SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
IV COLOQUIO NACIONAL

EFECTO DEL BOMBEO EN LOS CAUDALES SUPERFICIALES. CASO DE UN ACUIFERO DRENADO POR DOS CAUCES.

GASTON GALLEGUILLOS B. (*)

RESUMEN

Se presenta el estudio comparativo de dos metodologías para el cálculo de los efectos sobre dos cauces perfectamente conectados a un acuífero real debido a bombeos concentrados y extendidos en el acuífero.

El uso de una metodología basada en las expresiones analíticas debidas a Jenkins, entrega valores de los volúmenes perdidos por los cauces debido a bombeos concentrados en áreas pequeñas entre los dos cauces, que se aproximan satisfactoriamente en general, a los obtenidos con un modelo digital de simulación del escurrimiento subterráneo.

Los efectos sobre los cauces debido a un bombeo uniformemente repartido en toda el área acuífera son subevaluados por una metodología basada en las expresiones analíticas, con respecto a los arrojados por el modelo digital empleado. Se analizan las causas y se propone una metodología alternativa de cálculo basada en las mismas expresiones.

(*) Ingeniero Civil (U.de Ch.) Profesor Jornada completa de la Facultad de Ingeniería Civil de la Univereidad Técnica Federico Santa María.

1. INTRODUCCION

La explotación de aguas subterráneas en acuíferos poco profundos drenados por cauces superficiales provoca, necesariamente, una disminución del caudal transportado por dichos cauces. Cuantitativamente, esta disminución se prolonga después de que cesa el bombeo y es perfectamente posible que su valor máximo se produzca dentro de este período de post-bombeo.

La cuantificación de estos efectos es necesaria para la planificación del uso combinado de los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos.

Este problema fue primeramente estudiado para el caso de un acuífero ideal (isótropo, homogéneo y semi-infinito) conectado a un solo cauce superficial (Jenkins, 1968), dando lugar a una expresión analítica para el cálculo de los efectos del bombeo en el caudal superficial. El caso real equivalente fue enfrentado mediante el uso combinado de un modelo de simulación matemática del escurrimiento subterráneo (del tipo diferencias finitas) y de las expresiones analíticas deducidas para el caso ideal, configurándose una metodología cómoda y relativamente simple para la previsión del efecto sobre el cauce, debido al bombeo en uno o varios puntos de ubicación cualquiera en el acuífero (Taylor, 1971). Por otro lado, esta misma metodología fue aplicada al caso de condiciones de borde de diferente naturaleza para un acuífero de transmisibilidad T y coeficiente de almacenamiento S, único; se analizó el caso de un bombeo puntual en ubicaciones particulares (en el punto central entre dos cauces paralelos, en el punto central entre un cauce y una barrera impermeable, etc). Los resultados obtenidos son bastante mejores que los señalados por el uso de la expresión analítica correspondiente al acuífero semi-infinito; sin embargo, presentan desviaciones superiores a un 25% con respecto a los efectos estimados mediante un modelo matemático sometido a las mismas condiciones de borde (Moulder y Jenkins, 1969).

La realidad señala con frecuencia la existencia de acuífero superficiales conectados a más de un cauce importante como agente de drenaje; naturalmente, las geometrías de los cauces y la variabilidad espacial de T y S y las condiciones de borde en general, serán factores que, en mayor o menor grado, introducirán desviaciones con respecto a la realidad en el cálculo de los efectos de bombeos en los cauces mediante la metodología ideada por Jenkins.

El autor de esta comunicación, debió enfrentar como integrante de un equipo profesional, el estudio del problema planteado en los acuíferos existentes en la segunda y tercera sección de regadío del Valle del río Aconcagua, los que, en sus zonas más extensas son drenados por dos cauces (el río Aconcagua y los esteros Lo Campo y Pocochay, respectivamente). Los estudios realizados dejaron sembrada la inquietud respecto de las diferencias entre los resultados obtenidos por la metodología más simple y flexible de Jenkins y los que se obtendrían con el empleo de un modelo matemático de alto costo de operación. En este trabajo se describen sucintamente ambas metodología y se presentan los resultados comparativos de su aplicación al embalse subterráneo existente en los alrededores de Quillota (La Cruz-San Pedro) para el caso de bombeos concentrados en tres partes del valle y para el caso extremo de un bombeo uniformemente distribuído en todo el acuífero.

