

SITUACION AMBIENTAL DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

A. Recursos y rasgos naturales en la evaluación ambiental

OBTENCION Y VALORACION DE DATOS, HIDROQUIMICOS E HIDROMETEOROLOGICOS

Control de calidad y procesamiento primario de datos químicos en hidrología
*E. Usunoff y *M. Morano

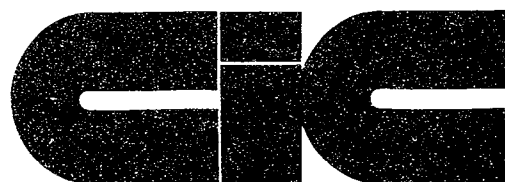
SISTEPEN: Un programa para el cálculo de la evapotranspiración de referencia
y de un balance hídrico sencillo
*M. Navarro Duymovich y *M. Morano

Aspectos prácticos de experimentos con columnas de laboratorio
*E. Usunoff

*Instituto de Hidrología de Llanuras - IHLLA

AÑO III - Nro. 24 - 1993

Coordinación: Dres. Hugo L. López y Eduardo P. Tonni



provincia de buenos aires
comisión de
investigaciones científicas

calle 526 entre 10 y 11-1900 La Plata
teléfonos 43795 217374 49581

CONTROL DE CALIDAD Y PROCESAMIENTO PRIMARIO DE DATOS QUIMICOS EN HIDROLOGIA

*E. Usunoff y *M. Morano

RESUMEN

Debido a la práctica frecuente y poco costosa de realizar análisis químicos de muestras de agua, en los estudios de tipo hidroquímico por lo general no se presentan problemas en cuanto a la cantidad de datos disponibles. La realidad indica, sin embargo, que la calidad de dicha base de datos es a menudo cuestionable. Ello permite suponer que la utilización de la información previa, si su calidad es dudosa, puede conducir a conclusiones erróneas o, como mínimo, desconcertantes. Los hidrogeólogos tienen, por consiguiente, la obligación de "filtrar" convenientemente la información de partida a fin de acceder a una segunda etapa de procesamiento sólo con aquellos datos de calidad probada. Tal filtro debe necesariamente ser objetivo y, en lo posible, sistemático, lo cual abre el camino para la incorporación de la informática en el área que nos ocupa.

Este trabajo describe las características de un programa interactivo escrito en BASIC, que permite la evaluación sistemática de datos químicos arriba aludida, calcula parámetros hidroquímicos de uso frecuente y brinda una serie de salidas gráficas (por pantalla e impresora) válidas para la primera etapa de interpretación del sistema en estudio. Se presenta una descripción de los archivos de entrada y salida de datos, como así también de las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los parámetros, y se sugieren algunas modificaciones sencillas que el usuario puede implementar.

INTRODUCCION

En todo tipo de estudio técnico se comprueba que la calidad del producto final, independientemente de lo novedoso o completo de su presentación, nunca es superior a la calidad de los datos originalmente disponibles. Si bien el concepto es válido en todo terreno científico, en las investigaciones de carácter hidroquímico sus implicancias son considerables debido a las dificultades con las que se enfrenta el científico que pretende determinar a priori la calidad de sus datos de base. Dichas dificultades nacen del comportamiento mayoritariamente aleatorio de las especies disueltas que se encuentran en los sistemas acuosos naturales. En esas condiciones resulta a menudo muy difícil discernir acerca de la validez o representatividad de un conjunto de datos químicos y, como resultado de ello, las conclusiones a las que se arribe

utilizando dicha información no estarán suficientemente sustentadas.

Lo expuesto hasta este punto permite imaginar los problemas que se plantean en aquellos casos donde deben tomarse decisiones importantes en base a los resultados del estudio hidroquímico. Dichos resultados conducirán al planteamiento de una serie de alternativas de acción, cada una de ellas invariablemente ligada a una ecuación de beneficio-costos. Si tales alternativas resultan ficticias debido a la baja calidad de los resultados del estudio (que podrían devenir del uso de una pobre base de datos), las pérdidas económicas serán inevitables, a lo cual se unirá el descrédito para aquellos que hayan estado involucrados en el estudio.

Resulta obvio, entonces, que el científico debe efectuar un control de calidad de los resultados que presenta. ¿Cómo lo hace? La respuesta es de una amplitud considerable, y en ella la experiencia del investigador y su grado de conocimiento de las técnicas empleadas juegan un papel primordial. Pero por sobre todo, y a fin de ahorrar tiempo, dinero y sinsabores, el científico prudente implementará un control exhaustivo de los datos que servirán de base a sus conclusiones antes de iniciar cualquier tipo de estudio analítico.

METODOS CUANTITATIVOS EN HIDROQUIMICA

Se ha mencionado más arriba una característica inherente a los sistemas hidroquímicos, tal es el de las variaciones que experimentan las concentraciones de las especies disueltas a lo largo de las direcciones principales del flujo subterráneo. Se ha comprobado también que, salvo en los casos en los que se analizan sistemas hidrogeológicos muy simples, dichas variaciones no pueden explicarse apelando a modelos hidroquímicos sencillos. Los fenómenos modificadores que operan son variados y complejos, tanto en su naturaleza como en su intensidad. Cualquier estudio hidroquímico llevado a cabo apropiadamente revelará la existencia de procesos de hasta cuarto orden (en promedio) que determinan, en conjunto, la variación observada en las concentraciones de los iones de interés.

Tal particularidad ha influido de manera decisiva durante los últimos años el espectro de técnicas o métodos a aplicar en los estudios hidroquímicos. Es así que la tendencia actual es hacia la aplicación de métodos basados en la Estadística, los que poseen la gran ventaja de poder analizar las variaciones de los parámetros estudiados de manera conjunta, con el objetivo de hallar patrones de correlación que de otra manera no se revelarían fácilmente en un estudio con técnicas "clásicas". En base a su grado de difusión y aparente efectividad, se pueden mencionar los siguientes métodos estadísticos de neta aplicación en estudios hidroquímicos: análisis de componentes principales, de factores, de correspondencias, de grupos significativos, y kriging.

Referencias a estos métodos y ejemplos de aplicación abundan en la literatura especializada (Harman, 1967; Anderberg, 1973; Ashley y Lloyd, 1978; Dalton y Upchurch, 1978; Carrera et al., 1984; Greenacre, 1984; Usunoff y Guzmán-Guzmán, 1989; Samper y Carrera, 1990), y sólo cabe mencionar que todos ellos exigen la validación previa de los datos a analizar. Esto último trae a colación lo sugerido en la parte introductoria de este trabajo: es necesario revisar la base de datos disponibles de manera sistemática y objetiva para eliminar aquella información "sospechosa" que, de ser incluida, modificaría sensiblemente los resultados. No se trata aquí de rechazar la información anómala en aras de una uniformidad que en la Naturaleza no existe; lo que se pretende es establecer una batería consistente de "filtros" de validación, lo que otorgará un cierto nivel de confiabilidad en los datos que finalmente sobrevivan al proceso de selección y, sobre todo, en los resultados que se obtengan utilizando dicha información de calidad ya verificada.

CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA ANAQUIM

Estructura del programa

Este programa ha sido escrito en lenguaje BASIC y compilado con Quick-BASIC, versión 4.5, para su uso en microcomputadoras. El paquete consta de ocho subprogramas, cuyas funciones a continuación se describen:

ANAQUIM: despliega el menú principal del programa y permite seleccionar la tarea a realizar.

CHESPA: implementa el análisis primario de los datos químicos y genera los archivos internos necesarios para acceder a los subprogramas de gráficos. Como entrada, exige un archivo binario (creado con el subprograma IMPORTAR) con los datos químicos de las muestras de agua. Como salida, permite enviar a una impresora el resultado del procesamiento de los datos y guarda el resultado del análisis en un archivo con nombre fijo (ANALISIS.RES). Este archivo ASCII, que queda en el mismo drive donde están los datos originales, puede visualizarse con cualquier editor de texto o importarse desde una planilla electrónica de cálculos. Además, CHESPA crea archivos internos para su posterior uso gráfico, con nombres y drives elegidos por el usuario.

SCHOE: dibuja el diagrama logarítmico de Schoeller de hasta cuatro muestras simultáneamente. Como entrada necesita el archivo creado por el subprograma CHESPA, y la salida es por pantalla e impresora.

STIFF: dibuja el diagrama poligonal de Stiff de muestras individuales. Como entrada necesita el archivo creado por el subprograma CHESPA, y la salida es por pantalla e impresora.

PIPER: dibuja la ubicación de hasta cuatro muestras simultáneamente en el diagrama de Piper. Como entrada necesita el archivo creado por el subprograma CHESPA, y la salida es por pantalla e impresora.

DIAGCOL: dibuja diagramas columnares de muestras individuales. Como entrada necesita el archivo creado por el subprograma CHESPA, y la salida es por pantalla e impresora.

RAS: dibuja el diagrama RAS-CE (relación de adsorción de sodio-conductividad eléctrica) de hasta veinte muestras simultáneamente. Como entrada necesita el archivo creado por el subprograma CHESPA y el archivo de datos binarios creados por el subprograma IMPORTAR, y la salida es por pantalla e impresora.

