

CDU: 556.332.63:556.332.46 (729.1)

ALIMENTACION ARTIFICIAL DE ACUIFEROS: ¿HASTA DONDE SE JUSTIFICA EN LAS FORMACIONES CALCAREAS ALTAMENTE CARSIFICADAS?

ING. ARTURO GONZALEZ BAEZ

RESUMEN

La recarga, artificial es y será en el futuro, una de las mejores técnicas utilizadas para integrar el agua superficial y subterránea en sistema de operación única. Pero, ¿hasta qué punto puede considerarse *efectiva* la recarga?. Se conoce que valores muy elevados de la relación T/m (difusividad hidráulica) definen a un acuífero como poco *asimilador* de la recarga artificial. Tal es el caso de los acuíferos carbonatados, muy carsificados, típicos de Cuba. ¿Hasta qué punto puede considerarse *útil* y justiciable la recarga artificial en las formaciones cársicas cubanas?. ¿Qué experiencia se tiene al respecto? ¿Cuáles son los planes investigativos futuros?. En este trabajo se intenta dar respuestas a estas interrogantes.

INTRODUCCION

La recarga artificial del agua subterránea, también llamada *infiltración en el flujo* [1], es un procedimiento que se emplea para incrementar y/o proteger este preciado recurso natural. «Cualquier esquema o facilidad elaborada por el hombre que adicione agua a un acuífero puede ser considerado como un sistema de recarga artificial» [2]. La recarga artificial puede ser también definida como «el aumento de la infiltración natural de la precipitación o del agua superficial dentro de las formaciones subterráneas, por algún método de construcción, esparcimiento de agua, o por cambio artificial de las condiciones naturales» [3], y «el proceso de realimentación subterránea por medio de obras habilitadas originalmente para este propósito»; [4], abarcando también «el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de los recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua» [5].

La recarga artificial es un instrumento de gran utilidad que el hombre ha puesto a disposición suya para intervenir positivamente en el ciclo hidrológico, y compensar, en cierta medida, las afectaciones que él mismo ha ocasionado en el equilibrio hídrico de una región en particular, por la extracción excesiva de aguas subterráneas, y por el drenaje de áreas de gran infiltración natural (incluyendo la desecación de pantanos), o por la ruptura del equilibrio hidrodinámico en los acuíferos costeros abiertos (intrusión salina), entre otros factores.

Breve bosquejo histórico

Muchos han sido los métodos utilizados por el hombre para realizar la recarga artificial, yendo desde el simple «hueco en el suelo» hasta los más sofisticados sistemas de galerías, zanjas, balsas, pozos simples y con drenes radiales, y sistemas mixtos.

En 1887, Thiem propuso nombrar *agua subterránea producida artificialmente*, a la obtenida mediante la infiltración de agua superficial, inducida desde el lecho del río hasta la formación permeable sub-superficial. El sistema propuesto por Thiem, en ESSEN; en 1888 fue indudablemente el *primer trabajo de recarga artificial* propuesto para Europa [6]. Pero no fue sino hasta que Richert, discípulo de Thiem, llevara a la práctica las ideas de su maestro, que la recarga artificial pudo ser tomada en cuenta. Richert publicó los resultados de sus trabajos en Francia, en 1900, y por ello «puede ser considerado más o menos el pionero de la recarga artificial del agua subterránea» [6]. Trabajos de esta índole se llevaron a cabo, con posterioridad, en Alemania, Escocia, los Estados Unidos de Norteamérica, Suecia y Francia, entre otros.

A comienzos del siglo XX se produjo un intenso desarrollo de la recarga en diferentes países del mundo, pero pronto el desánimo se apoderó de los especialistas en la materia (por deficiencias en los proyectos, y/o en las investigaciones primarias, y en la aplicación posterior de los prototipos). A

partir de 1950, según señala Bourguet (Custodio, E; Llamas, J. R.; opus cit.), cobra un nuevo auge el estudio y aplicación de la recarga artificial, y ya en nuestros días está profusamente extendido este procedimiento, abarcando prácticamente a todos los países de nuestro planeta.

En Cuba, fue en la década del 50 y, específicamente en el año 1955, cuando se comenzaron los primeros trabajos de recarga artificial, ante la imperiosa necesidad de proteger los acuíferos contra la intrusión salina y/o el agotamiento de sus reservas naturales [7]. De 1959 hasta nuestros días, un número considerable de sistemas de recarga y de pozos aislados se han proyectado y construido en Cuba, en especial en las provincias de Pinar del Río (mediante pozos, aislados y en baterías dentro de cauces de drenaje), en la provincia la Habana (mediante presa con pozos en su área de embalse, y pozos aislados), en la provincia Ciudad de La Habana (mediante presa de recarga, y pozos aislados), y en la provincia de Matanzas (mediante pozos aislados, pozos de canales de drenaje, balsa y trinchera) [8].

El sistema de recarga «Zona No. 1» de Victoria de Girón, en la cuenca «Sur» de Matanzas, casi concluida totalmente y ya en operación parcial [9] constituye el más completo de los diseñados y construidos en Cuba, estando compuesto por 48 pozos de recarga conectados a los canales de drenaje que se extienden sobre un área localizada al noreste del poblado de Torriente, y por una balsa y una trinchera, ambas construidas exclusivamente para recibir e infiltrar las aguas de drenaje no recargadas por los pozos. Poca experiencia se ha obtenido de éste y de los restantes sistemas de recarga construidos en Cuba hasta el presente.

Las formaciones cársicas: características generales de ellas como acuíferos

Para la proyección de los sistemas de recarga se han estado utilizando los procedimientos de cálculo tradicionales, y en muchos casos, como lo es el nuestro, no se han tomado en cuenta las diferencias reales que existen entre un medio poroso, isotrópico y homogéneo, y el fisurado y/o «carsificado» donde generalmente la anisotropía está presente. Aun cuando «la teoría del flujo de agua a través de rocas fisuradas ha tenido un rápido avance en los últimos años», la interpretación, por ejemplo, de las pruebas de bombeo realizadas en estos acuíferos aún se basa «en la teoría clásica del escurrimiento en medios porosos y por consiguiente conduce a resultados incorrectos sobre las rocas fisuradas» [10]. La heterogeneidad de los medios cársicos «podría hacer pensar que es imposible una aproximación global de su funcionamiento hidráulico, lo que reduciría considerablemente su interés científico y económico» [11]. Pero esto no es totalmente cierto como es de todos bien conocido, siendo «legítimo considerar un bloque cársico como continuo si las dimensiones de los bloques ele-

mentales son despreciables frente a las dimensiones de los fenómenos analizados» (Droque, opus cit.). Se señala además que se pueden estudiar las características del drenaje a partir de la realización del análisis geológico y físico del medio.