2. BASES TEORICAS

El cálculo de la disminución de caudales en un cauce rectilíneo provocada por el bombeo constante de un caudal Q en un acuífero ideal perfectamente conectado a él (semi-infinito, isótropo y homogéneo) se puede calcular mediante las siguientes expresiones analíticas:

$$\alpha = \frac{q}{Q} = \mathrm{erfc}\left(\sqrt{\frac{a^2 S}{4t\,T}}\right) ; \quad \beta = \frac{v}{Qt} = 4i^2\ \mathrm{erfc}\left(\sqrt{\frac{a^2 S}{4t\,T}}\right), \qquad (I)$$

en que:

erfc = función error complementaria

i^2 erfc = segunda integral repetida de la función error

q = caudal de disminución en el cauce debido al bombeo en el tiempo t después de iniciado el bombeo Q.

Q = caudal de bombeo constante

a = distancia entre el punto de bombeo y el cauce

v = volumen perdido por el río desde el inicio del bombeo en un tiempo t.

T = transmisibilidad

S = coeficiente de almacenamiento

Para este caso teórico, se define el parámetro A como el valor de la expresión a^2 S/T y se cumple que si a^2 S/tT = A/t = 1 el valor de v/Qt = 0.28. Es decir, cuando ha transcurrido un tiempo igual al valor de A, el volumen perdido por el río debido al bombeo constante, es un 28% del volumen total bombeado hasta ese instante.

Para un acuífero real, es decir, con T y S variables, finito, solo aproximadamente rectilíneo y drenado por un solo cauce, Jenkins estudió el comportamiento de las funciones analíticas (I) utilizando como valor de A el correspondiente al tiempo que produce el 28% aludido anteriormente, determinado con el uso de un modelo de simulación analógica; Taylor lo hizo con un modelo digital. Los valores que entregan las funciones analíticas son bastante similares a los estimados mediante modelos matemáticos, con una considerable economía de esfuerzo y costo.

Esta metodología resulta entonces, de gran conveniencia para el cálculo de los efectos sobre el cauce superficial debido a bombeos discontinuos múltiples de diferentes magnitudes y en diferentes puntos del acuífero. Para lograr este objetivo, basta calcular el valor de A en los diferentes puntos de bombeo y suponer un comportamiento lineal del embalse subterráneo, para así, aplicar el principio de superposición que permite estimar la distribución temporal del efecto total, como la suma de los efectos parciales debidos a los bombeos efectuados en cada pozo. Estos últimos se obtienen mediante las expresiones analíticas aplicadas a cada intervalo de tiempo de bombeo constante.

Así por ejemplo, el cálculo del caudal de disminución en el río en un instante t, debido a un bombeo en el pozo k de monto Q_B efectuado entre los instantes t_i y t_f ($t_f < t$) se puede calcular como la suma de los efectos debidos a un bombeo Q_B constante a partir de t_i hasta t y a un bombeo negativo (recarga) de monto Q_B a partir de t_f hasta t. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura Nº 1 siguiente:

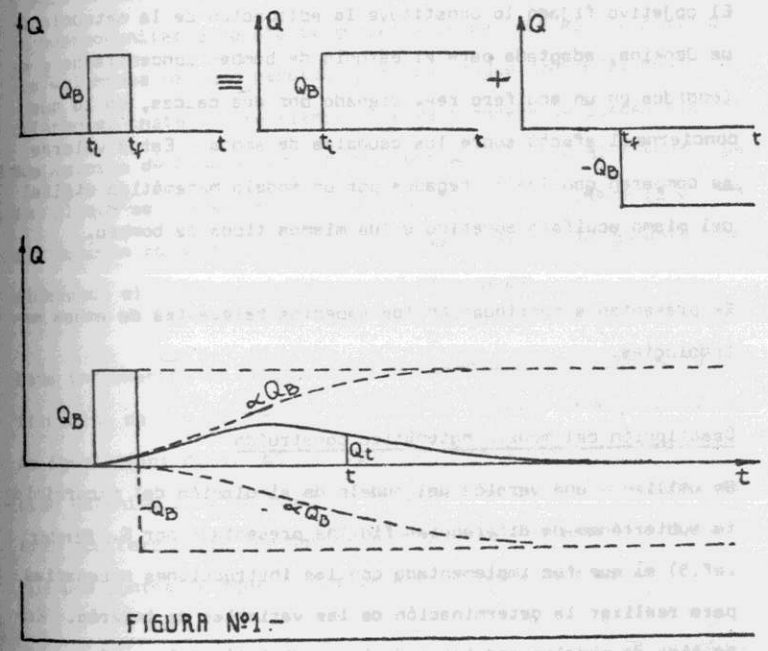

FIGURA Nº1.-

El cálculo del caudal de disminución en el río debido a este bombeo (Q_t) y el volumen perdido por el río desde t_i hasta t (v_t) se puede efectuar mediante las siguientes expresiones:

$$Q_t = \alpha\,(A_k, t - t_i) \cdot Q_B - \alpha\,(A_k, t - t_f) \cdot Q_B$$

$$v_t = \beta\,(A_k, t - t_i) \cdot Q_B\,(t - t_i) - \beta(A_k, t - t_f) \cdot Q_B \cdot (t - t_f)$$