IMPORTAR: transfiere los datos químicos de un archivo ASCII de entrada a otro archivo en formato binario, a partir del cual comienza a operar el subprograma CHESPA.

Requerimientos de software

Antes de poner en funcionamiento el programa, se debe activar el comando GRAPHICS.COM (D.O.S., versión 3.1 en adelante) para que los gráficos mostrados en pantalla puedan ser transferidos a una impresora. Asimismo, si no se posee una plaqueta gráfica CGA, será necesario ejecutar previamente algún programa que la simule (SIMCGA.COM, por ejemplo). A fin de evitar contratiempos o demoras inútiles, es adecuado crear un archivo batch (ANA.BAT, por ejemplo) que contenga los comandos requeridos. Por último, será necesario contar con el archivo BRUN45.EXE (soporte de ejecutables del Quick-BASIC) en el mismo drive donde se encuentran los subprogramas ejecutables del programa ANAQUIM.

Requerimientos de hardware

El programa ha sido ejecutado exitosamente en microcomputadoras tipo XT, AT y PS con un mínimo de 256 Kb de RAM. Los distintos subprogramas y los archivos que se crean durante su ejecución nunca ocupan más de 360 Kb, por lo que no es necesario contar con un disco rígido o un drive de alta densidad. En caso de contarse con impresora (el programa no lo exige), la misma puede ser de carro ancho o angosto, compatible con EPSON o con la impresora gráfica IBM.

Funcionamiento del programa

Suponiendo que previamente se ha creado un archivo en formato ASCII con los datos químicos, cuya elaboración se comenta más abajo, la invocación del programa producirá el despliegue de una pantalla de presentación seguida de una pantalla que contiene el menú con las diferentes opciones a seleccionar mediante el número apropiado.

Debe comenzarse seleccionando la opción 7 (Importar un archivo de muestras de datos hecho en ASCII), para lo cual habrá que definir el nombre de ese archivo fuente preexistente y el nombre del archivo destino que el subprograma IMPORTAR creará (en formato binario) y que será utilizado por el subprograma CHESPA para sus cálculos.

El segundo paso es la selección de la opción 1 (Realizar procesamiento primario de los análisis químicos). Aquí habrá que contestar varias preguntas: drive donde están los datos en formato binario, nombre del archivo que los contiene, título del trabajo, nombres elegidos para los archivos gráficos (hay nombres por defecto, cuyo uso se aconseja) y número de muestras contenidas en el archivo (el máximo es 80 muestras). Luego de unos instantes, y finalizados los cálculos, los resultados pueden imprimirse contestando afirmativamente a las preguntas que el programa efectúa. Además, independientemente de su impresión, se crea un archivo con formato ASCII (ANALISIS.RES) donde se guardan todos los datos del análisis numérico efectuado. El contenido de este archivo será descripto con detalle más abajo.

El siguiente paso consiste en la obtención de los gráficos que puedan ser de interés, para lo cual habrá que seleccionar la opción 2 (Diagrama de Stiff), 3 (Diagrama de Schoeller), 4 (Diagrama de Piper), 5 (Diagrama columnar) o 6 (Diagrama RAS-CE). La disposición y significado de estos diagramas es suficientemente conocida y no necesita de mayores explicaciones. La obtención de cualquiera de estos diagramas mediante el uso del programa tampoco merece aclaraciones especiales pues todo el proceso se guía con mensajes que aparecen en pantalla. En el caso del diagrama de Schoeller, además de las verticales para Ca^{++} , Mg^{++} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$ y HCO_3^- , se han agregado verticales individuales para NO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$ para caracterizar más adecuadamente a aguas que contengan a esas especies en concentraciones importantes. De todas maneras, y a efectos de evitar distorsiones exageradas del diagrama, el programa SCHOE opera de la siguiente manera:

- Si la concentración de alguno de los iones principales (Ca^{++} , Mg^{++} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, HCO_3^-) es nula o no ha sido medida, se ofrece la opción de adoptar a efectos gráficos una concentración baja (0.01 epm) o de no graficar la muestra.

- Si la concentración de NO_3^- y/o $\text{CO}_3^{=}$ es menor o igual a 0.01 epm o no se ha medido, la especie involucrada no se grafica.

Archivo de entrada:

Este archivo debe ser elaborado antes de ejecutar el programa, en formato ASCII, mediante cualquier programa que genere archivos de texto sin marcas ni tabuladores (EDLIN, WORDSTAR, NOTON, PERSONAL EDITOR, etc.). Cada muestra debe ocupar una línea y, dentro de ella, los datos deben estar separados por uno o más

espacios. Cada línea (muestra química) debe contener los siguientes datos en el orden que se indica: número de muestra (alfanumérico de hasta 4 caracteres, por ejemplo, 1, 2BA, MUE4, etc.), concentraciones (en ppm) de calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, nitrato, sulfato, carbonato, bicarbonato y fluoruro, conductividad eléctrica (en $\mu\text{mhos/cm}$ a 25 °C) y residuo seco (en ppm). El número de especies y su ordenamiento son fijos, por lo cual se requiere un cuidado especial al confeccionar este archivo. No se permite la omisión de columnas. Si alguno de los parámetros listados no ha sido medido, en la posición respectiva se escribirá un número negativo (por ejemplo, -1, -999, etc.). Los valores pueden consignarse como números reales o enteros.

Archivo de salida (ANALISIS.RES):

Este archivo es creado por el subprograma CHESPA. Consta de doce módulos de información, cuyo orden y descripción se brinda a continuación:

- 1) Título del trabajo, y, en las líneas siguientes, una reproducción de la matriz de datos de entrada, tal como el programa la ha leído del archivo binario de entrada. Las especies no medidas aparecerán como -NM-.
- 2) Medias y desviaciones típicas de los valores medidos.
- 3) Datos originales con concentraciones iónicas convertidas a unidades de epm (meq/litro).
- 4) Coordenadas del diagrama de campos de Piper (Piper, 1944).
- 5) Datos originales con concentraciones iónicas convertidas a unidades de mol/litro, lo cual facilita cualquier cálculo posterior que involucre variables termodinámicas o de otro orden.
- 6) Balance iónico y su diferencia porcentual (el porcentaje de diferencia está referido al menor de los dos valores en juego).
- 7) Cálculo de la fuerza iónica MU (mol/l) y de los coeficientes de actividad ACT1 (iones monovalentes) y ACT2 (iones bivalentes) a 25 °C.

Para el cálculo de la fuerza iónica MU, se utilizó la expresión siguiente:

$$\mu = 2\sum C_{ii} + 1/2\sum C_i$$

C_{ii} : concentración molar de iones bivalentes

C_i : concentración molar de iones univalentes

Los coeficientes de actividad ACT1 y ACT2 devienen de la ecuación de Debye-Hückel (término de error $a^0 = 1.3$; Dutt, 1986):

$$\left. \begin{array}{l} \text{ACT1} = 10^E \\ \text{ACT2} = 10^{4E} \end{array} \right\} > , E = -0.509 \sqrt{\mu} / (1 + 1.3\sqrt{\mu})$$

8) Actividad (concentración "efectiva") de las especies químicas presentes expresada en unidades de mol/litro, para cuyo cálculo se utilizan los coeficientes de actividad iónica descritos en 7).

9) Actividad de los iones presentes expresada en unidades de ppm (mg/litro), lo cual permite una comparación directa con los valores contenidos en el archivo de entrada reproducido en 1).

10) Evaluación del error analítico y de su representatividad.

El error analítico porcentual, de valor absoluto, se evalúa por medio de la siguiente expresión:

$$EA(\%) = 100 \left| \frac{\Sigma \text{cat} - \Sigma \text{an}}{\min(\Sigma \text{cat} \text{ o } \Sigma \text{an})} \right|$$

cat: concentración catiónica en epm

an: concentración aniónica en epm

min: mínimo

Nótese que la selección del mínimo de cationes o aniones en el denominador favorece a que se acentúen los errores.

El error permisible porcentual se calcula a partir de la siguiente expresión (valores tomados Custodio y Llamas, 1976. p. 223, y ajustados a una función hiperbólica):

$$EP(\%) = 4.112 + 1292.74/CE \quad (\text{para este ajuste, } r^2 = 0.99)$$

CE: conductividad eléctrica en $\mu\text{mhos/cm}$ a 25 °C

Ambos valores se comparan, y si $EA < EP$ el análisis puede aceptarse. En caso contrario, es rechazado. Es necesario aclarar que este criterio puede flexibilizarse en casos de análisis de rutina (Custodio y Llamas, 1976, p. 223), aunque como mínimo constituye un llamado de atención con respecto a aquellas muestras que deben rotularse de "dudosas".

11) Tests adicionales de validación de los análisis químicos. Puede suceder que, a pesar de la estrictez del criterio enunciado en 10), algunas muestras con errores analíticos sobrevivan a dicho filtro, ya sea por mera coincidencia o debido al "arreglo" de valores para obtener EA porcentuales bajos. Si esa es la circunstancia, los tests que a continuación se presentan serán un arma valiosa en la determinación final de la calidad de los análisis químicos bajo escrutinio:

%ClNa: diferencia porcentual (referida al valor menor) entre las concentraciones de Na^+ y Cl^- expresadas en epm. Como regla general, en sistemas naturales no degradados esa diferen

cia no debería ser superior al 50%, pues de lo contrario Na^+ podría haber sido determinado por diferencia en el balance iónico, es decir que cabe sospechar que no ha sido valorado analíticamente.