Las anisotropías estructurales de un acuífero con circulación cársica predominante, al no ser tomadas en consideración al trazar e interpretar, por ejemplo, las curvas isopiécticas, pueden conducir, como señala De Wiest [12], a serios errores interpretativos durante la realización de estudios locales o regionales de poca extensión (figura No. 1). El comportamiento de los pozos satélites (o de observación) con relación al pozo central, durante pruebas de bombeo realizadas en formaciones acuíferas de este tipo, acusan una marcada anomalía, lo que generalmente se debe a las diferencias existentes en la red de grietas y cavidades en ellas.

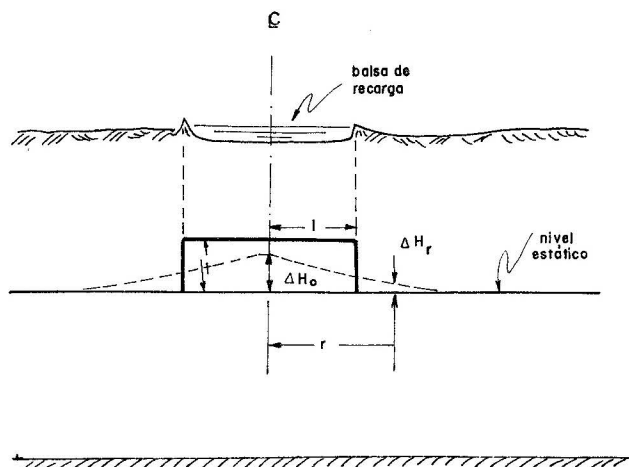
Hemos estado hablando de formaciones cársicas sin aún definir lo que se entiende por «carso».

El término *karst* o *carso* se ha tomado para denominar «aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas y cuyos poros o fisuras han sido ensanchados por la acción disolvente de las aguas subterráneas hasta formar grandes conductos y cuevas que dan lugar a unas características geomorfológicas nuevas» [5].

Los fenómenos cársicos «no pueden estudiarse aisladamente, sino que por encontrarse en regiones calizas deben analizarse relacionándolas con el desarrollo de la morfogénesis local» [12], y por esto, como ya señalamos anteriormente, el medio cársico debe ser considerado como un todo al igual que el poroso, con sus cavidades interconectadas dentro del aparato cársico.

(El conjunto del medio calizo, según señala Llopis en su mencionada obra, la fisuración, el agua circulante y el trabajo de disolución y erosión inherente a la circulación cársica, constituye lo que se ha dado en llamar *aparato cársico*, en el que aparecen definidas una zona superior superficial, o *zona de absorción*; una zona interna de *circulación libre* o alternativamente libre y a presión; y una zona inferior de *circulación permanente a presión*).

Se diferencia de los *tafonis*, en que aunque aparecen a veces ser semejantes a formas cársicas superficiales, nada tienen en común con ellas, en particular por su origen (climas áridos y semi-áridos y litología rocosa especial) y por la no necesaria conexión entre ellos, ni su continuidad longitudinal. De acuerdo con «Tecniterrae» [13]; se entiende por *tafonización* el proceso de meteorización de una roca, dominante en un área determinada, resultando una desagregación y descamación de la misma, aprovechando la presencia de debilidades estructurales y texturales y a la desigual efectividad de los procesos de meteorización sobre la superficie rocosa (la roca debe ser granulada, homogénea y no muy cementada) siendo su génesis más petrográfica que genética; mientras que *carsificación* es el conjunto de fenómenos físico-químico-



1— Disipación del "domo" o "cresta" de agua subterránea originada por la recarga mediante una balsa.

geológicos que tienen lugar en un fragmento de la corteza terrestre, por sucesivos procesos de disolución y erosión de ésta a través de las fisuras (planos de estratificación, diaclasas, fallas) dando origen a la circulación de un tipo especial de agua, el «agua cársica» de características propias. (Ver la gráfica de la figura No. 2). Este conjunto de rocas en las que predominan los fenómenos de carsificación constituyen los llamados *acuíferos cársicos* que como los ya conocidos de materiales granulares, pueden ser abiertos o cerrados, confinados o libres, y sus combinaciones.

«La *evaluación cuantitativa* del agua contenida en un acuífero cársico es difícil [15], debido al carácter localizado de las vías de circulación subterránea, que provocan zonas singulares en el campo de escurrimiento, muy difíciles de localizar mediante los métodos de investigaciones clásicas».

El tamaño de los conductos cársicos confieren localmente a la roca «permeabilidades», de 10^3 a 10^8 veces superiores a las que se deben a figuras.

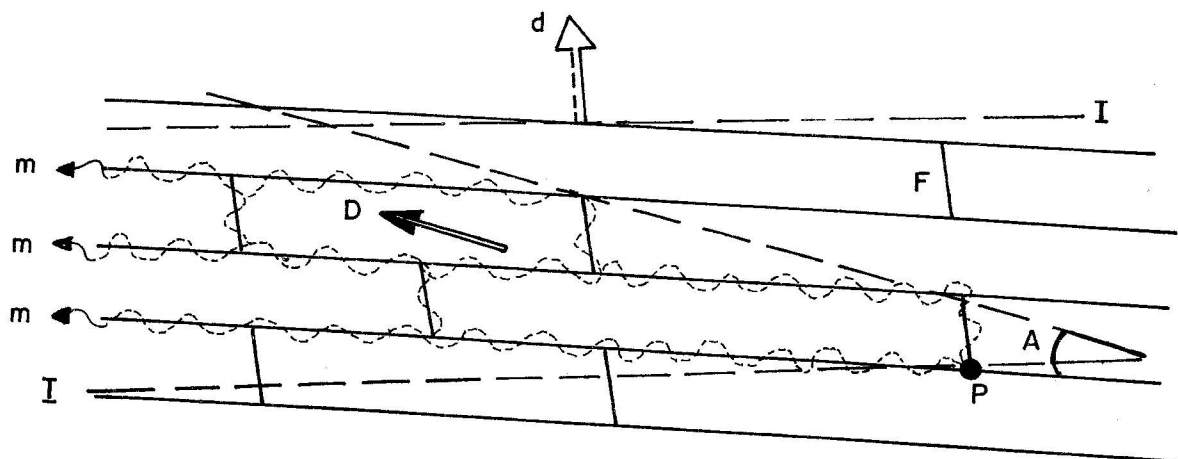
«Estas *permeabilidades* son las más elevadas que podemos encontrar en el subsuelo, lo que explica los caudales a veces considerables, de algunas fuentes clásicas» [11]. El caso debe ser tratado como un medio de *doble porosidad*: la correspondiente al sistema de grietas de disolución grandes o cavernas, y la resultante de la integración del sistema de fisuras y agrietamientos secundarios y poros de la formación rocosa. A la primera corresponden los valores más elevados de la difusividad hidráulica (transmisividades grandes, y moderadas a bajos coeficientes de almacenamiento), y a la última, los valores más bajos de ésta.