en que,

A_k = valor del parámetro A en el pozo k

$$\alpha\,(A_j, t_j) = \mathrm{erfc}\,(\sqrt{A_j/4\,t_j})$$

$$\beta\,(A_j, t_j) = 4i^2\,\mathrm{erfc}\,(\sqrt{A_j/4\,t_j})$$

3. DESCRIPCION DE LAS METODOLOGIAS UTILIZADAS

El objetivo fijado lo constituye la aplicación de la metodología de Jenkins, adaptada para el estudio de bombeo concentrados y extendidos en un acuífero real drenado por dos cauces, en lo que concierne al efecto sobre los caudales de ambos. Estos valores se comparan con los entregados por un modelo matemático digital del mismo acuífero sometido a los mismos tipos de bombeo.

Se presentan a continuación los aspectos relevantes de ambas metodologías.

3.1 Descripción del modelo matemático construído

Se utiliza una versión del modelo de simulación del escurrimiento subterráneo de diferencias finitas presentado por G. Pinder ref.5) el que fue implementado con las instrucciones necesarias para realizar la determinación de las variables de interés. Este tipo de modelos requieren de la subdivisión del acuífero en planta en elementos rectangulares lo que se hizo mediante la

superposición de una malla de 18 filas por 32 columnas, originándose celdas de 600 m por 600 m. A cada celda se le asignó un valor de transmisibilidad de acuerdo a la distribución que se presenta en la Figura Nº 2 y se adoptó un valor constante del coeficiente de almacenamiento de 0.15. Considerando que se pretende evaluar solamente el efecto de explotaciones subterráneas en los caudales superficiales, se adoptó como condición inicial una superficie freática horizontal a igual cota que la del agua en los cauces, para todas las simulaciones realizadas. Como condiciones de borde y de operación se fijó el nivel del agua en las celdas - cauce a un nivel igual al original y se le asignó valor nulo de transmisibilidad para las celdas no acuífera y para las secciones transversales extremas del acuífero analizado.

3.2 Metodología de Jenkins.

Mediante el modelo digital se calculan los valores del parámetro A para diferentes celdas. Esto se logra mediante la aplicación de un bombeo unitario constante en la celda de interés y evaluando los volúmenes de agua perdidos por cada cauce debido al bombeo en diferentes instantes de tiempo. De esta manera se pueden avaluar dos valores de A para cada celda; uno corresponde al tiempo para el que se tiene que el volumen perdido por un cauce es el 28% del volumen total bombeado y el otro se obtiene análogamente, considerando el volumen perdido por el otro cauce.

Esta información da origen a una representación gráfica de la distribución de los parámetros mediante el trazado de algunas líneas de igual valor de A. En la Figura Nº 3 se presenta la distribución obtenida para el acuífero estudiado en la que se muestra el área acuífera entre los cauces particionada mediante una línea que une puntos de igual valor de A relativo a cada cauce.

Se postula entonces, que las respuestas en el cauce correspondiente, debidas a bombeos iguales efectuados en puntos de igual valor

de A serán similares; de esta manera, se pueden obtener los efectos sobre los cauces de bombeos múltiples, no uniformes, haciendo uso de las expresiones analíticas y del principio de superposición de acuerdo a lo anteriormente señalado.

4. APLICACIONES Y RESULTADOS

Para cuantificar el comportamiento de la metodología basada en las expresiones analíticas de Jenkins, se realizaron dos tipos de aplicaciones en los acuíferos de la zona de Quillota, pretendiéndose comparar los resultados arrojados por esta metodología con los obtenidos mediante el modelo digital de diferencias finitas para condiciones idénticas.

Se adoptaron dos tipos de condiciones, por un lado, se calcularon, con ambas técnicas, los efectos sobre los cauces debido a bombeos concentrados en un área de 600 m. por 600 m. (tamaño de la celda en el modelo digital) y por otro, se analizó el caso extremo de bombeo iguales y simultáneo en numerosos pozos repartidos uniformemente sobre todo el acuífero.

Esta última aplicación, tiene su justificación en que, una explotación intensiva del embalse subterráneo en esa zona requeriría, dadas las características de los acuíferos, una gran cantidad de pozos repartidos sobre una extensión considerable.

4.1 Bombeos concentrados

Se analizaron separadamente bombeos en tres ubicaciones de diferentes valores de A; éstas corresponden a las áreas achuradas de la Figura Nº 3. Los valores de A en ellas con respecto al cauce mayor influencia son 125 ds., 318 ds. y 795 ds. El bombeo empleado fue de $1 m^3/s$ constante durante un mes, se calculó el efecto sobre los cauces evaluando los caudales subterráneos y los volúmenes mensuales perdidos por ellos hasta 39 meses después del

cese del bombeo. Estas dos variables se adimensionalizan dividiendo por el caudal de bombeo y el volumen total bombeado, respectivamente.

