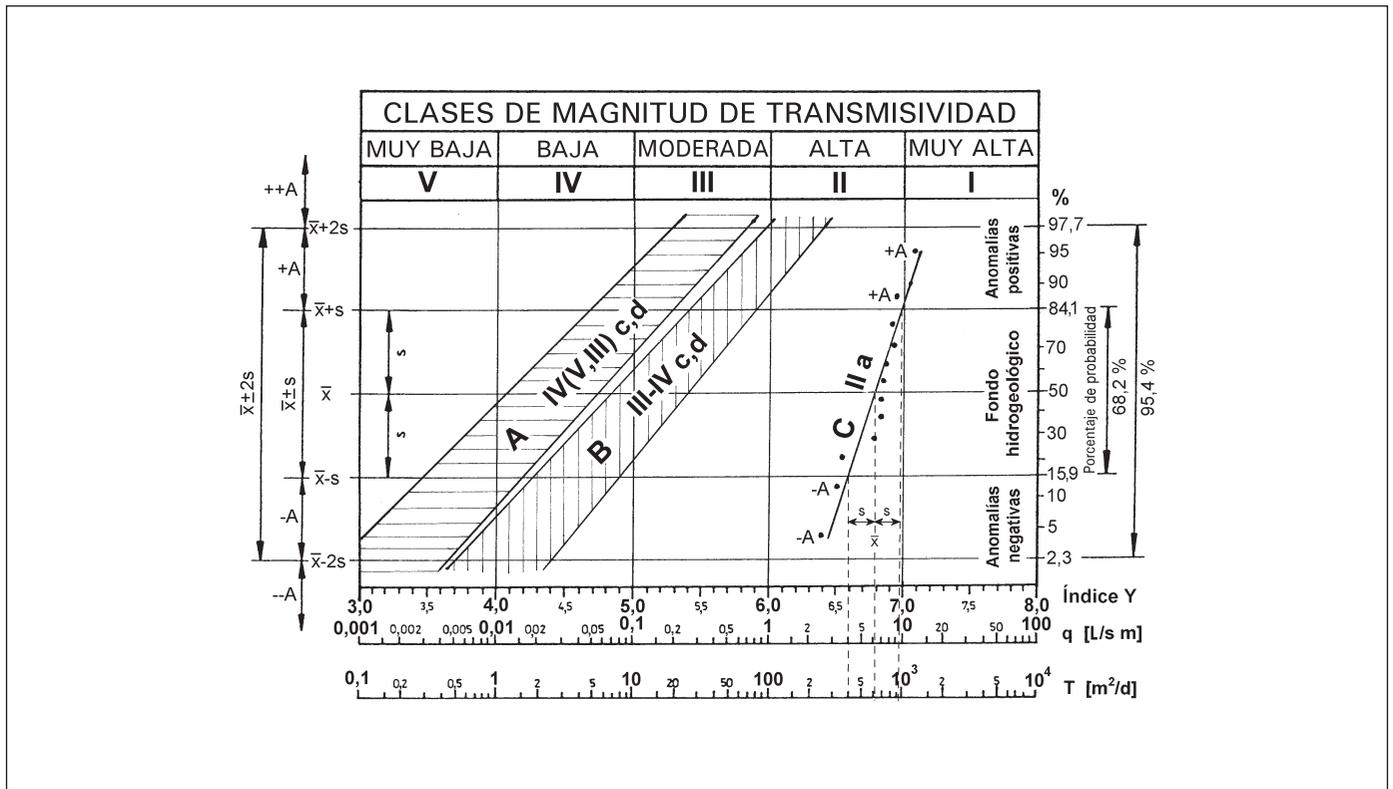


Fig. 1. Frecuencias acumuladas relativas: campos de transmisividad predominante de las rocas duras y su clasificación (interpretación de los resultados de pruebas de bombeo - según Krásný 1999). Índice Y = índice de transmisividad ($Y = \log 10^6 q$), q = caudal específico en L/s m, T = coeficiente de transmisividad en $m^2/día$, \bar{x} = media aritmética, s = desviación estándar, ++A, +A, -A, -A = campos de anomalías positivas y negativas (+A, -A) y anomalías extremas (++A, -A) fuera del intervalo $\bar{x} \pm s$ de transmisividad predominante (= fondo hidrogeológico); A - campo de transmisividad que abarca la mayoría de las rocas duras; B - campo de transmisividad que abarca la mayoría de calizas cristalinas (mármoles); C - frecuencia acumulada relativa de transmisividad de sedimentos fluviales Cuaternarios a lo largo del Río Labe (para comparar con los campos A, B de rocas duras): es de destacar que no solo la transmisividad es más alta sino también que la variabilidad es insignificante (inclinación de la línea - clase IIa). Las clases de la magnitud y variabilidad de la transmisividad según Krásný (1993)

Fig. 1. Relative cumulative frequency: prevailing transmissivity fields of hard rocks and their classification (Krásný, 1999). +A, -A: anomaly fields; A: transmissivity fields for most of hard rocks; B: transmissivity fields for most of cristaline limestone (marble); C: relative cumulative frequency of quaternary fluvial sediments along Labe river

Coeficiente de transmisividad (m ² /d)	Clase de la magnitud de la transmisividad	Denominación de la transmisividad del acuífero (del medio hidrogeológico)	Parámetros comparativos regionales aproximadamente correspondientes al coeficiente de transmisividad		Estimación de posibilidades aprovechamiento de agua subterránea. La demanda de agua puede cubrirse por extracciones	Caudal aproximado en L/s de un pozo con un descenso de 5 m
			No logarítmico: Caudal específico (L/sm)	Logarítmico: Índice de transmisividad Y		
----- 1,000 -----	I	Muy alta	----- 10 -----	----- 7.0 -----	de gran importancia regional	> 50
----- 100 -----	II	Alta	----- 1 -----	----- 6.0 -----	de menor importancia regional	5 - 50
----- 10 -----	III	Moderada	----- 0.1 -----	----- 5.0 -----	para abastecimiento local (sitios pequeños, plantas etc.)	0.5 - 5
----- 1 -----	IV	Baja	----- 0.01 -----	----- 4.0 -----	menores para abastecimiento local (grupos de casas, fincas pequeñas)	0.05 - 0.5
----- 0.1 -----	V	Muy baja	----- 0.001 -----	----- 3.0 -----	para abastecimiento local de demanda reducida	0.005 - 0.05
	VI	Imperceptible			hasta el abastecimiento local es muy difícil de asegurar	< 0.005