El que en un acuífero predomine una u otra porosidad determinará el comportamiento hidráulico del mismo y, por ende, el predominio o no del régimen de flujo no lineal o turbulento. La interacción cavernas-fisuras-poros juega un papel importante en la circulación de las aguas subterráneas y no debe ser soslayada o pasada por alto, pues la posibilidad de almacenamiento en el sistema poro-fisuras, puede modificar en parte las ideas muy en boga de la posible *no retención* en el macizo cársico por un tiempo económico y técnicamente aceptable del agua proveniente de la recarga.

De acuerdo con la aplicación del método de recesión al estudio hidrodinámico de los acuíferos cársicos cubanos [16]; «se derivó que los valores que hemos tenido hasta el presente en los acuíferos de llanuras cársicas del país, los más importantes por sus recursos de explotación, muestran un absoluto predominio de la componente de flujo difuso, que sugiere la presencia de régimen laminar en la mayor parte del acuífero».

Como se sabe [17], el 65 % de las formaciones acuíferas de Cuba está constituido por rocas car-

2— Relación entre la dirección del flujo subterráneo (D) y la dirección obtenida al trazar líneas ortogonales (d) a las isopiezas en pozos de observación (I) Angulo de dispersión lateral (A). Punto de inyección del trazador (P). Movimiento del trazador (m) Fracturas (F). Según Dewiest-Davies, en Llopis Lladó (12).



bonatadas carsificadas, de ahí la importancia de conocer con precisión su comportamiento hidráulico, algo no logrado a plenitud hasta el presente (Drogue, *opus cit.*, señala que el 8 % de las tierras emergidas— Europa el 14 %; cuenca mediterránea, el 25 %— están constituidas por rocas carbonatadas, carsificadas, en la que se encuentra el «25 % de los recursos de agua subterránea del globo»).

El coeficiente de «difusividad hidráulica» y su utilidad al estudio de la posible recarga artificial de un acuífero.

Son dos los efectos generados por la recarga artificial como resultado de la carga que se aplica en el área de recarga, y la masa de agua introducida en el acuífero a través de la misma área: el efecto piezométrico y el efecto volumétrico [2]. El primero, el efecto piezométrico, se relaciona con tres factores principales:

- 1º Con los que crean una *reacción amortiguadora* que puede ser expresada por una función matemática. Este efecto está relacionado con la forma de la superficie piezométrica, con las fronteras geológicas e hidráulicas, y al tipo y localización del proyecto de recarga.
- 2º Con el valor de T/C , en el que T es la transmisividad y C el coeficiente de «relleno» o de elevado, que, para los efectos prácticos se hace equivaler el *coeficiente de almacenamiento*, μ por la que $T/C \approx T/\mu = a_B$ o a (coeficiente este último que será definido en párrafos siguientes).
- 3º Con la capacidad de recarga artificial y la duración de la operación.

Además, influyen en el efecto piezométrico: las fuerzas de capilaridad, la temperatura del agua y la presencia de burbujas de aire en el acuífero.

Por su parte, el *efecto volumétrico* está relacionado con el rendimiento específico, el coeficiente de llenado o almacenamiento, el coeficiente de transmisividad y el de límite o frontera.

Boussinesq [18], estableció la relación existente entre la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento de un acuífero libre, mediante la expresión:

$$a_B = \frac{K_D \cdot H_K}{\mu} = \frac{T_0}{\mu}, \quad (F.1)$$

en la que a_B se le denominó *coeficiente de difusividad hidráulica*, el cual mide la «sensibilidad» de un acuífero ante las extracciones o descarga de agua; K_D , es la *conductividad hidráulica Darciana* (flujo lineal); μ , es el coeficiente de almacenamiento, equivalente a la porosidad efectiva en

estos acuíferos libres; T_0 , es la transmisividad del acuífero; H_K , es el espesor medio del acuífero saturado durante el bombeo o recarga, en el área del *cono de depresión* (bombeo) o del *cono de elevación* (recarga), y que se expresa por:

$$H_K \approx H_0 \pm 0,25 (S_1 - S_2) \quad (F.2)$$

(el signo — para el bombeo, y el signo + para la recarga). En (F.2) S_1 y S_2 , son los abatimientos residuales a los tiempos t_1 y t_2 , desde el final del bombeo (o elevación remanente a esos tiempos, en caso de la recarga).

V.N. Schelkatchev [18], define este coeficiente para el caso de *acuífero confinado* como «una característica del *ritmo* de redistribución de la presión, de su alteración natural o forzada», expresándolo por:

$$a = \frac{K_D \cdot m}{\mu_0} = \frac{T}{\mu_0} \quad (F.3)$$

en la que m , es el espesor del acuífero confinado; T y μ , la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del mismo, respectivamente.

En (F.3), μ_0 es el coeficiente de almacenamiento elástico, cuya expresión es:

$$\mu_0 = \gamma \cdot \beta \cdot m \quad (F.4)$$

Siendo γ , el peso específico del agua; β el coeficiente de capacidad elástica, igual a:

$$\beta = n \cdot \beta_a + \beta_R \quad (F.5)$$

n , es la porosidad del estrato acuífero; β_a , es el coeficiente de compresibilidad del agua ($4,5-5,0 \times 10^{-5}$ cm²/s, para aguas suaves y ligeramente mineralizadas, según A. Gheorghe, *opus cit.*, β_R , es el coeficiente de compresibilidad de la roca, el cual varía de $0,2 \times 10^{-5}$ cm/kg, para la roca caliza, y 3×10^{-5} cm²/kg para las arenas (Idem).

La expresión (F.3) puede reformularse atendiendo a lo antes expuesto, quedándose en definitiva como:

$$a = \frac{K_D}{\gamma \beta} \quad (F.3a)$$

Para el caso de acuíferos confinados, a se ha denominado *coeficiente de difusividad piezométrica* para diferenciarlo del *coeficiente de difusividad hidráulica* de los acuíferos libres.