EST.C(C): estimación de la Conductividad Eléctrica de la muestra (en $\mu\text{mhos/cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$) a partir de la suma de las concentraciones catiónicas (en epm) multiplicadas por 88 (Custodio y Llamas, 1976, p. 209) y por 1.115 para corregir de 18 a $25\text{ }^\circ\text{C}$.

EST.C(A): estimación de la Conductividad Eléctrica de la muestra (en $\mu\text{mhos/cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$) a partir de la suma de las concentraciones aniónicas (en epm) multiplicadas por 88 (Custodio y Llamas, 1976, p. 209) y por 1.115 para corregir de 18 a $25\text{ }^\circ\text{C}$.

M.COND.: Conductividad Eléctrica medida de la muestra (en $\mu\text{mhos/cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$). Esta columna se incluye para su comparación inmediata con los valores calculados en las columnas de EST.C(C) y de EST.C(A), y por ende, para la detección temprana de inconsistencias entre lo medido y lo calculado. Diferencias considerables entre estos valores pueden sugerir un mal funcionamiento y/o una calibración deficiente del instrumento utilizado para medir la Conductividad Eléctrica.

RS: residuo seco medido de la muestra (en ppm).

D.RES(C): residuo seco (en ppm), el cual se calcula dividiendo el valor medido de Conductividad Eléctrica (en $\mu\text{mhos/cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$) por 1.9.

D.RES(C,A): residuo seco (en ppm), calculado en este caso por suma de las concentraciones de todos los iones (en ppm) y sustrayendo la mitad de la concentración de HCO_3^- , lo cual obedece a la pérdida de CO_2 que se produce en el proceso de desecación de la muestra. Si se han detectado coloides, sus concentraciones (en ppm) deben sumarse (esta posibilidad no está implementada en CHESPA).

DIF %: diferencia porcentual entre D.RES(C) y D.RES(C,A), referida al menor de los dos valores. Dicha diferencia no debería resultar superior a 35%.

12) Índices hidroquímicos y relaciones de interés. La inclusión de estos parámetros tiene carácter informativo y no debe utilizarse como elemento evaluatorio de la calidad de la información de base. Es por ello que lo que más abajo se describe se ciñe solamente a la forma de cálculo y a su identificación en el archivo de salida. Para una información adecuada con respecto al significado, uso y limitaciones de los índices y relaciones presentadas, se recomienda la lectura de Custodio y Llamas, 1976, p. 1024.

Para el cálculo de los índices hidroquímicos y las relaciones entre especies químicas, las concentraciones iónicas deben estar expresadas en epm.

$$\text{ICB} = \frac{\text{índice de desequilibrio}}{\text{entre cloruros y alcalinos}} = \frac{[\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)]}{\text{Cl}^-}$$

$$\text{ICBN} = \frac{\text{índice de desequilibrio}}{\text{entre cloruros y alcalinos}} = \frac{[\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)]}{(\text{SO}_4^{=} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-)}$$

El ICBN se suele utilizar cuando el ICB resulta negativo.

K/Na, Na/Ca, Mg/Ca, SO4/Cl, y Cl/HCO3: estas relaciones iónicas son directas; no exigen mayor explicación en cuanto a su cálculo.

$$\text{Kr} = [\text{Ca}^{++} (\text{HCO}_3^-)^2]^{1/3}$$

$$\text{Ky} = [\text{SO}_4^{=} * \text{Ca}^{++}]^{1/2}$$

DT: dureza total en unidades de ppm de CO_3Ca . Se calcula sumando las concentraciones de Ca^{++} y Mg^{++} (en epm) y convirtiendo el resultado a ppm de CO_3Ca .

TIPO: clasificación semicuantitativa basada en el valor calculado de dureza total de la muestra. La escala es la que sigue: (Custodio y Llamas, 1976, p. 212):

- DT ≤ 50 ppm de CO_3Ca : aguas blandas
- 50 < DT ≤ 100 ppm de CO_3Ca : aguas ligeramente duras
- 100 < DT ≤ 200 ppm de CO_3Ca : aguas moderadamente duras
- DT > 200 ppm de CO_3Ca : aguas muy duras

Disponibilidad del programa ANAQUIM

El programa aquí descrito se encuentra disponible para ser distribuido en forma gratuita. Se proveen los archivos ejecutables y ejemplos de entrada y salida de datos. Para ello, es necesario enviar a los autores de este trabajo un diskette de 5.25" o 3.5" DS-DD o DS-HD, preformateado.

SUGERENCIAS

Si bien el programa ANAQUIM está concebido como una ayuda para cubrir los requerimientos primarios más comunes de los estudios hidroquímicos, es posible imaginar mejoras o modificaciones de su estructura para ampliar su espectro de resolución y/o adaptarlo a necesidades más específicas. Por ejemplo, para contemplar

aqueellos casos en los cuales se trabaja con muestras de elevada concentración salina, convendría calcular las concentraciones molales de los iones para así incluir el efecto del cambio de densidad de las soluciones acuosas. Otra idea sería la de almacenar los valores calculados de las coordenadas del diagrama de Piper en un pequeño subarchivo que sirviera de información de entrada a un programa que, además de dibujar la ubicación de las muestras en dicho diagrama, efectuara el cálculo de mezclas de aguas de diverso origen (por ejemplo, Morris et al., 1983). Incluso resultaría interesante agregar una subrutina para convertir los valores calculados de fuerza iónica y actividades a temperaturas distintas a 25 °C.

Lo expuesto permite imaginar la existencia de un número considerable de formas de ampliar las posibilidades de aprovechamiento del programa que aquí se presenta, y que, en última instancia, sirve como ejemplo de las bondades de la aplicación de las técnicas informáticas al caso frecuentemente abordado de estudios de sistemas complejos caracterizado por múltiples variables.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anderberg, M.R. 1973. Cluster Analysis for Applications. Academic Press, New York, 359 p.
- Ashley, R.P. y J.W. Lloyd. 1978. An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. Journal of Hydrology, Vol. 39, pp. 355-364.
- Carrera, J., E. Usunoff y F. Szidarovszky. 1984. A method of optimal observation well design for groundwater management. Journal of Hydrology, Vol. 73, pp. 147-163.
- Custodio, E. y M. Llamas. 1976. Hidrología Subterránea, Vol. I. Edic. Omega, Barcelona, 1157 p.
- Dalton, M.G. y S.B. Upchurch. 1978. Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis. Ground Water, Vol. 16, Nº 4, pp. 228-233.
- Dutt, G. 1986. Comunicación personal; Department of Soils, Water, and Engineering, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.
- Greenacre, M. 1984. Theory and Applications of Correspondence Analysis. Academic Press, New York, 364 p.
- Harman, H. 1976. Modern Factor Analysis. University of Chicago Press, Chicago, 487 p.
- Morris, M., J. Berk, J. Krulik y Y. Eckstein. 1983. A computer program for a trilinear diagram plot and analysis of water mix-

ing systems. Ground Water, Vol. 21, Nº1, pp. 67-78.

Piper, A.M. 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 25, pp. 914-923.

Samper, J. y J. Carrera. 1990. Geostatística: Aplicaciones a la Hidrología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 484 p.

Usunoff, E. y A. Guzmán-Guzmán. 1989. Multivariate analysis in Hydrology: An example of the use of factor and correspondence analyses. Ground Water, Vol. 27, Nº 1, pp. 27-34.

SISTEPEN: UN PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA Y DE UN BALANCE HIDRICO SENCILLO

*M. Navarro Duymovich y *M. Morano

FUNDAMENTOS:

En el balance hidrológico de una cuenca la evapotranspiración es el segundo término en importancia después de la lluvia (Saxton et al., 1974). En áreas de llanuras o en cuencas de poca pendiente de la Provincia de Buenas Aires, las pérdidas por evapotranspiración alcanzan valores anuales medios superiores al 95% del agua precipitada sobre la región (Navarro Duymovich et al., 1992). Según Morton (1983), la evaluación y mejoramiento del manejo y planificación de los recursos hídricos ha sido impedido por la aparente determinación de los hidrólogos e ingenieros de ignorar el significado de la evapotranspiración areal en el modelado del ciclo hidrológico. Morton agrega, además, que esta determinación persiste a pesar de que se reconoce ampliamente que la evapotranspiración es una proporción mucho mayor de las lluvias que el agua que escurre superficial y subterráneamente.

Para la estimación de la evaporación real areal es necesario el conocimiento de la demanda potencial de la atmósfera, y bajo circunstancias de buena disponibilidad de humedad en el suelo, ésta puede ser directamente tomada como tal. La fórmula más difundida y aceptada para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia en todo el mundo es la propuesta por Penman en 1948. Doorenbos y Pruitt (1977) han elaborado una metodología para adaptar el algoritmo original a las distintas condiciones locales. Esto permitió la incorporación de las modificaciones necesarias para tener en cuenta la enorme influencia que tienen las condiciones meteorológicas locales sobre la determinación de la demanda potencial del medio ambiente.