Tabla 1. Clasificación de la magnitud de la transmisividad (según Krásný, 1993)
 Table 1. Transmissivity magnitude classification (after Krásný, 1993)

Desviación estándar del índice de transmisividad Y (*)	Clase de variabilidad de la transmisividad	Denominación de la variabilidad de transmisividad	Denominación del medio hidrogeológico desde el punto de vista de su heterogeneidad hidráulica (**)
----- 0.2 -----	a	Insignificante	Homogéneo
----- 0.4 -----	b	Pequeña	Poco heterogéneo
----- 0.6 -----	c	Moderada	Bastante heterogéneo
----- 0.8 -----	d	Grande	Considerablemente heterogéneo
----- 1.0 -----	e	Muy grande	Muy heterogéneo
	f	Extremadamente grande	Extremadamente heterogéneo

(*) o de otro parámetro expresando transmisividad en la modificación logarítmica
 (**) puede usarse también con la clasificación de la permeabilidad

Tabla 2. Clasificación de la variabilidad de la transmisividad (según Krásný, 1993)
 Table 2. Transmissivity variability classification (after Krásný, 1993)

puede extenderse considerablemente. El ejemplo del medio fracturado y las consecuencias en la distribución de su permeabilidad según la extensión del área puede verse en la Figura 2.

Transmisividad predominante en diferentes tipos de rocas

Las causas geológicas son determinantes para la geometría y morfología de los sistemas hidrogeológicos -acuíferos y acuitardos-, por tanto también lo son para la distribución de su permeabilidad y transmisividad. Sin embargo, su influencia difiere considerablemente en diferentes medios hidrogeológicos. En el texto siguiente se presentan ejemplos de distribución de valores de transmisividad según los resultados de estudios hidrogeológicos regionales, lo que facilita una estimación de valores predominantes y anómalos de transmisividad bajo condiciones diferentes. Todos los ejemplos se refieren a los resultados de pruebas de bombeo.

La clasificación de la magnitud y variabilidad de la transmisividad hace posible una estimación preliminar cuantitativa y real de la posibilidad de extraer agua de un acuífero y también comparar los resultados en áreas diferentes.

Rocas duras de porosidad por fracturación

El término un poco impreciso "rocas duras" en general comprende las rocas cristalinas (ígneas y metamórficas) y sedimentarias intensivamente cementadas (y a menudo plegadas) aunque existen opiniones diferentes respecto a las rocas que deben incorporarse al grupo. Un medio hidrogeológico de rocas duras se designa algunas veces, a diferencia del caso de las cuencas hidrogeológicas, como macizo hidrogeológico.

Una propiedad común de las rocas duras es que, en oposición a las rocas sedimentarias jóvenes, su carácter litológico influye poco en la distribución de la permeabilidad y la transmisividad. Por eso, la transmisividad predominante a escala regional -el "fondo hidrogeológico"- de la mayoría de las muestras estadísticas de rocas duras del Macizo Bohémico en la República Checa pertenece a las clases IV(-III) c,d, es decir transmisividad en unidades de m^2/d hasta un poco más que $10 m^2/d$, lo que puede representarse en el papel probabilístico por un campo A en la Figura 1. Debido a la fracturación y parcialmente a la meteorización diferencial, sin embargo, a escala local existen diferencias grandes de transmisividad en rocas duras

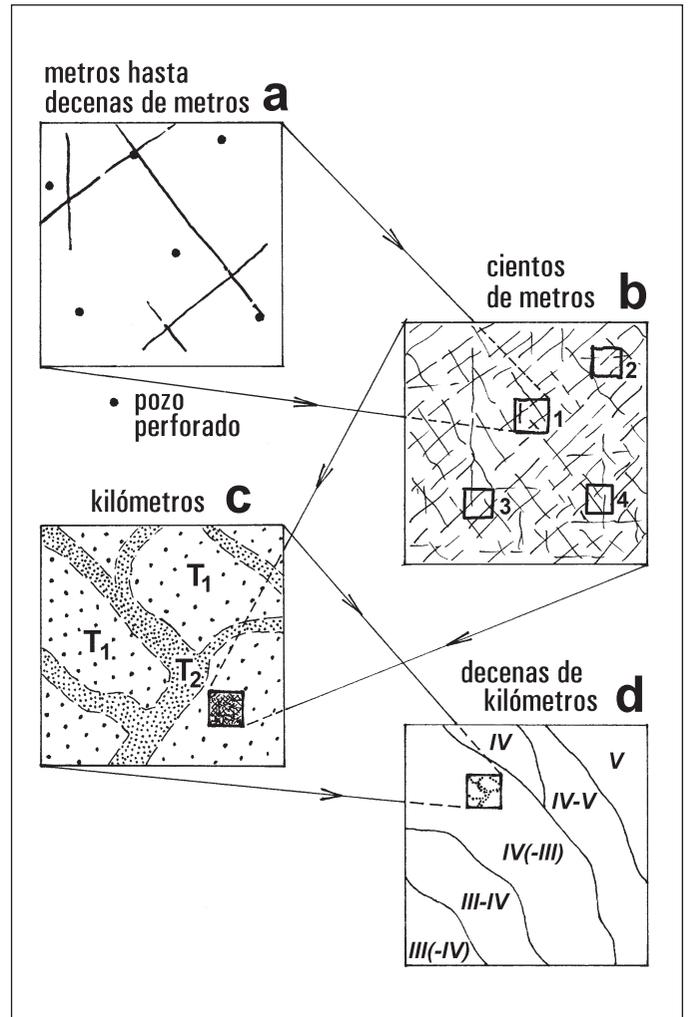


Fig. 2. Relación entre el tamaño de elementos decisivos de heterogeneidad hidrogeológica y la extensión del área del estudio - el caso del medio hidrogeológico fracturado (según Krásný 2000). a - fracturas en la escala local; b - fracturación (sub-) regional, más o menos regular, representando el fondo hidrogeológico; los cuadros 1-4 abarcan muestras estadísticas diferentes, caracterizadas por magnitud y variabilidad de la transmisividad semejantes; c - inhomogeneidades sub-regionales las cuales siguen los valles con cursos de agua: T₁ - menor transmisividad predominante, T₂ - mayor transmisividad predominante; d - cambios de transmisividad regionales causados por actividad neotectónica diferente. Los números romanos expresan la clase de la magnitud de la transmisividad según Krásný (1993)