Como la determinación de T y μ_0 (T_0 y μ) en los acuíferos carbonatados (fisurados o cársicos) es a menudo muy deficiente (ya hemos hablado de ello), la precisión en la correcta determinación de a (a_B) es también dudosa. En la tabla No. 1 se ofrecen algunos valores de a y a_B , para distintos materiales, de acuerdo con A. Gheorghe y A. González Báez.

VALORES DE DIFUSIVIDAD HIDRAULICA PARA ALGUNAS ROCAS DETRITICAS, COMPARADAS CON LAS DE FORMACIONES CARSCICAS CUBANAS. (SEGUN GHEORGHE Y GONZALEZ BAEZ).

$a \text{ (m}^2/\text{día)}$	Arena Gruesa -	Arena Media 10^5	Arena Fina 5×10^3 1×10^5	Limo Arenoso 10^3	Arcilla Arenosa 1×10^2 5×10^2	Calizas y dolomitas carsificadas 1×10^4 1×10^6
$a_B \text{ (m}^2/\text{día)}$	$1,0 \times 10^3$ $3,0 \times 10^3$	$0,5 \times 10^3$ $2,0 \times 10^3$	$0,5 \times 10^2$ $5,0 \times 10^2$	$0,2 \times 10^2$ $1,0 \times 10^2$	-	1×10^4 1×10^5 1×10^6

¿Cómo determina el coeficiente de difusividad las posibilidades de recarga artificial de un acuífero?

Se conoce que los acuíferos más apropiados para realizar en ellos la recarga artificial, teniendo en cuenta que ésta se realiza con el objetivo fundamental y primordial de incrementar sus reservas, son aquellos que presentan un bajo valor en la

relación $\frac{T}{\mu}$ o sea «aquellos acuíferos que absorben cantidades de agua y no la ceden (o entregan) muy rápidamente» [2]. Esto lleva implícito claramente que en tales acuíferos la conductividad hidráulica vertical es alta, mientras que la horizontal es de un valor moderado, generalmente no presente en la naturaleza. En conductos cársicos, el agua puede circular en grandes velocidades, hasta llegar a valores que superan los 10^3 - 10^4 m/día [19], siendo el régimen de circulación en tales «conductos» el turbulento. Para una cuenca subterránea como la de «Vento», en la Habana, donde se han observado velocidades del flujo de hasta 4×10^2 m/día [16], resulta lógico suponer que la descarga se efectúe muy rápidamente. En ellas el valor de a_B puede llegar a 10^6 m²/día, muy elevado por cierto. Con estos valores pudiera pensarse que aquí la recarga no resultaría del todo útil, pero, otro factor entra aquí en juego: la condición de cuenca cerrada de «Vento», y su muy limitada área de descarga por los manantiales del mismo nombre.

No sucede así en cuencas abiertas como la de «Ciego de Avila», donde el valor de a_B es también elevado, alcanzando los 10^6 m²/día también, pero que posee un amplio frente de descarga hacia el mar.

Vamos a analizar dos casos, mediante los cuales intentaremos comprobar como determina el coeficiente a_B (a) la capacidad de retención o almacenamiento de un acuífero.

Caso 1º Balsa de infiltración circular de radio l (o una balsa cuadrada de radio equivalente, $r_e = l \approx \frac{d}{\sqrt{\pi}}$) (Figura No. 1).

Sea la expresión [20], [5].

$$\frac{\Delta H}{H} = 1 - e^{-\frac{1^2}{4at}} \quad (\text{F.6})$$

que define la disipación de la elevación del nivel de las aguas subterráneas bajo la balsa, en la que:

ΔH , es la altura de la «cresta» o «domo» de aguas formadas bajo el centro de la balsa;

H , es la altura del «disco» de agua, idealizado, introducido teóricamente, de forma instantánea, en el acuífero;

t , el tiempo transcurrido desde que comenzó la recarga;

a , ya fue definido anteriormente

$$(a_B = \frac{K_D \cdot H_K}{\mu})$$

(Se considera simetría radial)

Si, por ejemplo, realizáramos este tipo de recarga en varios acuíferos cársicos en los que tanto T como μ varíen de uno a otro (o en diferentes partes de un mismo acuífero), tendríamos que para cada tiempo dado t (ver tabla No. 2), si el «domo idealizado», para una balsa de radio $l = 100$ m, alcanza un valor $H = 5$ m, la expresión (F.6) quedaría transformada en:

$$H = 5 \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{2,25 \times 10^3}{at}}} \right) \quad (\text{F.6a})$$

Dándole valores a t de 1, 10, 100 y 1000 días, y a a (a_B) los de 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 y 10^7 m²/día, v observando la tabla No. 2, es fácilmente concluir que el «domo» se disipará con mayor rapidez en aquellos acuíferos (o partes de un acuífero con

características hidrogeológicas diferentes) que presentan los *mayores valores* de a , para un tiempo de recarga dado.

Si se considera *variable el tiempo* de recarga, el domo tenderá a disiparse a medida en que aquel se haga mayor, *aun* para el caso de acuíferos de bajo valor de a , siendo *casi instantánea* la disipación en que se determinan valores de $a^B > 10^5 \text{ m}^2/\text{día}$ (muy frecuentes en el caso cubano, donde no resulta raro encontrarse con transmisividades del orden de los $5-8 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{día}$, y coeficientes de almacenamientos de 0,7-0,14). No hemos considerado en el análisis el gradiente natural que presenta el flujo en el acuífero, sino condiciones de horizontalidad y estaticidad del agua en el mismo.

Caso 2º. Pozo de recarga, completamente penetrante en un acuífero, con régimen de trabajo impermanente y flujo lineal.

Utilizaremos la ecuación de Jacob [3], *pero* considerando operación invertida (recarga):

$$H = \frac{2.30 Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25 Tt}{r^2 \cdot \mu} \quad (\text{F.7})$$

ó

$$\Delta H = \frac{2.30 Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25 Tt}{r^2} \quad (\text{F.7a})$$

y como para $\Delta H=0$, de (F.7a) se obtiene el valor del *radio de influencia*, R :

$$0 = \lg \frac{2.25 at}{r^2} \quad (\text{F.7b})$$

y por lo tanto:

$$r = R = 1.5 \sqrt{at} \quad (\text{F.7c})$$

De (F.7c) es fácil darse cuenta que para un tiempo dado t , a presenta valores pequeños igualmente R resultará de valor pequeño y su acción se irá extendiendo a medida en que t aumente, *pero no sensiblemente*, por lo que en las áreas cercanas al pozo el nivel de las aguas se mantendrá elevado (ver tabla No. 3). No ocurre así cuando a presenta valores elevados, pues en estos casos R alcanzará *valores grandes en tiempos relativamente cortos* y se desplazará muy rápidamente al incrementarse el tiempo.