El programa que se presenta, SISTEPEN, incorpora una serie de modificaciones en distintas partes de los algoritmos originales de Doorenbos y Pruitt (1977). Los cambios propuestos son los siguientes:

a- En el cálculo de la radiación global se modifica la obtención de la radiación teórica astronómica. Los cambios efectuados son la estimación de la constante solar, para lo cual se utiliza la ecuación propuesta por Hughes et al. (1977); en el cálculo del factor de excentricidad orbital (e) se efectuó el reemplazo por la ecuación de Kreith y Black (1980); y en el cálculo de la declinación del sol se utiliza la fórmula mejorada de Kleisling (1982).

En la estimación de la radiación global se emplea la misma fórmula de Angstrom (1923), pero los coeficientes se adaptan a la región según su régimen climático de acuerdo a lo propuesto por Frére y Popov (1980).

b- Las fórmulas para la estimación de la radiación neta utilizadas por Doorenbos y Pruitt (1977) fueron reemplazadas totalmente por la metodología propuesta por Weiss (1982), la cual resultó ser la mejor a partir de un test de comparación entre todos los métodos disponibles a esa fecha. Batchelor (1984), mediante el empleo de las diferentes fórmulas empíricas usadas para calcular la radiación neta y la función del viento en la ecuación de Penman-FAO, concluyó que se puede producir un 23% de diferencia en la estimación de la evapotranspiración anual del cultivo de referencia.

El coeficiente de reflexión adoptado varía, a diferencia del algoritmo de Doorenbos y Pruitt, según se estime la evaporación potencial de un pasto corto o de una alfalfa. La contrarradiación atmosférica se estima según lo presentado por Brutsaert (1975).

c- Para el cálculo de la tensión de vapor saturada se aplica la ecuación de Murray (1967) evitando así la utilización de tablas y afinando de esta manera la interpolación de valores.

d- La constante psicrométrica y la pendiente de la curva de saturación han sido programadas según las fórmulas utilizadas en el trabajo de Burman et al. (1983).

e- La función del viento para el pasto corto fue reemplazada por la propuesta por Thom y Oliver (1977) por poseer una mejor base física. Del mismo modo se procedió en el criterio de selección de la ecuación del viento para un cultivo de alfalfa, utilizándose en este caso la ecuación propuesta por Stigter (1980). Los parámetros Z_0 (longitud de rugosidad) y d (plano cero de desplazamiento) se calculan en función de la evolución de la altura del cultivo, de acuerdo con las relaciones propuestas por Monteith (1975).

f- El factor de ajuste c , que tiene en cuenta la influencia diferencial del viento diurno y nocturno sobre la evaporación, fue programado según la ecuación propuesta por Frevert et al. (1983), con las acotaciones hechas por Pruitt (1986 y 1989).

CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA SISTEPEN

Definición de operatividad

Este sistema integra la utilidad de crear archivos de datos de estaciones (con nombre de estación, altura de registro del viento y latitud correspondiente), y de procesar elementos climáticos (fórmula de PENMAN-FAO, con modificaciones algorítmicas).

El componente principal de este sistema es el programa PENMAN-FAO, el cual tiene como entrada los archivos de datos de las estaciones y las variables climáticas medidas en dichas estaciones.

Requerimientos de hardware

El programa ha sido escrito en BASIC y compilado con Quick-BASIC (versión 4.5) para su uso en microcomputadoras que soporten un sistema operativo MS-DOS versión 3.2 en adelante o similares, para PC, XT/AT o similares, con un mínimo de RAM de 256 K, para configuraciones con disco rígido o floopies, y con una pantalla Hércules o de mayor resolución.

Entrada de datos

El archivo de datos de estaciones se confecciona mediante la selección de una opción del mismo sistema, "Crear archivo de datos de estaciones", la cual proporciona toda la funcionalidad necesaria para manejar archivos de este tipo (altas, bajas, modificaciones y consultas). El archivo de los elementos climáticos se puede confeccionar con cualquier procesador de texto, planilla de cálculo (LOTUS, QPRO) o manejador de base de datos (DBASE) que permitan guardar los datos sin formato (en código ASCII). Los datos de entrada vienen en cada línea identificados por año, mes, día, (el dato día es día juliano, no calendario), temperatura máxima, temperatura mínima (expresadas en grados centígrados), humedad relativa máxima, humedad relativa mínima (en expresión decimal), velocidad del viento de día, velocidad del viento de noche (expresadas en km/día), presión (en mb), heliofanía relativa (expresada en forma decimal) o el valor de radiación global en unidades de $Mj/m^2/día$, lluvia (expresada en milímetros). Existe la opción de ingresar al programa archivos de datos previamente elaborados, en cuyo caso el programa pedirá los nombres de tales archivos para el posterior procesamiento de datos.

Con respecto a la humedad relativa mínima y máxima se pueden reemplazar ambas entradas por la humedad relativa media (Weiss, 1983).

Para la estimación de la radiación global el programa pregunta en primer lugar si la estación está ubicada en el hemisferio sur o en el norte para luego calcular la radiación teórica astronómica con el fin de seleccionar los coeficientes más adecuados para la fórmula de Black et al. (1954). Además, se interroga sobre las características climáticas del lugar de ubicación de la estación.

Salida de resultados

Los resultados pueden imprimirse o bien guardarse en archivos. Si se elige esta última opción, el programa pedirá que se le

ingrese el nombre del archivo en donde guardar los resultados. La salida por impresora se hace a 80 columnas (carro angosto).

Como salida se produce el listado de los cálculos hechos de la siguiente forma: año, mes, día, ETr (evapotranspiración del cultivo de referencia), Rn (radiación neta expresada en megajoules por m² y por día), Rnp (radiación neta expresada como la cantidad de milímetros de agua que puede evaporar esa energía), FU*AA (demanda atmosférica de vapor de agua), lluvia-ETr, y, además, sus medias y desviaciones típicas para períodos de 7, 15 y 30 días.

Disponibilidad del programa SISTEPEN

El programa aquí descripto se encuentra disponible para ser distribuido en forma gratuita. Se proveen los archivos ejecutables y ejemplos de entrada y salida de datos. Para ello, es necesario enviar a los autores de este trabajo un diskette de 5.25" o 3.5", DS-DD o DH-HD, preformateado. Este programa se actualizará constantemente de acuerdo con las mejoras que se reporten en la bibliografía sobre la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia por el método de Penman.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Angstrom, A. 1923. Report on actionometric investigations of solar and atmospheric radiation. Report of the International Meteorological Conference of Directors. Utrecht, Kon Neder. Met. Inst. 112, 75 p.
- Black, J.N., C.W. Bonython y J.A. Prescott 1954. Solar radiation and the duration of sunshine. Quart. jour. Roy. Met. Soc., Vol. 80, p. 231.
- Batchelor, C.H. 1984. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified Penman equation. Irrig. Sci. 5:223-233.
- Brutsaert, W. 1975. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. Water Resour. Res. 11:742-744.
- Burman, R.D., R.H. Cuenca y A. Weiss. 1983. Techniques for estimating irrigation water requirements. En: Advances in Irrigation, Vol. 2, Academic Press.
- Doorenbos, J. y W.O. Pruitt. 1980. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrig. Drain. Pap. 24, FAO, 144 p.
- Frère, M. y G.F. Popov. 1980. Pronósticos de cosechas basados en datos agrometeorológicos. FAO: Producción y Protección Vegetal.

- Frevert, D.K., R.W. Hill y B.C. Braaten. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficient. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng.
- Hughes, T., J.T. Mc Mullen, R. Morgan y R.D. Murray. 1977. On the optimum orientation of solar collectors. Energy Research 1:143-156.
- Kleisling, T.C. 1982. Calculation of length of day. Agr. Journal 74:758-759.
- Kreith, F. y W.Z. Black. 1980. Basic Heat Transfer. Harper and Row, New York.
- Monteith, J.L. 1975. Principles of Environmental Physics. Edit. Arnold, London.
- Morton, F.J. 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of Hydrology. Journal of Hydrology 66:1-76.
- Murray, F.W. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. Journal of Applied Meteorology 6:203-204.
- Navarro Duymovich, M.A., M. Varni e I. Entraigas. 1992. Convalidación del modelo de Morton para estimar la evapotranspiración real areal de la cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina. V Congreso Iberoamericano de Meteorología.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 193:120-146.
- Pruitt, W.O. 1986 Traditional methods. En: Evapotranspiration Research Priorities for the Next Decade. ASAE Paper Nº 86-2629.
- Pruitt, W.O. 1989. Comunicación personal.
- Saxton, K.E., H.P. Johnson y R.H. Shaw. 1974. Watershed evapotranspiration estimated by the combination method. Trans. ASAE 17(4):668-672.
- Stigter, C.J. 1980. Assessment of the quality of generalized wind function in Penman's equation. Journal of Hydrology 45:325-328.
- Thom, A.S. y H.R. Oliver. 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. Q. J. R. Met. Soc. 103:345-357.
- Weiss, A. 1982. An experimental study of net radiation, its components and prediction. Agro. Journal 74:871-874.
- Weiss, A. 1983. A quantitative approach to the Pruitt and Doorenbos version of the Penman equation. Irrig. Sci. 4:267-275.