Fig. 2. Relationships between decisive elements of hydrogeological heterogeneity and study area - fractured hydrogeological media (Krásný, 2000). a: local scale fractures; b: (sub-) regional fractures more or less regular, representative hydrogeological background; c: subregional inhomogeneities; d: regional transmissivity changes due to neotectonic activity

del mismo tipo litológico, de variaciones hasta tres ordenes de magnitud (las clases V hasta III; Figura 1). La misma distribución general de transmisividad de rocas duras fue confirmada por los estudios en varios

otros países como en Polonia (Staško y Tarka, 1996), Suecia (Carlsson y Carlstedt, 1977), Ghana (Darko y Krásný, 1998; Darko, 2001) y en Corea (estimado por Krásný según los datos de Callahan y Choi, 1973).

Hay pocas rocas duras que se separan del esquema descrito (Krásný, 2002). Los mármoles (calizas cristalinas) representan la excepción más evidente: su transmisividad predominante suele ser desde la mitad hasta un orden de magnitud más grande comparándola con otras rocas cristalinas (campo B en Figura 1).

A escala regional, las diferencias en la distribución de permeabilidad de las rocas pueden ser causadas por extensos elementos de heterogeneidad adicionales. Por ejemplo, la posición geomorfológica e hidrogeológica determina estas diferencias. En varios medios hidrogeológicos, e incluso en las rocas duras, se ha probado que dentro del marco de los límites determinados por las propiedades geológicas relevantes (especialmente litología y estructura), las zonas de descarga de aguas subterráneas se caracterizan generalmente por una permeabilidad mayor que las de recarga. Las diferencias han sido probadas en medios hidrogeológicos diferentes (Tabla 3, Figura 3) y sus causas posibles se han discutido en varios artículos (LeGrand, 1954; Krásný, 1974; Henriksen, 1995). Además de las causas estructurales el hecho ha sido explicado por la diferente actividad de agua subterránea en las dos zonas (Krásný, 1974). La conclusión más importante es que el medio hidrogeológico muchas veces hay que esquematizarlo regionalmente como un sistema de fajas de permeabilidad mayor a lo largo de los valles más que por un medio regionalmente homogéneo, hecho que puede ser

importante en la implementación de los modelos regionales de flujo de agua subterránea (Figura 2c).

Respecto a la distribución regional de la permeabilidad de las rocas duras, en Bohemia del sur han sido comprobadas tendencias regionales en cambios de la transmisividad predominante (Krásný, 1997; Havlík y Krásný, 1995) como consecuencia de movimientos neotectónicos (Figura 4d). Rohr-Torp (1994) observa tendencias similares en Noruega, correspondientes al escudo Fennoescandinavo, por lo que pueden esperarse unas tendencias regionales similares también en otras áreas de rocas duras, hecho que hasta ahora se ha atribuido sólo a los sedimentos por sus cambios de facies.

Rocas sedimentarias cementadas de porosidad doble

A este grupo pertenecen las rocas sedimentarias cementadas en menor grado. En estas rocas la porosidad por fracturación siempre es importante, pero dependiendo de la edad de las rocas y de la intensidad de su plegamiento se ha conservado una porosidad intergranular, lo que resulta en una variedad amplia de la porosidad llamada doble.

Estas rocas junto con las rocas poco cementadas forman la mayoría de las cuencas hidrogeológicas. Los acuíferos más importantes están representados por diferentes tipos de areniscas -puras, con cemento calcáreo, margoso o arcilloso, arcosas etc.-. La transmisividad de estos acuíferos abarca un intervalo amplio de las clases I hasta V.

Como puede verse en la Figura 4, los valores particulares de transmisividad de la zona poco profunda

Medio hidrogeológico	Transmisividad (m ² /día) (medias geométricas de muestras estadísticas)		Rangos de proporción de transmisividad de medias geométricas en depresiones y elevaciones (+ pendientes)
	Elevaciones y pendientes (zonas de recarga)	Depresiones (zonas de descarga)	
Rocas ígneas y metamórficas (partes diferentes de la República Checa)	1.2 - 2.8	4.5 - 13	1.6 - 11
Sedimentos del Proterozoico	0.95 - 4.2	17	4.0 - 18
Sedimentos Permocarboníferos (Cuenca del piedemonte de Krkonose)	11	26	2.4
Cuenca Bohémica Cretácica (areniscas Cenomanienses del NE)	4.7	95	20
Cuenca Bohémica Cretácica (areniscas calcáreas, región de Jizera)	25	750 - 950	30 - 38

Tabla 3. Comparación de la transmisividad promedio dependiendo a la posición geomorfológica e hidrogeológica (según Krásný, 1998)
Table 3. Comparison of average transmissivity depending on the geomorphologic and hydrogeologic position (after Krásný, 1998)