Como en el caso anterior, valores de $a \geq 10^5 \text{ m}^2/\text{día}$ alertan sobre una posible disipación de efectos de la recarga en *tiempos relativamente cortos*, o al menos su rápido alejamiento de la zona donde ésta tuvo lugar. Tampoco hemos considerado el efecto del gradiente natural del flujo en la velocidad de disipación del efecto de la recarga.

Si en los dos casos antes señalados añadimos la influencia del gradiente natural del flujo subterráneo en la velocidad de circulación del agua recargada dentro del acuífero, podremos componer su movimiento *real* y el límite de extensión del *área de influencia* de la recarga. Pueden utilizarse *trazadores artificiales* para la determinación de la *velocidad real de circulación* del agua en el acuífero, V_r , o aplicarse los criterios de cálculo de la *velocidad aparente*, V_a , y de ésta, la de la real a través de la relación:

$$V_r = m_e \cdot V_a \quad (\text{F.8})$$

VALORES DE R , EN m , PARA DIFERENTES VALORES DE a Y t .

Tabla No. 2.

		← $\frac{m^2}{\text{día}}$ →					
↑ días ↓	$\frac{a}{t}$	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
	1	15 ↓	47.43 ↓	150 ↓	474.43 ↓	1500 ↓	4,743.42 ↓
	10	47.43 ↓	150 ↓	474.43 ↓	1500 ↓	4,743.42 ↓	15,000 ↓
	100	150 ↓	474.34 ↓	1500 ↓	4743.42 ↓	15000 ↓	47434.16 ↓
	1000	474.34 ↓	1500 ↓	4743.42 ↓	15000 ↓	47434.16 ↓	150000 ↓

Tabla No. 3.

VALORES DE H , EN m , PARA DIFERENTES VALORES DE a Y t .

		$\xleftarrow{\quad m^2 / \text{día} \quad} \xrightarrow{\quad}$					
\updownarrow días	$\begin{matrix} t \backslash a \\ 1 \end{matrix}$	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
	1	≈ 5 \downarrow	4,50	1,00	0,10	0,01	0,001
	10	4,50 \downarrow	1,00	0,10	0,01	0,001	≈ 0
	100	1,00 \downarrow	0,10	0,01	0,001	≈ 0	≈ 0
	1000	0,10	0,01	0,001	≈ 0	≈ 0	≈ 0

en la que m_e es la porosidad efectiva de la formación acuífera. Para *flujo laminar*, Darcy formuló su conocida ley [21]:

$$V_a = \frac{Q}{S} = K_D \cdot I, \quad (F.9)$$

en la que S es el área de la sección transversal del acuífero sin tomar en cuenta el θ_0 de intersticios en la misma, correspondientes a su porosidad eficaz, m_e (que determina un área efectiva, S_e , y una velocidad real, V_R); I , es el gradiente del flujo; K_D , la permeabilidad o conductividad hidráulica Darciana; y Q el caudal que atraviesa la sección. Pero además de este régimen de circulación, resultan de nuestro interés otros tres regímenes de flujo, no lineales, de alta velocidad en el agua subterránea [22]:

- el flujo laminar transicional, en el que $0,04 < N_{RK} < 1,74$;
- el flujo turbulento no desarrollado, en el que $1,74 < N_{RK} < 100$;
- el flujo turbulento puro, en el que $N_{RK} > 100$.

(Mayor información y detalles sobre los procedimientos de cálculo para regímenes de flujo no lineales pueden encontrarse en las obras del Dr. Pérez Franco; no entramos aquí en su detalle por falta de espacio).

N_{RK} , es el número de Reynolds de Ward, que se expresa por la relación:

$$N_{RK} = \frac{V_a \cdot K^{1/2}}{v} \quad (F.10)$$

$k^{1/2}$, es la longitud característica D del medio, o sea, la raíz cuadrada de la permeabilidad geométrica, k , relacionada con la permeabilidad Darciana, K_D , mediante la expresión:

$$K = \frac{K_D \cdot v}{g} \quad (F.11)$$

v , es la viscosidad cinemática del agua; y g la aceleración de la gravedad.

Por analogía con la ley de Darcy, puede obtenerse [23]; la siguiente expresión para el flujo no lineal:

$$V_a = K_n \cdot I^n \quad (F.12)$$

En ella $1 > n \geq 0,5$, siendo n el llamado exponente del flujo. Para flujo laminar, $n=1$, y $V_a = K_D \cdot I$. Para flujo turbulento puro, $n = 0,5$, y $V_a = K_T \cdot I^{0,5}$.

La velocidad aparente de circulación del agua en un medio cársico estará determinada, por lo tanto, por el producto de la conductividad hidráulica para un régimen de flujo cualquiera, K_n , y el gradiente hidráulico presente en ese régimen de flujo, elevado a un exponente n , cuyo valor oscila entre 0,5 para el turbulento puro, y 1 para el laminar, Darciano. Otro parámetro importante a tener en cuenta cuando se estudia un acuífero carbonatado cársico, lo es el llamado *coeficiente de flujo del acuífero*, N , cuya expresión está dada por [24].

$$N = \frac{m \cdot m_e}{q^2} = \frac{m \cdot m_e}{(TI)^2} \quad (F.13)$$

Para acuíferos libres, en los que se cumpla que $me \approx \mu$:

$$N = \frac{m \cdot \mu}{(TI) (TI)} \approx \frac{Ho}{a_B T \cdot I^2} \quad (F.13a)$$

expresión esta última que relaciona N con a_B y T . En (F.13) q es el caudal específico del flujo en la dirección dada. Mediante la incorporación de este coeficiente N , se hace posible relacionar las operaciones de recarga y bombeo con el flujo natural existente en el acuífero, y el volumen máximo de agua, V_{max} , que *podiera recuperarse* del total recargado y que se mezcló con la propia del acuífero. Para esto último, y como algo aproximado, puede utilizarse la expresión:

$$V_{max} \approx 0,115 \alpha N Q_R^2 \quad (F.14)$$

en la que Q_R , es el caudal del agua recargado;

$\alpha = \frac{Q_B}{Q_R}$, Q_B , es el caudal de agua bombeado; $0,1 \leq \alpha \leq 2,0$ (límite de aplicación de la expresión F.14).