ASPECTOS PRACTICOS DE EXPERIMENTOS CON COLUMNAS DE LABORATORIO

*E. Usunoff

RESUMEN

Debido a su sencillez operativa y su bajo costo en relación con el volumen de información obtenible, el uso en laboratorio de columnas artificialmente empacadas con los sedimentos de interés se ha convertido en una práctica común entre aquellos profesionales dedicados a estudios hidroquímicos, de impacto ambiental, de contaminación, de cinética de reacciones, de preservación y manejo de recursos hídricos, etc.

Dicha difusión, sin embargo, no asegura que al presente se conozcan todos los problemas que atañen a la construcción y uso idóneo de la técnica mencionada, algo fácilmente comprobable por aquellos que se deciden por su aplicación sin contar con experiencia previa. Este trabajo tiene por objetivos el describir los pasos principales a seguir y las precauciones a tomar en la construcción y empaque de dichas columnas, como así también de los tipos de ensayos a llevar a cabo inicialmente. Tal lo enuncia el título se trata de un material de uso práctico, en cuya elaboración se ha tratado de usar un lenguaje sencillo y claro para facilitar la lectura e interpretación por parte de aquellos con poca experiencia en el tema.

INTRODUCCION

En todo estudio de contaminación de recursos hídricos subterráneos, ya sea que el contaminante es de origen natural o ha sido artificialmente vertido, surge la necesidad de conocer de la manera más integral posible el tipo de mecanismos y parámetros que caracterizan el movimiento de los solutos en el acuífero. Sin esa información básica, es prácticamente imposible sugerir un plan adecuado de acción tendiente a solucionar el problema o, incluso, a definir espacial y temporalmente el grado de avance de un frente contaminante dado. Cualquiera sea la metodología de estudio del problema, el hidrogeólogo necesita disponer de datos fiables con respecto a las características dispersivas del sistema natural (coeficiente de dispersión, dispersividad), la cuantificación de la velocidad relativa del soluto en cuestión con respecto a la del agua subterránea (coeficiente de retardo), la posible presencia de adsorción y desorción (coeficientes de partición) y una cierta idea de los mecanismos que la producen, la evidencia de la existencia de fenómenos modificadores de primer or-

den (precipitación, disolución, intercambio), una idea acabada de la cinética de las diversas reacciones químicas en el sistema (constantes cinéticas), etc.

Desafortunadamente, sólo algunos de los fenómenos arriba mencionados pueden identificarse y cuantificarse a campo, y aún así los resultados no son por lo general confiables. Es en esas ocasiones que el profesional tiene necesariamente que apelar a los experimentos de laboratorio, en concreto al uso de columnas, con las cuales intentará reproducir el acuífero en cuestión a escala reducida. La literatura sobre el tema se encuentra plagada de ejemplos que demuestran claramente la eficiencia y bajo costo de esta técnica. Los resultados obtenidos son coherentes, consistentes con datos obtenidos de forma independiente, reproducibles y de una variedad y calidad sorprendente en lo que a valor informativo se refiere. Curiosamente, y a pesar de la existencia de tan profusa bibliografía al respecto, quien esto escribe ha encontrado muy pocos trabajos en los cuales se describa el proceso previo a la obtención de datos. Mi experiencia indica que la calidad de la información final y su interpretabilidad guardan una relación muy estrecha con la adecuada prosecución de esos pasos previos, y es por ello que en este trabajo se intentará brindar un panorama de aquellos aspectos a tener decididamente en cuenta antes de proceder a la ejecución de un experimento de columna. Se intentará brindar una serie de consejos útiles que, como mínimo, servirán para que el hidrogeólogo economice unas cuantas horas de trabajo y evite sinsabores.

CONSTRUCCION DE COLUMNAS

La Figura 1 presenta un esquema de los elementos constitutivos básicos de una columna de laboratorio, y en las siguientes explicaciones se harán continuas alusiones a dicha figura.

El primer punto a tratar es el referido al material de la columna, y en tal sentido se recomienda la utilización de vidrio (Pyrex o similar si se planean experimentos a altas temperaturas). Si el trazador a utilizar reacciona con el vidrio (por ejemplo F- o algunos fluorosilicatos), la siguiente opción es plexiglass, aunque este material tiene la característica de ser sumamente quebradizo y por ende requiere de cuidados e instrumentos especiales para su corte y perforación. En algunos casos puede usarse PVC. Se recomienda que, en cualquier caso, el material sea transparente para lograr un control visual adecuado del empaque de los sedimentos que contendrá.

El diámetro de la columna está en relación con el caudal que circulará y el empaque a lograr. Por ejemplo, en una columna de 8 cm de diámetro interior y con sedimentos de una porosidad efectiva media de 40% y en la que circulan 10 ml/min (10 cm³/min para densidad unitaria), la velocidad media del flujo será:

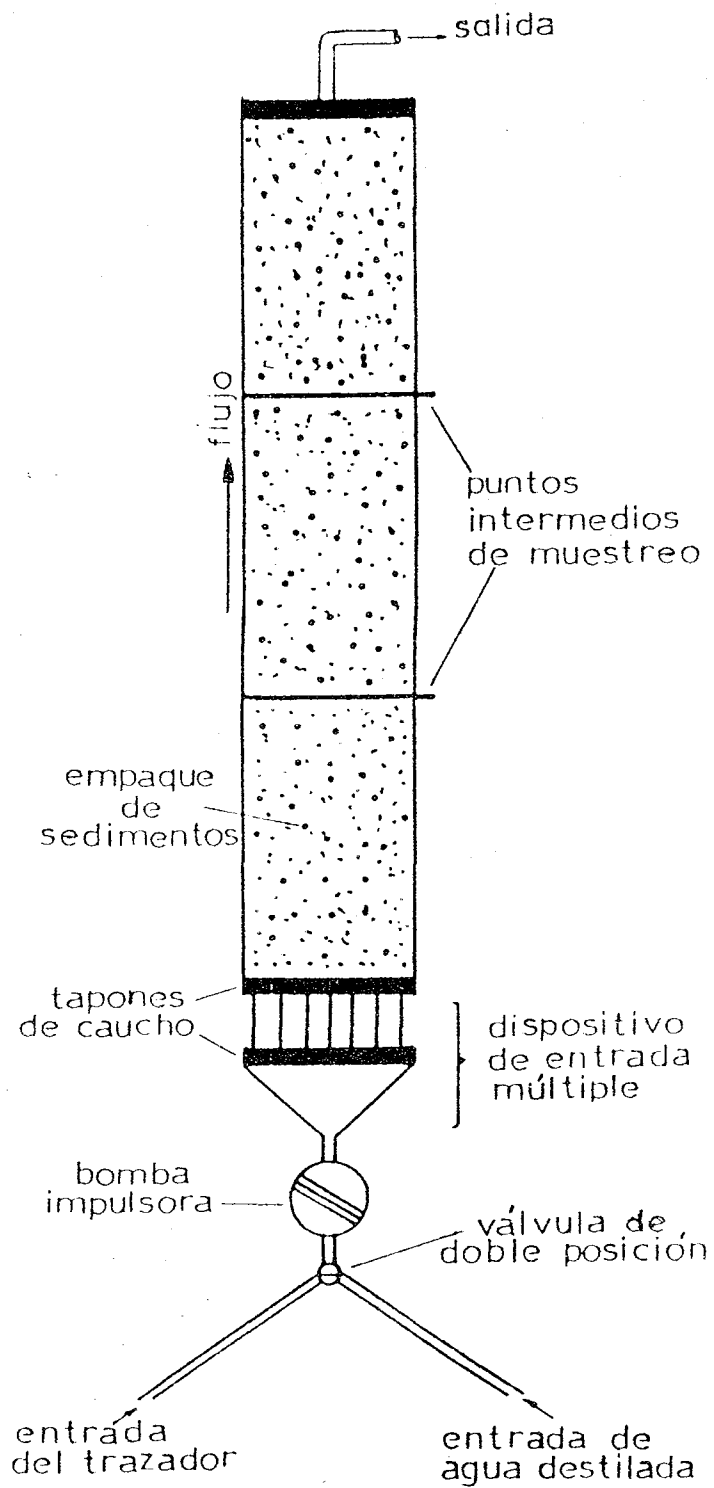


Figura 1. Elementos típicos de una columna de laboratorio.

$$v = Q/A\theta = 10/[\pi(8/2)^2(0.4)] \approx 0.497 \text{ cm/min} \approx 2614 \text{ m/año}$$

Si se considera que en acuíferos "reales" la velocidad media de flujo oscila (en promedio) entre 50 y 200 m/año, se verá que el valor obtenido en el cálculo es muy alto. En este caso, es conveniente utilizar una columna de diámetro mayor y, paralelamente, decidir la aplicación de caudales menores. No se recomiendan diámetros menores a 1.5 cm debido a los considerables fenómenos de frontera que podría experimentar el flujo dentro de la columna.