Los resultados entregados por las expresiones analíticas, así como los obtenidos con el uso del modelo digital sometido a idénticas condiciones se presentan gráficamente en la Figura Nº 4.

La observación de estas curvas indica, en general, una buena concordancia entre los resultados obtenidos de la aplicación de ambas técnicas, sin embargo, se manifiestan importantes diferencias en los primeros meses del período analizado, etapa en la que, el efecto es más fuerte y que a su vez, requiere de mayor atención en el caso de estudios de planificación del uso conjunto de recursos hidráulicos subterráneos y superficiales.

4.2 Bombeo uniformemente repartido en toda el área

Las expresiones analíticas de Jenkins, entregan, como se ha descrito, la disminución del caudal en los cauces debido a bombeos, en función del tiempo y de un parámetro A que sintetiza la variabilidad espacial de las características elásticas del acuífero, la ubicación del bombeo y las condiciones de borde.

La combinación de estas ecuaciones indicada anteriormente para el caso de un bombeo finito, entrega entonces la recuperación, por parte del acuífero, del volumen bombeado a la largo del tiempo; por lo tanto, al integrarla entre los tiempos 0 e ∞ se debe reencontrar el volumen bombeado.

En atención a las consideraciones anteriores, la metodología basada en las expresiones aplicada al caso de un bombeo muy densificado y uniformemente repartido en toda el área del acuífero, hace uso de la información contenida en la Figura Nº 3, en ésta se observa que se ha dividido en dos el área comprendida entre

los cauces mediante una línea que une puntos de igual valor del parámetro A con respecto a ambos cauces y considerándose entonces sólo el menor valor de A para los bombeos en esta área. Esto equivale a suponer que el volumen bombeado en un cierto punto produce efectos sólo en el cauce con respecto al cual el valor de A en ese punto es menor.

El bombeo total estudiado es de 1 m^3/s durante un mes, el que fue dividido en bombeos distribuídos uniformemente en cada subárea (área comprendida entre líneas consecutivas de igual valor de A dibujadas en la Figura Nº 3) ponderado por la razón entre el área de la subárea y el área total.

Para cada uno de los bombeos parciales se calcula el efecto en el cauce correspondiente mediante la expresión analítica evaluada con un valor del parámetro A, representativo de la subárea. El efecto total sobre cada cauce corresponderá a la suma de los efectos parciales debido a los bombeos en las subáreas.

En la Figura Nº 5 se presentan los resultados obtenidos con esta metodología; en ella aparecen graficados los valores de los caudales instantáneos indicados por el bombeo en cada cauce y en ambos. Estos se comparan con los obtenidos mediante la aplicación del modelo digital sometido a idénticas condiciones.

La comparación de los resultados obtenidos mediante las expresiones analíticas, señala una subestimación de los caudales inducidos en los cauces, con respecto a los calculados mediante el modelo digital, a partir del segundo mes y hasta por lo menos, el fin del período de cálculo (19 meses).

La metodología adoptada, tiene a su favor, el cumplimiento de los condiciones límites; el método de cálculo asegura una recuperación desde los cauces del volumen bombeado después de un

tiempo infinito. Sin embargo, el cumplimiento de esta medición, se traduce en una evaluación muy insatisfactoria de los efectos analizados en los primeros años, en losque se alcanza desviaciones superiores a un 50% entre los resultados arrojados por ambas metodologías.

Estas explicaciones, encuentran apoyo en los resultados que se muestran en la Figura Nº 6, en ella se ha graficado la distribución en el tiempo entregada por el modelo digital de los volúmenes perdidos por cada cauce debido a uno de los tres bombeos concentrados presentados anteriormente, el que se realiza en la ubicación más próxima al río Aconcagua. Esta ubicación tiene valores del parámetro A con respecto al río de 795 días y con respecto al estero de 933 días, los que han sido obtenidos considerando la presencia de ambos cauces en el modelo digital. En esta misma Figura se ha graficado con línea de segmentos los valores correspondientes obtenidos con las expresiones analíticas de Jenkins.

El análisis de estas curvas indica un buen ajuste de los resultados analíticos a los del modelo digital en el período analizado, sin embargo, el área bajo cada curva analítica entre los límites cero e infinito es igual al volumen bombeado, es decir, ad infinitum se recuperaría un volumen igual al doble del volumen bombeado, no satisfaciéndose de este modo esta condición límite.