V_{max} , corresponde al área contenida entre las dos líneas divisorias de recarga y de bombeo, y tienen su máxima aplicación y utilidad cuando las extracciones se realizan *casi* inmediatamente de finalizada la recarga [25]. El valor de N puede obtenerse mediante ensayos de bombeo y recarga en un mismo pozo, utilizando para ello un trazador adicionado previamente al agua de recarga. La obtención de N es tediosa, y no la incluimos en este trabajo, pero puede conocerse consultándose las obras mencionadas de Mercado y Schwarz, o el folleto en preparación del autor de este trabajo.

Harpaz y Schwarz determinaron valores máximos de N para la roca caliza de 3-5 h²/m³.

¿Hasta qué punto puede considerarse útil y justificable la recarga artificial en las formaciones cársicas cubanas?

Ya una vez hablamos de que la recarga artificial podía justificarse por razones técnicas, económicas y psicológicas [26], consideradas cada una de ellas independientemente o en sus combinaciones. La realimentación de cuencas altamente explotadas o el incremento del almacenamiento en aquellas que estructuralmente lo permitan, no constituyen el objetivo *único* de la recarga artificial.

Se ha visto que no son precisamente los acuíferos cársicos los más adecuados para asimilar la recarga artificial con fines de almacenamiento, *pero* resultan innumerables los beneficios obtenidos en la aplicación de la misma.

Como se sabe, gran parte de las cuencas subterráneas de Cuba son del tipo *cársica-abiertas* y en ellas se ha manifestado desde hace ya muchos años la *intrusión salina*. Ahora bien, ¿puede la recarga

artificial contrarrestar los efectos de la intrusión salina en estos acuíferos? La respuesta es precisa: indudablemente que *sí*, si *se ejecuta correctamente*. La selección del método idóneo, adaptable a las condiciones locales y ajustada de tal forma que *pueda alcanzarse el objetivo propuesto*, es lo primero que debe ser tomado en consideración por el proyectista de un sistema de recarga artificial. Lo anterior significa que deben ser relegados al olvido los criterios simplistas o «cerrados» sobre el uso de un tipo determinado de procedimiento para realizar la recarga artificial, analizar con verdadero detalle e imparcialidad las variantes más adecuadas al caso bajo estudio y seleccionar al final aquella que resulte técnica y económicamente, *la más conveniente*. Así la selección del método a aplicar está gobernada por la topografía local, la geología, y las condiciones del suelo, la cantidad de agua a ser recargada, y el uso último del agua [3], y en circunstancias especiales, la calidad del agua, además de las condiciones climáticas predominantes en el territorio donde habrá de realizarse la recarga. Resulta en extremo conveniente realizar investigaciones de geofísica de pozos, en calas de investigación, así como utilizar trazadores artificiales, con el objeto de determinar, por una parte, la dirección general del flujo subterráneo a escala regional y local (no olvidar que en el caso éstas pueden definir notablemente) y, por otra parte, la velocidad real del flujo, ya sea ésta la media del territorio considerado en extensión, o su distribución en profundidad, dentro del acuífero (el desarrollo del caso es heterogéneo y por este motivo la velocidad varía en sentido vertical, acorde con el grado de carsificación y la génesis de la alimentación natural).

Otros *objetivos* de la recarga artificial en formaciones cársicas lo son, a saber:

- su utilización como *barrera de agua fresca* (barrera antisalina), que se interpone entre el agua «nativa» o propia del acuífero, y la contaminada (esta última, por intrusión salina, o por el resultado de la infiltración del agua podrida de ríos, lagunas o embalses).
- su utilización para *restituir* la infiltración natural en aquellos acuíferos donde, al construirse drenajes superficiales, la misma se ha visto reducida considerablemente (podemos incluir aquí los efectos de la tala de bosques, desbroces, etc., realizados por el hombre durante su trabajo de acondicionamiento de terrenos);
- su utilización como *drenaje vertical* de sistemas de riego que utilicen aguas en exceso (DDA-100MA, por ejemplo), o de zonas potencialmente inundables. Aquí el factor *adverso* de un valor de α elevado, manifestado para el propósito de incremento en el almacenamiento de agua en el acuífero, resulta *beneficioso* cuando de evitar inundaciones se trate.

Por todo lo antes expuesto, la recarga artificial *puede y debe* ser utilizada en formaciones acuíferas carsificadas, aunque ello *no implique necesariamente*, a) que sus *beneficios* puedan cuantificarse con facilidad; b) que tales *beneficios cuantitativos* no resulten de la magnitud requerida; c) que, inclusive; *no represente* al final incremento en el almacenaje de un acuífero.

Resumiendo podemos decir que la proyección y construcción de un sistema de recarga artificial a una formación cársica, debe realizarse siguiendo los siguientes pasos:

- 1º Definir el propósito fundamental (o los propósitos, de ser estos más de uno) de la recarga artificial.
- 2º Señalar las razones por las cuales ella puede ser justificada, comparando los beneficios de la misma con otras variantes, como por ejemplo, el bombeo de aguas superficiales.
- 3º Analizar las variantes y decidir *cuál* es la que más se adapta técnica y económicamente a las condiciones del sitio seleccionado pre-

viamente y a los recursos materiales disponibles.