La longitud de la columna queda a elección del operador, y está en estricta relación con la cantidad de puntos intermedios de muestreo que se deseen. En los casos en que se tenga particular interés en muestrear el frente de avance del fluido a su paso por todos los puntos de muestreo, hay que tener en cuenta la dinámica del sistema. Explicado sencillamente, esto quiere decir que el ritmo de obtención de la muestra no debería ser mayor al 20% del caudal total circulante por el sistema, pues de otra manera existirían distorsiones importantes en el campo de flujo establecido. El objetivo es que el frente, aunque más lentamente, siga avanzando a medida que la muestra se obtiene (el caudal circulante es el caudal original menos el caudal de muestreo). En este caso, los puntos de muestreo deberán estar separados por una distancia tal que, cuando finalice el muestreo en un punto, el frente no haya llegado todavía al punto de muestreo situado aguas abajo.

Para la instalación de los puntos de muestreo, se procede en principio a perforar la columna a intervalos prefijados. Se inserta luego el tubo de muestreo (Figura 2), que puede ser de plástico rígido u otro material no colapsable de diámetro pequeño, y al cual se le han practicado numerosos orificios y se lo ha cubierto con alguna tela de trama fina que evita la entrada de sedimentos al tubo, rematado en un tapón delgado de caucho en el extremo que se apoya en la pared de la columna opuesta al orificio. El tubo debe atravesar todo el diámetro para así asegurar la obtención de una muestra representativa. Fuera de la columna, el tubo puede estar rematado con una junta tipo "T" de plástico rígido, la cual provee dos salidas de agua: una de ellas se utiliza para muestrear y la restante, con la adición de un tubo plástico de longitud adecuada, se usa para medir el potencial hidráulico en ese punto de la columna. Esta información permitirá evaluar la conductividad hidráulica de los tramos de la columna entre puntos de muestreo.

Lo que en la Figura 1 se señala como dispositivo de entrada múltiple puede, en principio, imaginarse como una precolumna de dimensiones tan pequeñas como sea posible. Consiste de una cámara por cuya parte inferior se produce la entrada del fluido (trazador u otro), el cual se desplaza hacia la parte superior a través de múltiples tubos conectados a la base de la columna. La necesidad de uso de este o similares dispositivos guarda relación con el adecuado cumplimiento de una de las hipótesis básicas de la

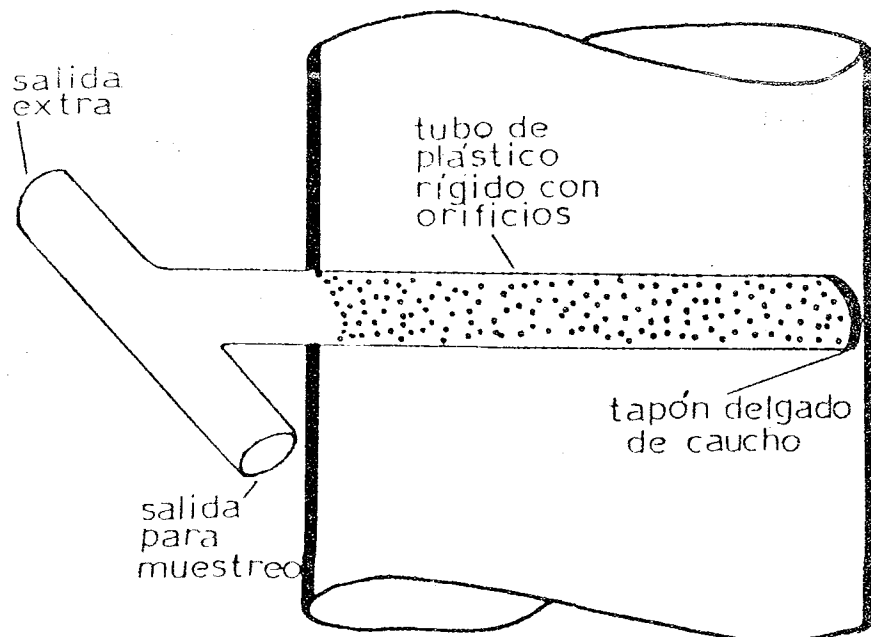


Figura 2. Instalación de tubos de muestreo.

teoría de dispersión: en la base de la columna, la onda de entrada del trazador debe ser cuadrada, es decir, de distribución lo más homogénea posible en el área efectiva de la columna, pues de otra manera se estarían introduciendo componentes de dispersión hidrodinámica que no son propias del sistema. Una vez construido dicho dispositivo (que, se insiste, debe ser tan pequeño como sea posible), se procede a su calibrado. Típicamente, al inicio de cualquier experimento con columnas se tiene agua destilada (o alguna solución reguladora o de limpieza) circulando en el sistema, y en un momento dado se cambia la posición de la válvula de paso de manera tal de cortar la entrada de agua destilada y permitir la circulación del trazador. Sin embargo, y dependiendo del caudal y de las dimensiones del dispositivo de entrada múltiple, pasa un cierto tiempo hasta que el trazador llega a la base de la columna (este es el verdadero $t=0$ del experimento). Ese tiempo de espera, que llamaremos t_e (tiempo efectivo de entrada), puede calcularse de dos maneras:

(1) puede hacerse la hipótesis que desde la válvula de doble posición hasta la base de la columna el flujo es de tipo pistón. En tal caso, suponiendo que el volumen de agua contenida en el dispositivo de entrada múltiple es V_d y que el caudal del ensayo es Q , el tiempo efectivo de entrada será: $t_e = V_d/Q$.

(2) si el dispositivo de entrada múltiple es de dimensiones considerables y/o el caudal del ensayo es bajo, la hipótesis de flujo pistón podría no ser correcta, en cuyo caso se aconseja la calibración previa del dispositivo. Para ello, se monta el siste-

ma tal como se muestra en la Figura 3. Nótese que lo que está por encima del tapón de caucho correspondiente a la base de la columna no es la columna en sí, sino un trozo cilíndrico de material semejante al que luego se utilizará, y que posee una abertura cerca de la base para permitir obtener las muestras necesarias en la calibración.

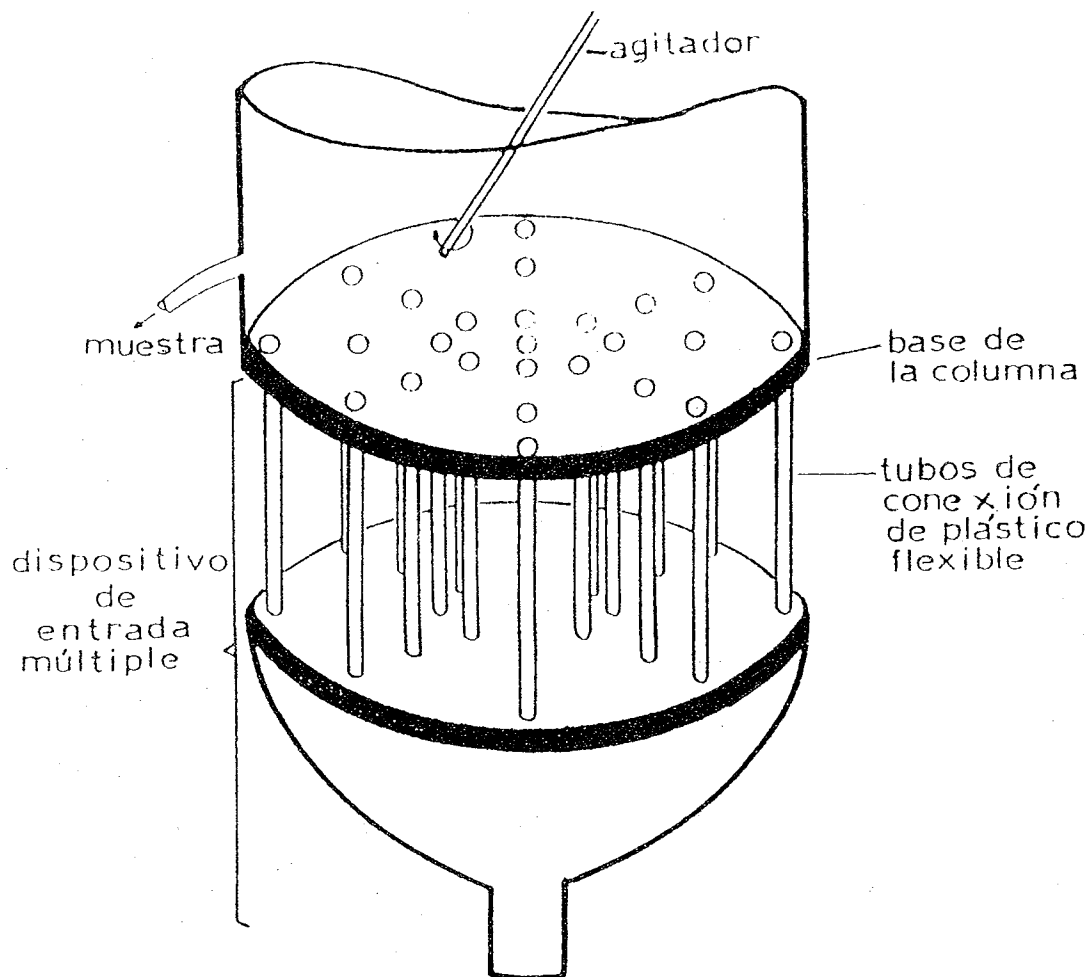


Figura 3. Calibración del dispositivo de entrada múltiple.