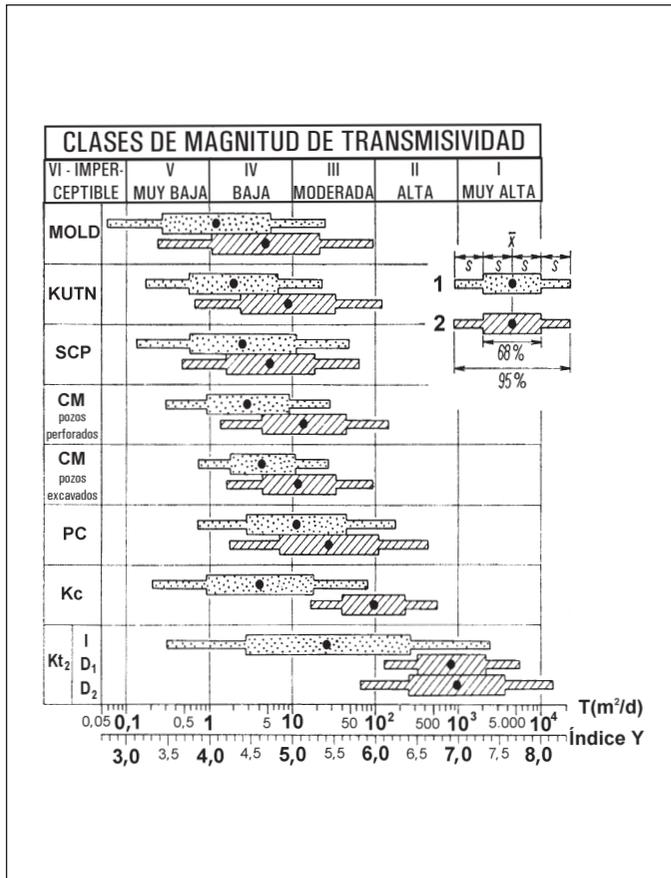


Fig. 3. Comparación de la transmisividad de rocas según su posición geomorfológica e hidrogeológica (según Krásný 1984). Intervalos probables de 68% y 95% de los valores de transmisividad (alrededor de la media aritmética de los valores logarítmicos). Ejemplos de muestras estadísticas de diferentes áreas de la República Checa - las clases de magnitud y variabilidad de la transmisividad (según Krásný 1993). 1 - muestras de pozos ubicados en las zonas de recarga (pendientes y elevaciones); 2 - muestras de pozos ubicados en las zonas de descarga (valles y cerros rellenos). (x̄) = media aritmética, s = desviación estándar. Pozos perforados: MOLD - rocas metamórficas de Bohemia del sur, KUTN - rocas metamórficas de los alrededores de la ciudad de Kutná Hora, SCP - rocas graníticas del centro de Bohemia, CM - "rocas duras" diferentes de la montaña de Ceskomoravská vrchovina, CM - muestra estadística de los pozos excavados de la misma área (montañas de Ceskomoravská vrchovina), PC - Cuenca Permocarbonífera del piedemonte de las montañas de Krkonose, Kc - areniscas Cenomaniense de un sinclinal de la Bohemia NE, Kt₂ - areniscas margosas y margas arenosas de la región del Río Jizera (D₁, D₂ son las muestras de las dos zonas de descarga diferentes)

Fig. 3. Rock transmissivity comparison according to geomorphologic and hydrogeologic position (Krásný, 1984). Examples of statistic samples in different areas of Czech Republic. 1) wells located on recharge areas. 2) discharge areas. MOLD: metamorphic rock in Bohemia; KUTN: metamorphic rock in Kutná Hora city surroundings; SCP: granitic rocks in central Bohemia; CM: different hard rocks of Ceskomoravská Vrchovina mountains; CM: statistical sample of drilled wells in the same area; PC: permocarbonifer basin of Krkonose mountains, piedmontite; Kc: sandstone of a bohemian cenomaniense synclinal; Kt₂: marly sandstone and sandy marls from the Jizera river region (D₁ and D₂ are the samples from two different discharge areas)

(hasta más o menos cien metros) de una cuenca Permocarbonífera de origen continental (PC) varían mucho desde transmisividad alta (clase II) hasta muy baja (V). Exactamente la misma distribución de transmisividad regional predominante tiene la mayoría de las cuencas Permocarboníferas de la República Checa (clase III-IVd). La porosidad predominante en la zona poco profunda es debida a fracturación, pero dentro del marco de la disminución general de permeabilidad de los sedimentos con la profundidad, en las zonas más profundas predomina la porosidad intergranular.

En este medio hidrogeológico también han sido comprobadas las diferencias en la transmisividad predominante dependiendo de la posición geomorfológica e hidrogeológica (Tabla 3, Figura 3). La comparación de las areniscas y margas Cretácicas indica que en los pozos ubicados en las zonas de descarga; D en las Figuras 3, 4) la transmisividad predominante es hasta treinta veces mayor que en los pozos situados en elevaciones y pendientes (zonas de recarga; I en Tabla 3).

El medio de doble porosidad a menudo indica una variabilidad mayor de transmisividad comparándolo con un medio fracturado (Figura 4). Lo que puede explicarse por una permeabilidad intergranular limitada y sin fisuras en lo que se refiere a los valores mínimos y al contrario por una fracturación intensiva soportada también por permeabilidad intergranular bastante alta en cuanto a los valores máximos. Algunas veces el medio doble alcanza la variabilidad extremadamente grande (clase f, en Tabla 2) lo que puede compararse con el medio kárstico el cual generalmente se considera como el más variable de todos los medios hidrogeológicos.

Rocas poco cementadas o no cementadas de porosidad intergranular

Se trata de rocas geológicamente jóvenes que muchas veces se encuentran en las zonas superiores de cuencas sedimentarias. Como acuíferos muy importantes pueden mencionarse las arenas y/o gravas de origen fluvial o las rocas piroclásticas de origen volcánico (sub)reciente. La transmisividad de estos acuíferos a menudo pertenece a las clases altas (II, I en la Tabla 1) y alcanza valores de hasta miles m²/d (Figuras 1, 4, 5). El rasgo importante de este medio es que además de representar a los acuíferos de mayor permeabilidad en general, por el contrario corresponden a acuíferos de baja variabilidad (insignificante o pequeña - clases a,b). Eso se demuestra en las Figuras 4, 5, donde tanto los sedimentos fluviales

de la República Checa como las rocas piroclásticas de Nicaragua pertenecen según su magnitud y variabilidad de transmisividad a las clases I-IIa,b. Las dos propiedades mencionadas, es decir muy alta magnitud de la transmisividad y su muy baja variabilidad permite considerar este medio como de importancia extraordinaria para el aprovechamiento de las aguas subterráneas.