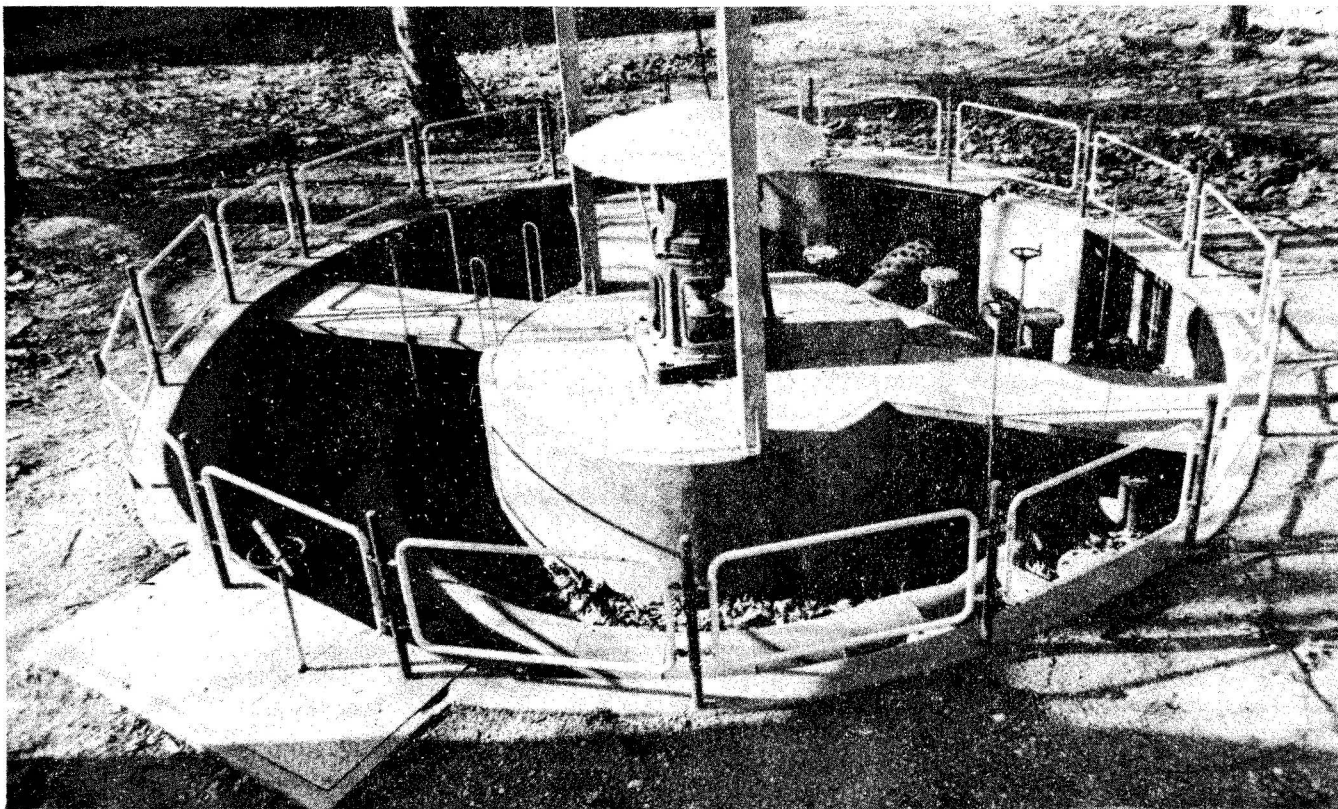
4º Realizar los estudios geológicos, geofísicos, hidrogeológicos, topográficos e hidroquímicos necesarios.

5º Una vez cumplimentado lo anterior se hará preciso definir:

- la capacidad de infiltración (o de recarga) de las obras que se utilizarán para este fin;
- las características del agua recargada en el seno del acuífero y el efecto de la recarga en los pozos cercanos;
- el posible deterioro de la calidad del agua subterránea ocasionado por la recarga del agua, sanitaria o químicamente deteriorada. También, la compatibilidad química de ambas aguas, nativa y recargada, se hace indispensable para evitar la precipitación de los sólidos disueltos en las «rejillas» de los pozos, o dentro de la formación acuífera;

1.— Observaciones del comportamiento de un pozo de recarga enclavado en "V. de Girón", Cuenca Sur, Matanzas, Cuba. Pozo en etapa "experimental".





2— Pozo experimental ("piloto") de recarga de aguas residuales, tratadas, en el Besós, Barcelona, España. (Foto cortesía del Dr. E. Custodio).

- el efecto del ascenso del nivel de las aguas subterráneas sobre las edificaciones y estructuras (afectación de la estabilidad de las mismas); sobre los cultivos sensibles (ascensos de la zona radical del agua salobre, por ejemplo); o sobre las condiciones naturales de un terreno, (cenagosidad, etcétera);
- la posible influencia de la recarga sobre las tomas de agua existentes, y el pronóstico sobre las futuras, tanto en lo relativo a sus extracciones, como en su estructura y estabilidad (en especial, los pozos).

Como bien enuncia Custodio [5]: «se pueden llevar a cabo diferentes aproximaciones para el correcto proyecto de una instalación (*de recarga*), pero siempre conviene establecer como fase previa una obra general, una instalación «piloto» y trabajar con ella un cierto tiempo, incluso algunos años. De otro modo se corre el riesgo de fracasar u obtener un funcionamiento deficiente». A pesar de lo correcto de lo sentenciado, las obras de recarga se ejecutan en términos generales (y Cuba no es una excepción, lamentablemente) *sin* que se realicen estos trabajos «pilotos». Es más, las propias obras definitivas *no* son atendidas y controladas debidamente durante las operaciones de recarga, lo que

imposibilita el acopio de experiencia para «optimizar» futuros proyectos o *mejorar* los existentes.

Por lo tanto, la ejecución de obras de recarga «pilotos» constituye otro punto a considerar en la proyección, de un sistema de recarga y no debe ser pasado por alto. En Cuba todos los sistemas de recarga han sido construidos *sin* la ejecución de obras «pilotos», lo que ha ocasionado que aquellos hayan sido, o sobrediseñados, o deficientemente construidos.

Durante este año 1985, se pretende construir el primer pozo «piloto» en la «Zona No. 1» de recarga, enclavada en la parte central de la cuenca «Sur» de la provincia de Mantanzas. Su diseño corrige los defectos de los ya construidos (Foto No. 2), y facilitará la medición *directa* de los volúmenes inyectados y su efecto sobre el manto subterráneo. Se complementa el estudio con la instalación de un limnigrafo y mediciones hidrométricas de la entrada y salida de agua al sistema de recarga dentro del cual estará enclavada la estación «piloto».

Un estudio completo sobre un pozo «piloto» puede verse en el trabajo realizado en West St. Paul, Minnesota, USA [27], y los del Besós, en Barcelona, España (Foto No. 2, cortesía del Dr. E. Custodio).

Palabras finales

Puede considerarse que el agua recargada se mueve dentro del acuífero de acuerdo con *dos* sis-

temas de flujos; el primero, resultante del efecto de *esparcimiento* con una velocidad íntimamente vinculada al flujo de recarga; y el segundo el efecto de *deslizamiento*, con una velocidad muy vinculada al flujo subterráneo [2].

La velocidad de circulación resultante de ambos efectos será determinante en la caracterización de la recarga. La mayor o menor capacidad de disipación del efecto de la recarga sobre las condiciones naturales imperantes en el acuífero estará condicionada por esta velocidad de circulación, y por la «sensibilidad» que manifieste el acuífero ante dicha recarga, lo que está determinado por el coeficiente de difusividad hidráulica, como ya hemos visto.