En estos resultados se encuentra la explicación de las diferencias observadas para el caso del bombeo extendido en toda el área (Figura Nº 5). Los valores del parámetro A calculados para cada cauce, permiten realizar estimaciones globales satisfactorias de los efectos del bombeo en los mismos durante los primeros años. En consecuencia, al cálculo analítico de estos efectos mediante la metodología descrita se debería agregar la evaluación de las expresiones analíticas con el valor del parámetro A correspondiente al

otro cauce. Es decir, parece conveniente calcular el efecto del bombeo sobre cada cauce, en el área comprendida entre los mismos, particionando toda el área en subáreas limitadas por líneas de igual valor del parámetro A, aplicando a todas ellas un caudal de bombeo proporcional a la superficie de la subárea y sumando los efectos de estos bombeos actuados mediante las expresiones analíticas de Jenkins.

5. CONCLUSIONES

Las expresiones analíticas mostradas por Jenkins para evaluar el efecto sobre un cauce del bombeo en un acuífero ideal perfectamente conectado a dicho cauce, se han aplicado a un acuífero real drenado por dos cauces mediante la determinación de un parámetro A, que sintetiza la variabilidad espacial de transmisibilidades, la ubicación del bombeo y las condiciones de borde.

Los resultados obtenidos por una metodología basada en esta técnica se compararon con los entregados por un modelo digital sometido a idénticas condiciones. Las aplicaciones de ambas metodologías de cálculo a un bombeo constante durante un mes, concentrado en una pequeña área en los acuíferos de la zona de Quillota (3Q sección de regadío del valle del río Aconcagua) entregan una distribución en el tiempo del efecto del bombeo en los cauces globalmente similar aunque con diferencias apreciables en los primeros meses.

El estudio de un bombeo similar, pero uniformemente repartido sobre toda el área, mediante una metodología basada en las expresiones analíticas de Jenkins y que satisface las condiciones límites entrega resultados bastante inferiores, en cuanto a su efecto sobre los cauces, a los entregados por el modelo digital utilizado como patrón de comparación en el período de análisis (19 meses). La metodología alternativa esbozada, debería aumen-

tar el grado de aproximación entre los resultados de ambas metodologías en este período. Cabe observar que, de acuerdo a los resultados del modelo digital, en los 19 meses analizados se recupera un 77% del volumen total bombeado el primer mes.

Como conclusión final se puede establecer que la metodología basada en las expresiones analíticas de Jenkins, resulta atractiva para el caso de estudios en sistemas acuíferos-cauces poco controlados ya que, la importancia de los errores en esta metodología sería aminorada por la incertidumbre de las características hidrogeológicas imperantes. En caso contrario, esta técnica debería ser reemplazada por otra de mayor precisión, siendo los modelos digitales o analógicos la única alternativa actualmente vislumbrada.

RECONOCIMIENTOS

El autor de esta comunicación desea citar como fuente de la información básica empleada a la oficina CICA Ings. Consultores, encargada del Estudio Integral del Regadío de los Valles Aconcagua, La Ligua y Petorca.

Este reconocimiento se extiende al Ingeniero de CICA, Sr. Agustín Hojas, cuya experiencia en el área del tema fue generosamente transmitida al autor.

BIBLIOGRAFIA

1. Tecniques for Computing Rate and volume of stream Depletion by Wells.
   C.T. Jenkins. Groundwater. Vol. 6 Nº 2. 1968.

2. Electric Analog and Digital-Computer model analysis of stream depletion by Wells.
   C.T. Jenkins. Groundwater. Vol 6 Nº 6. 1968.