En los macizos hidrogeológicos, las zonas meteorizadas o las coberteras de los sedimentos Cuaternarios a menudo forman acuíferos de porosidad intergranular. Aunque por su espesor limitado y su baja permeabilidad no pueden compararse con los acuíferos mencionados, estas áreas muchas veces ofrecen buenas posibilidades para la extracción de aguas subterráneas. También en este caso los sedi-

mentos Cuaternarios suelen ser menos variables que las rocas cristalinas del basamento.

Conclusiones

Los resultados de los estudios hidrogeológicos regionales e incluso los representados en los mapas hidrogeológicos facilitan la base necesaria para la planificación de actividades futuras en hidrogeología y en las ramas afines (proyectos hidrogeológicos más detallados, abastecimiento de agua potable, industrial, aprovechamiento de las aguas para riego, planificación regional a diferentes niveles, protección del medio ambiente etc.). A la vez, las conclusiones regionales ofrecen una posibilidad excelente de com-

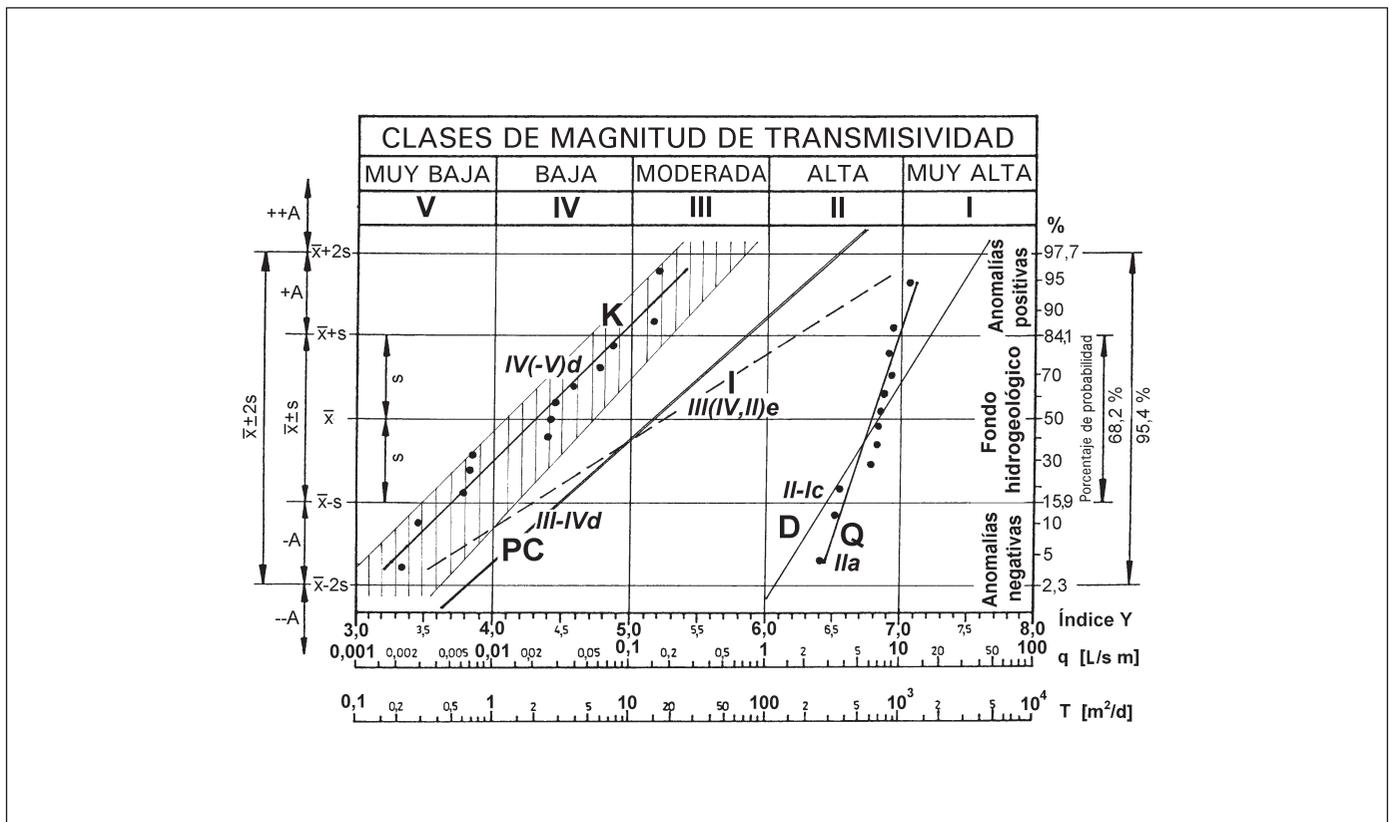


Fig. 4. Distribución de transmisividad de rocas sedimentarias cementadas de doble porosidad (ejemplos de la República Checa, interpretación de los resultados de pruebas de bombeo en pozos perforados hasta una profundidad de cien metros - según Krásný 2002). Para la explicación general de las frecuencias relativas acumuladas véase figura 1. Las líneas representan la transmisividad de muestras estadísticas de los medios siguientes: PC - sedimentos de la Cuenca Permo-carbonífera detrítica del piedemonte de las montañas de Krkonose (areniscas, arcosas, limolitas); I, D - Formación de Jizera de la Cuenca Cretácica Bohémica (areniscas, margas); I - elevaciones y pendientes (zonas de recarga), D - valles (zonas de descarga); K - rocas cristalinas (gneises por lo general) en Bohemia del sur; el área de rayas verticales representa el campo de transmisividad predominante de la mayoría de rocas duras excepto mármoles (comp. fig. 1); Q - sedimentos fluviales Cuaternarios a lo largo del Río Labe al este de Praga. En los casos K y Q los puntos indican transmisividad estimada de pruebas de bombeo en pozos particulares. Las clases de la magnitud y variabilidad de la transmisividad según Krásný (1993)

Fig. 4. Distribution of transmissivity of cemented sedimentary rocks (Krásný, 2002). PC - sediments of the Permo-carboniferous detrital basin of the Krkonose mountains piedmontite; I, D - Jizera formation (sandstone, marls); recharge areas; D: discharge areas; K: hard rocks (mainly gneiss) in South Bohemia; Q: quaternary fluvial sediments along the Labe river, east of Praha

parar los resultados adquiridos en terrenos diferentes y bajo condiciones algunas veces muy diversas. Así pueden discutirse los rasgos semejantes o diferentes y determinar las causas posibles de hechos y fenómenos decisivos. En el artículo presentamos una metodología y varios ejemplos de tal índole.