El éxito de la proyección de un sistema de recarga reside en el *conocimiento* que se tenga del medio acuífero y en la selección posterior del método *óptimo* de realizarla. Hemos visto que en las formaciones cársicas juega un papel importante el sistema de grietas secundarias y poros, en los que el valor de a_B resulta *interior* al correspondiente al sistema de conductos principales, siendo en aquel generalmente el flujo lineal y en este último, no lineal y a veces turbulento puro.

Si se pretende *retener* o *almacenar* agua mediante la recarga en tales acuíferos cársicos, como cuestión primordial, se hace menester realizar ésta en las zonas donde el desarrollo del carso sea menor, aunque puntualmente no se obtengan caudales de recarga apreciables. Debe procurarse que la recarga se realice en *extensión* (por medio de balsas, trincheras; pozos grandes, someros, etc.), en vez en *profundidad* (pozos profundos) y *evitar* se alcance directamente el sistema de conductos principales. Se reconstruirán así las condiciones naturales de infiltración, y se asegurará la permanencia por un tiempo mayor del agua recargada en el acuífero.

Por último, reafirmar la necesidad de proyectar y ensayar sistemas de recarga «pilotos» antes de decidirse por la variante definitiva, que complementarán los estudios hidrológicos, hidrogeológicos, geológicos, hidráulicos, topográficos e hidroquímicos previamente realizados.

BIBLIOGRAFIA

1. Halek, V.; Jedlicka, B.; Knezek, M.: "Artificial ground water storages in the Czechoslovak Socialist Republic". I.C.I.D. Proceedings. SYMPOSIUM. Atenas, Grecia, 1978.
2. United Nations: "Ground Water storage and artificial recharge". Natural Resources, Water Series No. 2. New York, USA, 1975.
3. Todd, David K.: "Ground Water Hydrology". Edición Cubana Ediciones R, Cuba, 1971.
4. U.S.C.I.D., ICID: "Development of technics to recharge subterranean aquifers to conserve surplus river flows in the United States. ICID. Proceedings of the Symposium of Athens, Grecia, 1978.
5. Custodio, E.; Llamas, J. R.: "Hidrología Subterránea". Tomos I y II. Ediciones Omega, S. A., Barcelona, España, 1976.
6. Frank, W. H.: "Historical development and present state of artificial ground water recharge in the F. R. of Germany". Bulletin 11, Artificial Groundwater Recharge, Volumen I, DVWK, Verlag Paul Parey, Hamburgo, 1982.

7. González Báez, A.: "Monografía sobre la recarga artificial en Cuba". Instituto de Hidroeconomía. La Habana, 1983 (mecanografiado).
8. ———: "Elaboración de consenso para la confección de ubicación y explotación de los sistemas de reposición artificial de los recursos de las aguas subterráneas". Subtema IB-06-3, Comisión de Recarga Artificial de CAME, CDOH, 1983, (en ruso).
9. ———: "Experiencias de recarga artificial en acuíferos cársicos cubanos". Coloquio Internacional sobre Hidrología Cársica en la región del Caribe. CNC, P.H.I. y UNESCO. Palacio de las Convenciones, C. de la Habana, Cuba, 1982.
10. Louis, C.; Maini, Y. N.: "Determinación in situ de los parámetros hidráulicos en rocas fisuradas". Proyecto de mecánica de Rocas, Universidad Imperial, Londres, Sw 7, Gran Bretaña.
11. Drogue, C.: "L'aquifère karstique: un domaine perméable original". Le Convier du CNRS, No. 44, mars 1982, París, France.
12. Llopis Lladó, N.: "Fundamentos de Hidrología Cársica". Editorial Pueblo y Educación, Cuba, tomado de la edición española, Madrid, España, 1970.
13. Rodríguez Vidal, J.; Da Navascues, G.: "La tafonización de las areniscas miocenas en los alrededores de Huesca". Revista Tecniterrae, Ibergesa, Madrid, España, 1974.
15. Mijatovic, B. F.: "Rational exploitation of karst waters". Hydrogeology of karstic terrains IUGS, IAH, París, Francia, 1975.
16. Molerio León, L.: "Algunos resultados de la aplicación del método de recesión al estudio hidrodinámico de los acuíferos cársicos cubanos". Coloquio Int. sobre Hidrología cársica de la región del Caribe. C.N.C., P.H.I. y UNESCO. Palacio de las Convenciones, C. de La Habana, Cuba, 1982.
17. Molerio León, L.; Oliva Guerra, M.; Flores Valdés, E.: "El mapa hidrogeológico del carso cubano". Coloquio Int. sobre Hidrología cársica de la región del Caribe. CNC, PHI y UNESCO. Palacio de las Convenciones, C. de La Habana, Cuba, 1982.
18. Gheorghe A.: "Processing and Synthesis of hidrogeological data". Abacus Press, Tumbidge Wells, Kent, England, 1978.
19. Burdon, D. J.; Papakis, N.: "Hidrología subterránea, de E. Custodio y J. R. Llamas".
20. De wiest, R. J.: "Geohydrology" John Wiley and Sans, Inc. New York, 1965.
21. Bogomolov, G.: "Hydrogeologie et nations de geologie d'ingenieur", Editions de la Paix, Moscou, URSS.
22. Pérez Franco, D.: "Caracterización de los regímenes de flujo del agua subterránea". Revista Tecnología, Ingeniería Hidráulica, Serie 10, No. 18 Universidad de La Habana, 1973.
23. ———: "Flujo del agua subterránea hacia un pozo de régimen permanente no lineal". Revista Tecnología, Ingeniería Hidráulica, No. 19 Universidad de La Habana, 1973.
24. Harpaz, Y.; Schwarz, J.: "Operating a limestone aquifer as a reservoir of water supply system" Tahal Technical Report, TAHAL, Tel Aviv, Israel.
25. Mercado, A.: "Underground water storage study". Recharge and mixing tests at well LOD 20. Technical Report No. 16. TAHAL, Tel Aviv, 1965.
26. González Báez, A.: "Aprovechamiento de la capacidad almacenadora de los acuíferos: la recarga artificial". Revista "Voluntad Hidráulica", Año X, No. 25 Cuba, 1973.
27. Reeder, Harold O.; Wood, W. W.; Ehrlich, G. G.; Sun, Ren Jen. "Artificial recharge through a well in fissured carbonate rock, West St. Paul, Minnesota" Geological Survey, Water Stepply Paper 2004, Washington, USA, 1976.