3. Analog-Digital model of stream-aquifer systems EA. Moulder y C.T. Jenkins. Groundwater. Vol. 7. Nº 5. 1969.

4. A shortcut for computing stream depletion by wells using analog or digital models.
   D.J. Taylor. 1971.

5. A digital model for aquifer evaluation.
   G.F. Pinder. U.S. Geol. Survey. Book 7. 1970.-

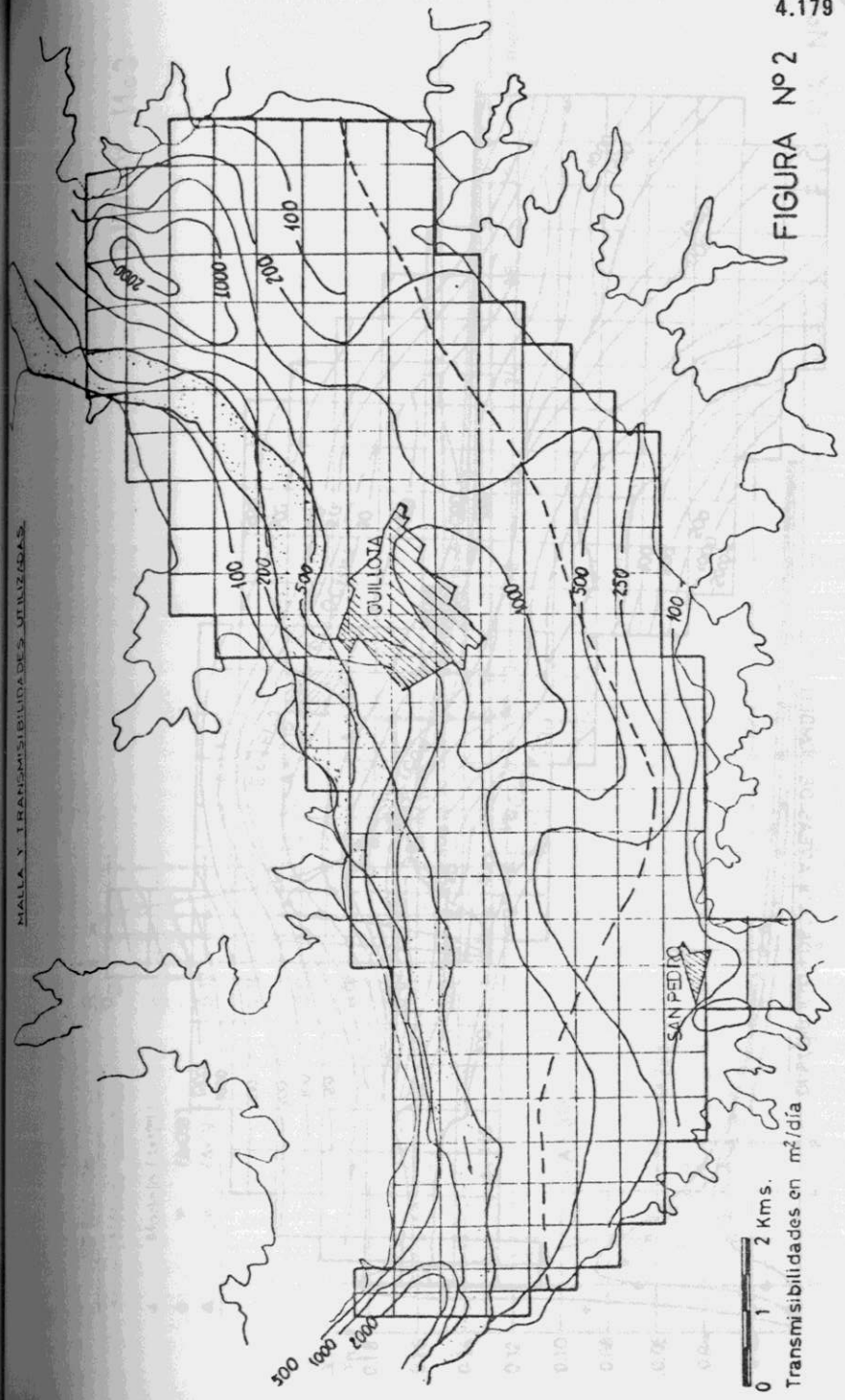

FIGURA Nº 2

DISTRIBUCION DE "A" Y AREAS DE BOMBEO

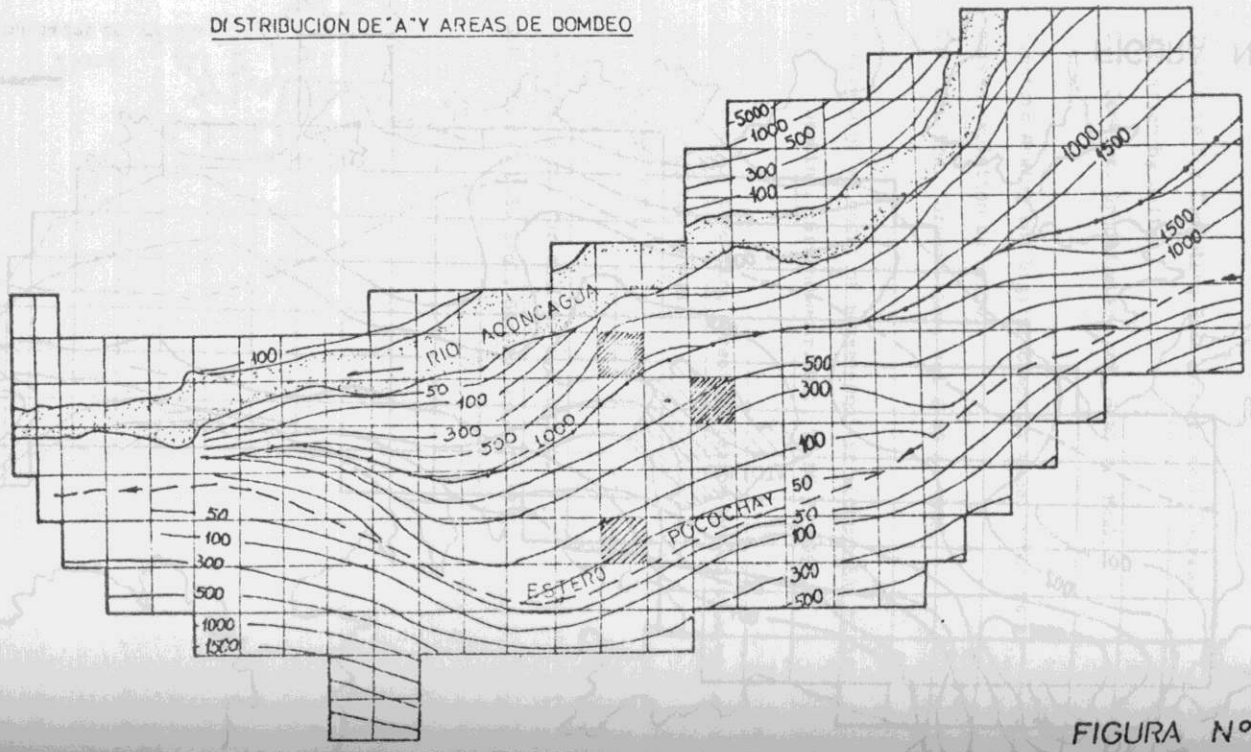

FIGURA Nº3