Hoy en día, en muchas regiones los datos son bastante abundantes para realizar el procedimiento descrito, especialmente si podemos aprovechar también los datos menos fiables, usando los parámetros comparativos (regionales). Cabe señalar que el resultado adecuado muchas veces puede alcanzarse por medios económicos relativamente limitados, sin perforaciones costosas de modo que puedan aprovecharse los datos de los archivos.

En base a los datos hidrogeológicos de diferentes

países comparamos magnitud y variabilidad predominante de permeabilidad y ante todo de transmisividad en varios medios hidrogeológicos, estimamos sus intervalos probables y definimos su distribución en escalas distintas. En los medios fracturados y en los de doble porosidad la distribución de la permeabilidad y de la transmisividad se considera muchas veces muy compleja para ser generalizada. No obstante, los estudios de la distribución de la transmisividad hicieron posible definir un sistema jerárquico de los elementos de heterogeneidad a diversas escalas que pueden designarse de escala local, media y regional (Rats, 1967). Lo que hace posible adjuntarles un contenido geológico y/o hidrogeológico y discutir su causas posibles (Krásný, 2000, Figura 2). Este sistema jerárquico de distribución de la transmisividad y

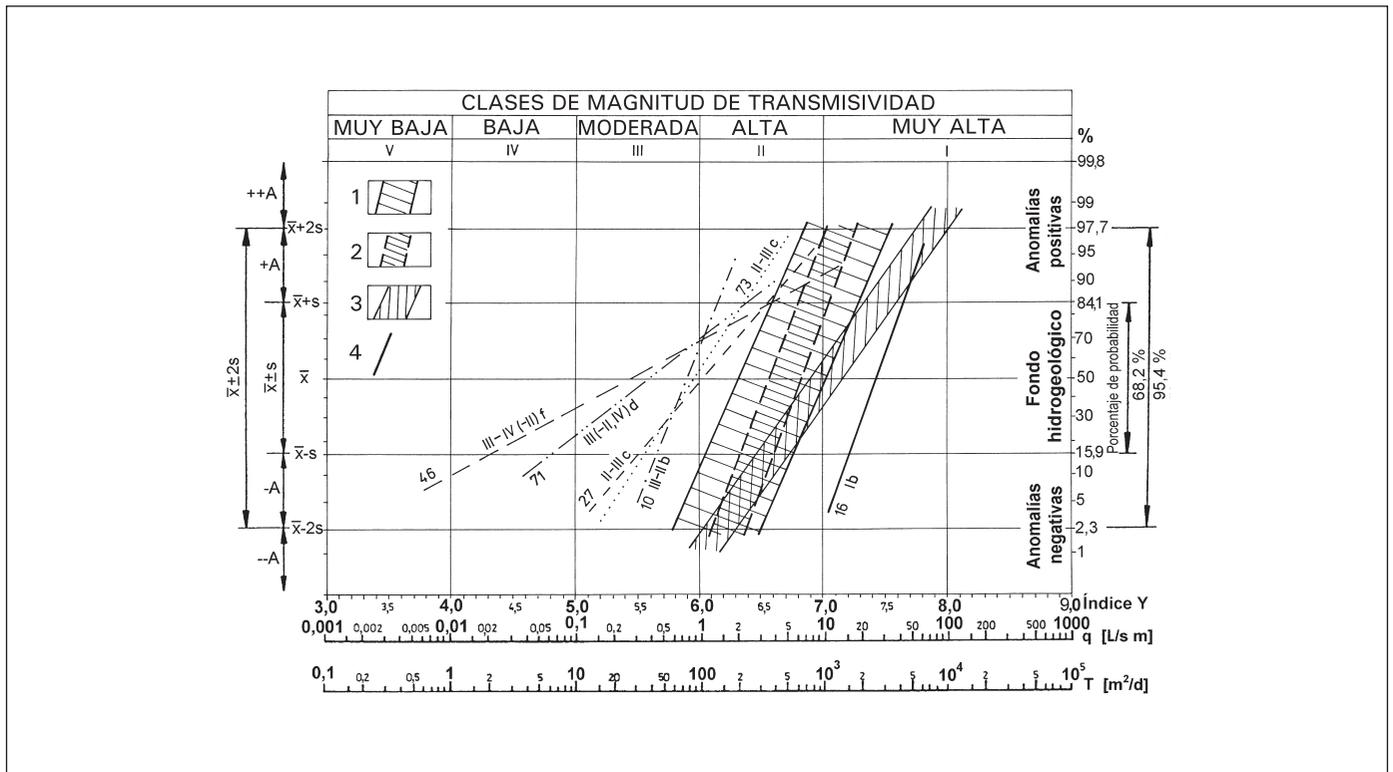


Fig. 5. Distribución de transmisividad de rocas volcánicas (sub)recientes (piroclásticas). Ejemplos de Nicaragua, interpretación de los resultados de pruebas de bombeo en los pozos perforados - según Krásný y Hecht, 1998). Para la explicación general de las frecuencias relativas acumuladas véase figura 1.