La calibración comprende dos aspectos:

(a) Test de homogeneidad de entrada: debido a la geometría particular de cada dispositivo de entrada múltiple y a la no validez estricta de la existencia de flujo pistón, a los que se suman los fenómenos de dispersión en el interior del dispositivo, el trazador inyectado tenderá a seleccionar vías preferenciales en su movimiento ascendente. Es necesario, por consiguiente, asegurarse que el trazador llega a la base de la columna a través de todos

los tubos de conexión al mismo tiempo. Ello se logra inyectando un colorante (a bajo caudal) y observando la disposición de los filetes preferenciales de flujo. Aquellos tubos que conduzcan el colorante más rápido deberán ser más largos que aquellos con dificultades de transporte. En resumen, variando individualmente la longitud (o incluso el diámetro) de los tubos de conexión de plástico se puede lograr la homogeneización enunciada.

(b) Test de tiempo de llegada: en su forma más simple, este test requiere del uso de un conductivímetro. Se hace circular agua destilada a un caudal prefijado, y luego de unos minutos se toma una muestra en la parte superior, con lo cual se obtiene una medida de la conductividad base (C_b). Cuando dicha medida es estable, se cambia la posición de la válvula en la parte inferior del dispositivo y se permite la entrada de un trazador químico. Se sugiere el empleo de una solución de algún electrolito fuerte con una concentración que asegure un contraste adecuado (por ejemplo, 1000 ppm de NaCl), de la cual se conoce su conductividad, a la que llamaremos conductividad máxima (C_m). A tiempos prefijados, se activa el agitador para asegurar la homogeneización del trazador que llega, y se toman muestras en la parte superior, sobre las cuales se mide la conductividad (C). Se continúa hasta que $C \approx C_m$. Si se grafican los valores obtenidos de C_r (concentración relativa) = $C - C_b / C_m - C_b$ versus tiempo, se obtiene una curva típicamente sigmoide. Se repite el test para diferentes caudales, tratando de cubrir el rango de descargas que posteriormente se usarán en los experimentos. Al cabo, se obtendrán una serie de curvas de C_r vs. tiempo para cada caudal seleccionado. Se lee sobre cada una de esas curvas el valor sobre el eje de tiempos (t_e) correspondiente a $C_r = 0.5$ (o $C_r = 0.9$ si se desea mayor seguridad de arribo del trazador), y se construye una nueva gráfica de Q (caudal) vs. t_e . Esta es la llamada curva de calibración del dispositivo de entrada múltiple que, para un dado caudal, permite obtener por simple lectura el valor del tiempo efectivo de llegada a la base de la columna, t_e (recordar que t_e es el $t=0$ del experimento).

EMPAQUE DE COLUMNAS

Una vez que el dispositivo de entrada múltiple ha sido calibrado y que se ha fijado el tapón de caucho definitivo en la base de la columna, se puede proceder al empaque de la misma. La regla básica al respecto es que la columna debe empacarse en medio saturado, pues es esa la única manera de evitar el entrampamiento de aire que posteriormente dificultaría la instauración de un campo homogéneo de flujo. Puesto que el empaque requiere de agua, se llevará la contabilidad del volumen utilizado en esta etapa para así contar con una idea previa de la porosidad efectiva y, por ende, del volumen poral. Previo a toda operación, es necesario conocer el volumen de la columna y de los distintos espacios "muertos" dentro de ella (tubos de muestreo, tapones de caucho). Más adelante se brinda un ejemplo de cálculo. Antes de comenzar, se re

comienda llenar con agua el dispositivo de entrada múltiple y los tubos de conexión, de manera tal que el nivel de agua quede exactamente en la base de la columna.

Desde la parte superior de la columna se vuelca agua destilada hasta que el nivel de la misma dentro de la columna se eleve unos 2 o 3 cm por encima de su base de caucho. Luego, y siempre desde arriba, se agrega cuidadosamente el sedimento teniendo siempre la precaución que el mismo no alcance una altura superior a la del nivel de agua dentro de la columna. Si el material es muy heterogéneo y se corre el riesgo de decantación diferencial, el sedimento puede volcarse a través de un tubo que llegue hasta el nivel de agua. Se repite el procedimiento hasta que la columna quede totalmente empacada. En ocasiones es conveniente introducir una varilla delgada de acero o un tubo de vidrio para eliminar las burbujas de aire que pudieran quedar atrapadas y para ayudar a la homogeneización del material dentro de la columna (a menos, por supuesto, que se esté empacando la columna con horizontes sedimentarios distintos). En otros casos, y con el objeto de facilitar el asentamiento de los sedimentos, puede procederse al pistoneo de la columna desde la parte superior, mediante un tapón de caucho de diámetro ligeramente menor al de la columna unido a una varilla que actúa de vástago. Hay quienes, incluso, recomiendan la vibración de la columna en reemplazo del pistoneo.

Lo que sigue es un ejemplo de cálculo de la porosidad efectiva:

Datos

Dimensiones de la columna: Longitud= 100 cm, Diámetro= 5 cm
Volumen de los tubos de muestreo: $V_t = 25 \text{ cm}^3$
Volumen "muerto" en la columna (porción de los tapones de caucho en la parte inferior y superior): $V_s = 90 \text{ cm}^3$
Volumen de agua agregado al empacar: $V_w = 700 \text{ cm}^3$

Cálculo

Volumen total de la columna: $V_c = \pi(5/2)^2 100 = 1963.50 \text{ cm}^3$
Volumen efectivo de la columna: $V_e = V_c - V_s = 1873.50 \text{ cm}^3$
Volumen de agua en el espacio poral: $V_m = V_w - V_t = 675 \text{ cm}^3$
Porosidad: $\theta = V_m / V_e = 675 / 1873.50 \approx 0.36 \implies 36 \%$

TESTS INICIALES DE EVALUACION DEL EMPAQUE

Una vez empacada la columna, debe procederse a su limpieza circulando un volumen abundante de agua destilada. Esta operación es equivalente a la del desarrollo de pozos de bombeo en el sentido que el resultado final será la "estabilización" del material contenido en la columna. Tal como se muestra en la Figura 1, el flujo circula de abajo hacia arriba, lo cual ayuda a eliminar las

burbujas que todavía podrían permanecer atrapadas en su interior.

Este esquema requiere de la utilización de una bomba impulsora, en lo posible de caudal regulable. Las bombas peristálticas, por su bajo costo y características, son las más recomendables.

La verificación del grado de limpieza de la columna puede efectuarse midiendo en la salida de la parte superior algún parámetro indicativo (turbidez o conductividad, por ejemplo). Llegado a este punto, la columna está lista para ser utilizada en los experimentos de interés, aunque se recomienda efectuar previamente un ensayo de dispersión. Para dicho test, se procede de manera similar a lo ya explicado para la calibración del dispositivo de entrada múltiple. Se elige un caudal adecuado, y se comienza a circular agua destilada hasta que las medidas de conductividad tomadas en la parte superior de la columna se estabilicen, con lo cual se determina C_b (conductividad base). Luego se ajusta la válvula de doble posición a fin de dar paso a una solución que contiene un trazador salino. Se recomienda contar con un volumen de solución de aproximadamente 3 o 4 volúmenes porales de la columna, y que contenga un electrolito fuerte de conductividad conocida C_m (conductividad máxima), cuya composición no afecte los posteriores experimentos en la columna. Puesto que ya se cuenta con la curva de calibración del dispositivo de entrada múltiple, se conoce (para el caudal seleccionado) el tiempo efectivo de entrada a la base de la columna, que será el $t=0$ del ensayo. A partir de allí, y a intervalos fijados por el operador, se toman medidas de la conductividad en la salida (C), y se calcula la concentración relativa $C_r = (C - C_b) / (C_m - C_b)$. Cuando las mediciones indican que $C \approx C_m$, se interrumpe el ensayo y se analizan los resultados.

La gráfica de los valores de C_r versus tiempo tendrá un aspecto similar a la mostrada en la Figura 4, y de ella se obtienen t^* (abajo definido) y dC_r/dt para $t^* = L/v$ (es decir, la pendiente de la curva de salida del trazador en el punto en que $C_r = 0.5$).

Definiendo:

L = longitud de la columna o punto de toma de muestra.

Q = descarga media en la columna.

A = área de la columna.

v = velocidad media del flujo.

θ = porosidad efectiva.

t^* = abscisa de tiempo correspondiente a $C_r = 0.5$.

D_l = coeficiente de dispersión longitudinal.

α_l = dispersividad longitudinal.