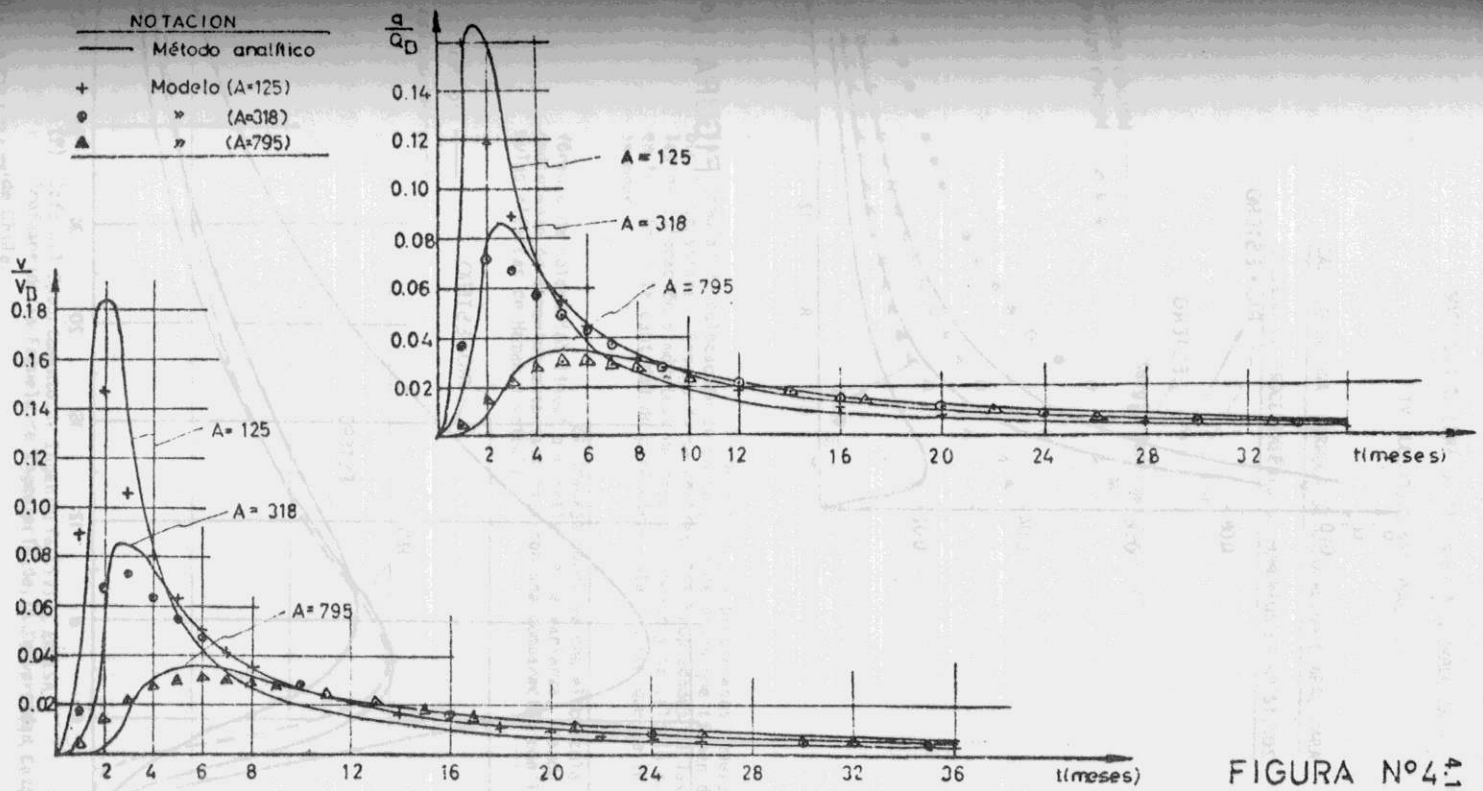

FIGURA Nº4

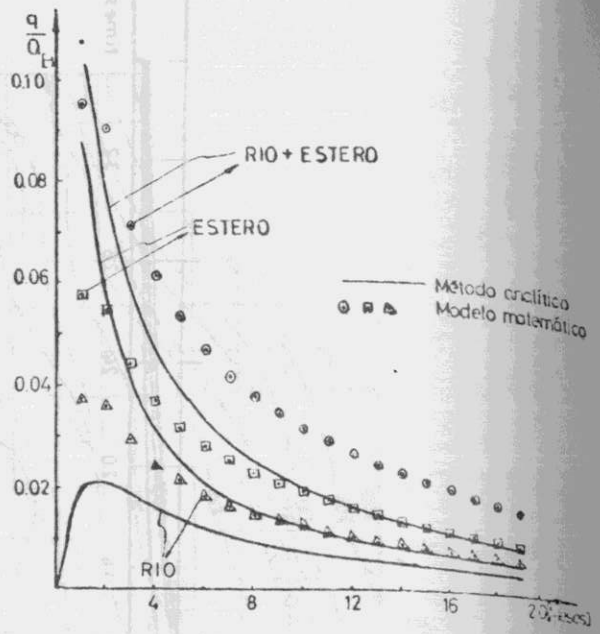

FIGURA Nº5

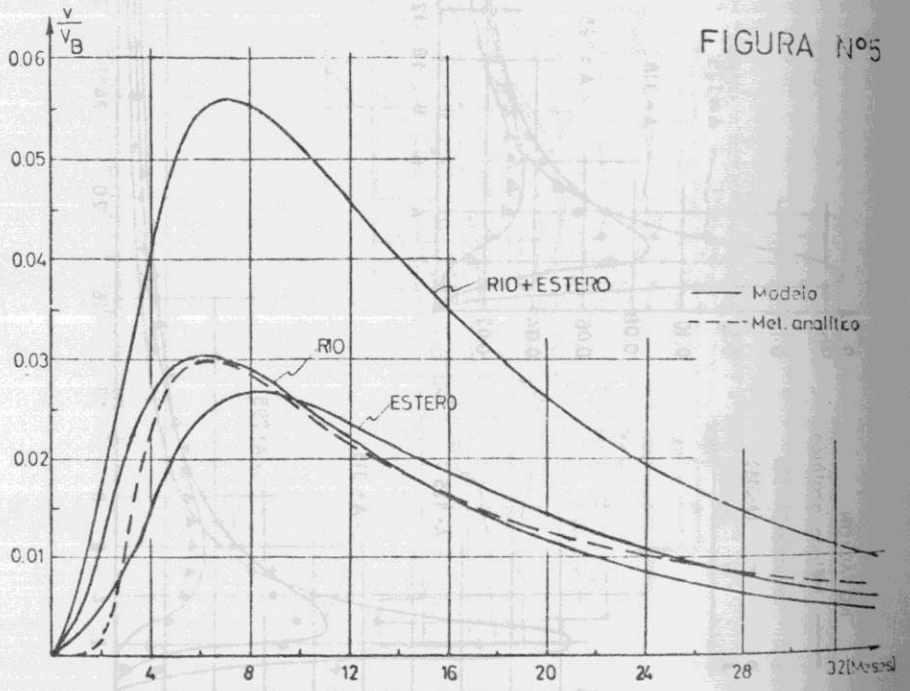

FIGURA Nº6

CALCULO DE UNA FORMULA DE COLOCACION LINEAL PARA APLICAR EL PROCEDIMIENTO DE MOMENTOS ESTADISTICOS

Por

Sergio Radrigán Vogel (*)

RESUMEN

Se presentan las propiedades generales de las fórmulas de colocación de un conjunto de datos que tienen distribución gaussiana. Enseguida se analizan las propiedades de las fórmulas de colocación simétricas de tipo polinómico y se calcula su grado en función de la cantidad de parámetros estadísticos que se le desean imponer.

El trabajo concluye con el cálculo de la fórmula de colocación lineal que satisface la varianza, usando el procedimiento de momentos estadísticos, y con una comparación con las fórmulas clásicas de Hazen y Weibull.

(*) Jefe del Departamento de Ingeniería Civil, ENDESA
Profesor de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Católica de Chile.