1 - campo de transmisividad predominante de la mayoría de las rocas piroclásticas de la Zona Pacífica de Nicaragua, 2 - campo de transmisividad predominante de una planicie (zona Chinandega - León), 3 - campo de transmisividad con probables anomalías positivas mayores, importantes para la extracción concentrada de agua subterránea (clases I-IIb,c), 4 - el área (16 - alrededores de la ciudad de Posoltega) con los valores de transmisividad absoluta más altos conocidos en toda la Zona Pacífica. Para comparación en la parte izquierda de la figura se representan las muestras de las rocas volcánicas o volcánico-sedimentarias más antiguas y cementadas, por lo visto de transmisividad (y permeabilidad) generalmente menor y de variabilidad (inclinación de las líneas) mayor

Fig. 5. Distribution of transmissivity of (sub) recent volcanic rocks (pyroclastic). Examples from Nicaragua (Krasny and Hecht, 1998). 1: transmissivity field more abundant in most of the pyroclastic rock of the Pacific zone o Nicaragua; 2: transmissivity field in a plain in Chinandega Leon; 3: transmissivity field with probable positive anomalies, important for the extraction of groundwater; 4: the area with the highest absolute transmissivity values known in the whole Pacific zone. To compare the left part of the figure shows the samples of the oldest and most cemented volcanic- sedimentary rocks

también de la permeabilidad puede esperarse en muchos medios hidrogeológicos fracturados.

Las diferencias expresadas por una clasificación de la magnitud y variabilidad de la transmisividad predominante, han sido mencionadas y discutidas en el texto y en una forma como pueden verse en la Tabla 4. Según las clases de transmisividad es posible dar una prognosis de distribución de valores en medios diferentes. Tal conocimiento ofrece una posibilidad de predecir las condiciones hidrogeológicas, aunque en una primera aproximación, hasta en terrenos sin datos suficientes. De los datos en Tabla 4 puede también deducirse una relación entre la variabilidad de transmisividad y la distribución de escorrentía subterránea entre los ríos y manantiales (escorrentía concentrada).

Los resultados basados en gran cantidad de datos puedan ser influidos por diferentes factores humanos o tecnológicos como por ejemplo: diferente profundidad de los pozos, el modo de la perforación (percusión o rotación, utilización del lodo y su eliminación), el diámetro de los pozos, el modo de revestimiento, pruebas de bombeo a condiciones diferentes y de duración diferente, inexactitudes de mediciones y/o la manera de interpretación de los datos. Determinados hechos que no responden a las condiciones del tratamiento estadístico y pueden causar ciertas incertidumbres, como por ejemplo la situación intencionada de pozos en las zonas de mayor permeabilidad o la presencia de pozos sin éxito llamados

“negativos” en una muestra estadística, (pues los datos no responden a las condiciones de una muestra estadística de variables aleatorias de una población infinita), fueron discutidas por Krásný (1993).

Sin embargo, según nuestra experiencia adquirida durante la elaboración de datos en regiones diferentes y confección de mapas, se trata generalmente de influencias aisladas, que no pueden cambiar significativamente la imagen regional que resulta de los estudios. Por eso pese a cierta inquietud debido a lo arriba mencionado y a la escasez de datos en algunas zonas creemos que la metodología recomendada puede resultar útil para obtener una imagen hidrogeológica regional que refleja de manera adecuada las condiciones naturales.

Así es posible sacar conclusiones prácticas para la implementación de modelos conceptuales, modelación del flujo de agua subterránea, estimación de un rendimiento seguro, selección del emplazamiento de pozos y estudios de vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

La descripción de las heterogeneidades, aunque importante, no es el problema único en la definición del medio hidrogeológico. El otro es la incompatibilidad de escalas entre las condiciones reales naturales y las modeladas. Los procesos reales ocurren en las escalas extensas hasta infinitas donde todos los niveles de las heterogeneidades están involucrados. Al contrario, durante la implementación de un modelo se necesita una esquematización. Consecuentemen-

Medio hidrogeológico	Escorrentía subterránea (en %) ríos manantiales		Clase de transmisividad predominante (*)	Transmisividad máxima (m ² /d)
“Rocas duras” (**)	80-90	< 20	IV - III c,d	50 - 80 (***)
Devónico (calizas karstificadas)	0-70	hasta 100	I - IV c-f	muchos miles
Cuencas Permocarboníferas (areniscas, arcosas, limolitas)	80-90	< 20	III - IV c - e	300 - 400
Depósitos Cretácicos:				
- facies de areniscas	70-90	10-30	II (I - III) c,d	500 - 1,500
- facies de margas arenosas	30-95	hasta 70	I - IV (V) c-e	1,000
Depósitos Cuaternarios fluviales (arena, grava)	95-100	< 5	I - II a,b	1,000

(*) Las clases de magnitud y variabilidad de la transmisividad según Krásný (1993)
 (**) En “rocas duras” la cobertera de meteorización y depósitos aluviales y eluviales igualan a la escorrentía subterránea por lo general, pese a porosidad de fracturas predominante en el basamento
 (***)Excepto de fallas profundas a lo largo de las cuales ascienden aguas termominerales

Tabla 4. Relación entre escorrentía subterránea por los ríos y manantiales en diversos medios hidrogeológicos. Estimación según resultados de estudios hidrogeológicos en la República Checa (según Krásný, 1998)

Table 4. Relation between groundwater run off in river and spring in various hydrogeological media. Estimation from results of studies in the Czech Republic (after Krásný, 1998)

te, la variabilidad del medio hidrogeológico real se discretiza en la modelación por accesos, lo que implica muchas veces una simplificación de las heterogeneidades. Es importante distinguir el nivel de esquematización con respecto a los fines de los estudios hidrogeológicos.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo de la Agencia Checa de Subvenciones Científicas por medio de los proyectos GACR No. 205/01/1992 y del Ministerio de Educación de la República Checa (Subvención No. 113100005).