Se conocen L , Q , A , t^* y dC_r/dt , y el resto de los parámetros se calculan de la siguiente manera:

$$v = L/t^*$$

$$\theta = Q/vA$$

$$VP = \text{volumen poral} = \theta AL$$

$$D_l = [(v \cdot v / 2 dC_r/dt)^2] / \pi L$$

$$\alpha_l = D_l/v$$

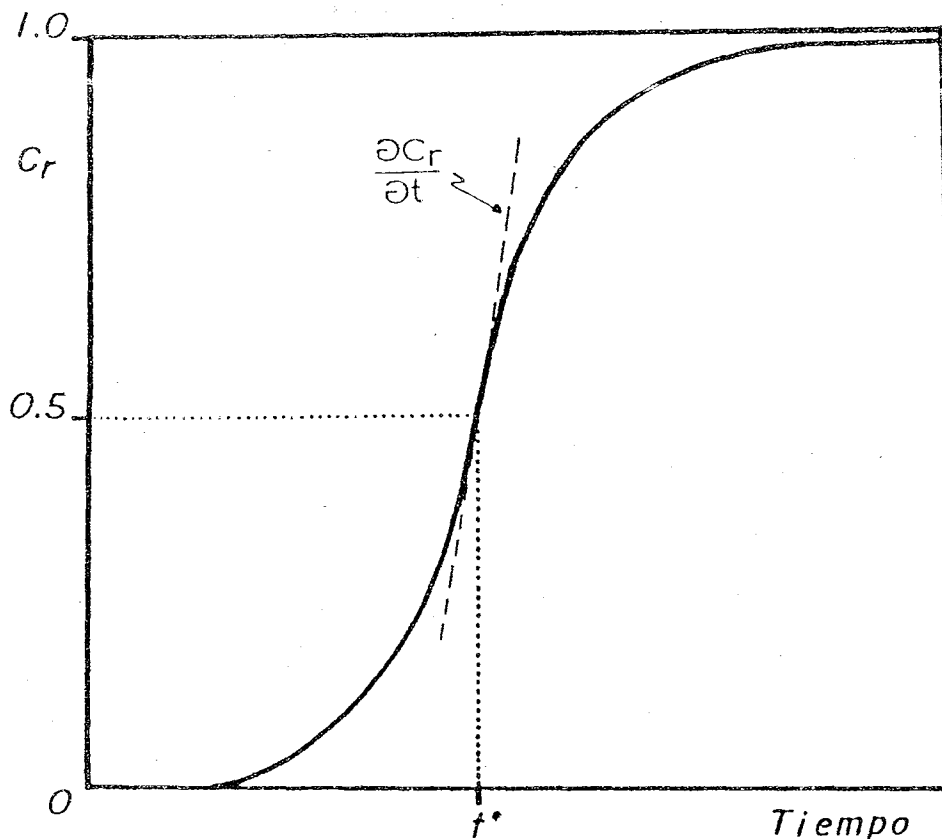


Figura 4. Ensayo de dispersión: curva de salida del trazador para el caso de inyección continua.

Se sabe que la magnitud del parámetro αl depende de la escala del experimento. En el caso de columnas de diámetro promedio, el valor de αl resulta por lo general uno o dos órdenes de magnitud mayor que el diámetro promedio (d_{50}) de la curva granulométrica de los sedimentos utilizados. Pueden existir excepciones a esta regla en los casos en que se utilicen materiales de alta capacidad de adsorción de solutos.

En estudios de adsorción-desorción se debe poseer información previa sobre el coeficiente de partición del soluto en el sedimento empleado antes de proceder con los experimentos de columna. Dicha información básica puede obtenerse mediante la ejecución de experimentos del tipo de los denominados "batch" en la literatura anglosajona. No se empleará aquí espacio para describir dichos tests pues existe una abundante literatura al respecto; baste decir que debido a su carácter estático (es decir que la solución en contacto con el sedimento no se renueva) se obtiene lo que podríamos denominar como coeficiente de partición máximo, que servirá para establecer el retardo máximo esperable en el movimiento del soluto en la columna. El conocimiento de dicho coe

ficiente de retardo máximo permitirá el establecimiento de una secuencia adecuada de muestreo, que es un dato vital para la inter-pretación de los resultados por su obvia relación con el grado de representatividad de las muestras así obtenidas.

Al comienzo de todo experimento de adsorción-desorción, existen dos interrogantes básicos:

- (1) ¿Existe adsorción del soluto bajo estudio en el sistema? Si es así, ¿cuál es el valor de los parámetros característicos?
- (2) ¿Qué mecanismos gobiernan la adsorción en el sistema y qué fenómenos pueden modificar la intensidad con la cual esos mecanismos actúan?

Es importante destacar que, a la luz del material presentado en los últimos años, los experimentos con columnas son la clave para obtener la respuesta de (1). En tal sentido, y una vez ejecutado el experimento correspondiente, se recomienda efectuar un análisis preliminar de los datos utilizando programas digitales de optimización y ajuste de parámetros. La respuesta a (2) no se obtiene directamente de los experimentos con columnas, aunque se puede asegurar que la adecuada ejecución del experimento proveerá claves importantes para decidir sobre el tipo de mecanismo operante.

Ya sobre el final, conviene hacer referencia a un aspecto generador de discusiones toda vez que se habla de columnas, tal es el del pH. Si se reconoce que una columna no es más que una representación simplificada y a escala reducida de un acuífero que no interacciona con la atmósfera (sistema cerrado), se deberá admitir que las mediciones de pH de las soluciones de entrada y salida tienen necesariamente que reflejar esa peculiaridad. Esto plantea un doble problema: el de la prepa-ración adecuada de las soluciones de entrada y el de la forma de medir el pH de salida, ambos en el contexto de una simulación adecuada de las condiciones en un sistema cerrado. El sistema no está en contacto con la atmósfera, y por ende la presión parcial de dióxido de carbono-principal regulador del pH en sistemas abiertos- no es ni constante ni de reservas ilimitadas. Para la preparación de las soluciones de entrada se sugiere lo siguiente: tómesese un volumen de agua suficiente como para preparar la solución con el trazador y caliénteselo hasta una temperatura de 80-90 °C (evítese llegar al punto de ebullición), lo cual garantiza la eliminación de casi todos los gases normalmente disueltos en el agua a 25 °C. Prepárese la solución con el agua a esa temperatura, teniendo la precaución de sellar herméticamente el recipiente una vez finalizada esta operación. Aquí hay que tener dos cuidados:

- (1) puesto que la densidad del agua es función directa de la temperatura, asegúrese de agregar el volumen adecuado de manera tal que, al enfriarse la solución hasta alcanzar la temperatura

de laboratorio, el volumen de agua sea el deseado.

(2) el recipiente donde se vierte el agua caliente y los productos químicos debe ser de material flexible, pues de otra manera colapsaría durante el enfriamiento de la solución o se crearían presiones negativas de cierta magnitud. Una manera efectiva de contrarrestar las presiones negativas es mediante la inyección de helio (u otro gas inerte) para lograr en todo momento una presión de una atmósfera en el interior del recipiente que contiene la solución.

Con respecto a la obtención de muestras de pH representativas de un sistema cerrado, la condición es evitar que la muestra entre en contacto con la atmósfera (el equilibrio de la muestra con el CO_2 de la atmósfera se logra rápidamente). Este problema puede evitarse mediante la utilización de un dispositivo sencillo: se elige una jeringa de volumen y diámetro adecuados y se toma la muestra por succión. Seguidamente, se retira el vástago de la jeringa y se introduce rápidamente un electrodo de medición de pH, sellando inmediatamente con papel de parafina el espacio libre entre el electrodo y la parte superior de la jeringa, lo que asegura que el tiempo de exposición de la muestra a la atmósfera sea mínimo.

Hay ocasiones en las cuales resulta imperativo contar con una solución de entrada de pH fijo, para lo cual pueden utilizarse soluciones reguladoras (buffer). En esos casos, sin embargo, conviene plantearse el efecto potencial que la introducción de sustancias extrañas tendría en el comportamiento químico del sistema. En caso de dudas al respecto, conviene sacrificar la constancia del pH y regular el mismo mediante la adición de bases o ácidos fuertes a la solución que contiene el trazador. En cualquier caso, conviene estar advertido que, salvo honrosas excepciones, el pH de salida diferirá del de entrada (a veces, de manera notable). Se acepta, en principio, que el pH de equilibrio del sistema es aquel que se alcanza dentro de la columna, y no el correspondiente a la solución de entrada. Por consiguiente, y antes de efectuar cualquier experimento, conviene hacer circular un volumen suficiente de agua destilada, de pH igual al de la solución con el trazador, y medir el pH en el punto de salida. Cuando dichas medidas se estabilizan puede recién comenzarse con el experimento.

COMENTARIO FINAL

Debido a la índole de este trabajo de difusión y a la forma en que ha sido estructurado, no es posible establecer conclusiones que resuman lo expuesto. Sin embargo, es esta una buena oportunidad para destacar el valor intrínseco de los experimentos con columnas de laboratorio. Son ensayos poco complicados y rápidos de ejecutar, se pueden repetir tantas veces como sea necesario, y

proveen un caudal de información difícilmente accesible por otros medios, y a un costo mínimo. Si bien en este trabajo se comentan varias de las causas y posibles soluciones a los problemas con los que el hidrólogo se enfrenta al planear experimentos con columnas, no por ello se considera que el capítulo está cerrado. En realidad, y en lo tocante a las posibles mejoras de este tipo de experimentos, el límite real está determinado por la creatividad personal e ingenio del operador.