Referencias

- Bear, J. 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. - Elsevier, New York.
- Callahan, J.T. y Choi, S.I. 1973. Development of water from fractured crystalline rocks, Republic of Korea. *Proc. 2nd Internat. symposium on ground water*, Palermo.
- Carlsson, L. y Carlstedt, A. 1977. Estimation of transmissibility and permeability in Swedish bedrock. *Nordic Hydrology*, Copenhagen, 8, 103-116.
- Darko, P.K. 2001. *Quantitative aspects of hard rock aquifers: Regional evaluation of groundwater resources in Ghana*. PhD Thesis, Universidad Carolina de Praga.
- Darko, P.K. y Krásný, J. 1998. Comparison of Hardrock Hydraulic Parameters in Distinct Climatic Zones: the Ghana and the Bohemian Massif areas. En: Annau, R., Bender, S. y Wohnlich, S. (Eds.) *Hardrock Hydrogeology of the Bohemian Massif*. Proc. 3rd Internat. Workshop, Oct. 28-30, 1998, Windischeschenbach. *Münchner Geol. Hefte*, B8, 3-10. München.
- Havlik, M. y Krásný, J. 1998. Transmissivity Distribution in Southern Part of the Bohemian Massif: Regional Trends and Local Anomalies. En: Annau, R., Bender, S. y Wohnlich, S. (Eds.) *Hardrock Hydrogeology of the Bohemian Massif*. Proc. 3rd Internat. Workshop, Oct. 28-30, 1998, Windischeschenbach. *Münchner Geol. Hefte*, B8, 11-18. München.
- Henriksen, H. 1995. Relation between topography and well yield in boreholes in crystalline rocks, Sogn og Fjordane, Norway. *Ground Water*, 33, 4, 635-643. Dublin, Ohio.
- Jetel, J. y Krásný, J. 1968. Approximative aquifer characteristics in regional hydrogeological study. *Věst. Ústř. Úst. geol.*, 43, 5, 459-461. Praha.
- Király, L. 1975. Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. En: *Hydrogeology of karstic terrains*. IAH Paris, 53-67.
- Krásný, J. 1974. Les différences de la transmissivité, statistiquement significatives, dans les zones de l'infiltration et du drainage. *Mém. Assoc. Intern. Hydrogeol.*, Vol. 10, I. Communications, 204-211. Montpellier.
- Krásný, J. 1984. Influencia de la posición hidrogeológica de las rocas a su permeabilidad (en checo). *Geol. Průzk.* 26, 12, 342-345. Praha.
- Krásný, J. 1993. Classification of transmissivity magnitude and variation. *Ground Water*, 31, 2, 230-236. Dublin, Ohio.
- Krásný, J. 1997. Metodología de estimación regional de la transmisividad en el medio de rocas duras. En: Yélamos JG y Villarroya F (eds.) *Hydrogeology of hard rocks - Some experiences from Iberian Peninsula and Bohemian Massif*. Proc. Workshop of Iberian Subgroup on Hard Rock Hydrogeology 1997, 3-13. Miraflores de la Sierra, Madrid.
- Krásný, J. 1998. Groundwater discharge zones: sensitive areas of surface-water - groundwater interaction. - En: Van Brahma, J., Eckstein, Y., Ongley, L.K., Schneider, R., Moore, J. (eds.): *Gambling with groundwater - physical, chemical, and biological aspects of aquifer-stream relation*. *Proceedings joint meeting 28 IAH Congress and Annual meeting of AIH*, Sept. 28-Oct. 2, 1998, Las Vegas. 111-116. American Institute of Hydrology.
- Krásný, J. 1999. Hard-rock hydrogeology in the Czech Republic. *Hydrogéologie*, 2, 25-38. Éditions BRGM. Orléans.
- Krásný, J. 2000. Geologic factors influencing spatial distribution of hardrock transmissivity. En: Sililo O *et al.* (eds.) *Groundwater: Past achievements and future challenges*, Proc. 30 IAH Congress, 187-191. Cape Town. Balkema, Rotterdam.
- Krásný, J. 2002. Understanding hydrogeological environments: A prerequisite for predicting technogenically-caused changes in groundwater systems. En: Howard K y Israfilov R. (eds.) *Current problems of hydrogeology in urban areas, urban agglomerates and industrial centres*. Proc. Advanced Research NATO Workshop, May 2001. 381-398. Baku, Kluwer Acad. Publish. Dordrecht.
- Krásný, J. y Hecht, G. 1998. *Estudios hidrogeológicos e hidroquímicos de la Región del Pacífico de Nicaragua*. 154 pp. INETER Managua, Nicaragua.
- Le Grand, H.E. 1954. Geology and ground water in the Statesville area, North Carolina: North Carolina Dept. of Conservation and Development, Div. of Mineral Resources Bull., citado en Davis SN y DeWiest R.J.M. 1966. *Hydrogeology*. John Wiley and sons, New York-London-Sydney.
- Rats, M.V. 1967. Inhomogeneidad de las rocas y su propiedades físicas (en ruso). Nauka, Moskva.
- Rats, M.V. y Chernyshov, S.N. 1967. Statistical aspect of the problem on the permeability of the jointy rocks. - Proc. Dubrovnik Symposium on Hydrology of fractured rocks 1965, V.1. *IAHS Publication* 73, 227-236.
- Rohr-Torp, E. 1994 Present uplift rates and groundwater potential in Norwegian hard rocks. *Geological Survey of Norway, Bulletin* 426, 47-52.
- Rovey II Ch.H.W. 1998. Digital simulation of the scale effect in hydraulic conductivity, *Hydrogeology Journal* 6, 216-225, Springer, Berlin.
- Staško, S. y Tarka, R. 1996. Hydraulic parameters of hard rocks based on long-term field experiment in Polish

Krásný, J. 2003. Distribución espacial de los parámetros hidráulicos en diversos medios... *Boletín Geológico y Minero*, 114 (2): 171-182

Sudetes. In: Krásný, J. y Mls, J. (Eds.) *First Workshop on "Hardrock hydrogeology of the Bohemian Massif"* 1994. *Acta Univ. Carolinae Geologica*, Praha, 40, 2, 167- 178.

Schulze-Makuch, D. y Cherkauer, D.S. 1998. Variations in hydraulic conductivity with scale of measurement during aquifer tests in heterogeneous, porous carbona-

te rocks, *Hydrogeology Journal*, 6, 204-215, Springer, Berlin.

Recibido: Enero 2003

Aceptado: Junio 2003