

Algunas evidencias de explotación intensiva de los acuíferos en la Cuenca Alta del Río Bogotá, Colombia

F. Castrillón Muñoz⁽¹⁾ y R. Aravena⁽²⁾

(1) Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales, IDEAM, Diag 97 No 17-60, Bogotá, Colombia.
E-mail: francisco@ideam.gov.co

(2) Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canadá.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la investigación hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica de la cuenca alta del río Bogotá, Colombia. En ella se retomaron los principales elementos hidrogeológicos de estudios anteriores ya efectuados en la cuenca y se complementaron con elementos de hidrogeoquímica e isotopía reciente. Los modelos hidrogeoquímicos e isotópicos conceptuales fueron intervalidados y resultan coherentes con los datos hidrogeológicos. Los procesos hidrogeoquímicos a lo largo del flujo sugieren que el intercambio catiónico y la disolución de materia orgánica, con la consiguiente formación de metano y el aumento de COD, son los procesos más representativos a lo largo del flujo en el acuífero neógeno-cuaternario. Las edades del agua subterránea, la presencia de metano y COD en el acuífero Guadalupe y el aumento son indicativos de interacción entre los acuíferos. Adicionalmente, los cálculos de la recarga y su comparación con la descarga, las edades del agua en el acuífero y los descensos continuos en algunos sectores llevan a suponer que la explotación intensiva se estaría presentando en la cuenca alta del río Bogotá.

Palabras clave: agua subterránea, beneficios, desarrollo sostenible, gestión colectiva, impactos, uso intensivo

Some evidences of intensive exploitation in the Bogotá River Upper Basin, Colombia

ABSTRACT

Results from the hydrogeological, geochemical and isotopic studies from the Bogotá River Upper Basin are presented. Results from previous studies were complemented with new isotopic and hydrochemical data. The conceptual geochemical and isotopic models were intervalidated and are totally coherent with the hydrogeological conceptual model. The most significant hydrogeochemical processes in the quaternary aquifer have been identified to be cation exchange, organic matter dissolution, with the associated methane formation, and increase in DOC. The groundwater age, the presence of methane and the high DOC in the Guadalupe aquifer are an indication of aquifer interaction. The estimation of recharge, water balance, groundwater ages and continuous drawdown in several areas are an indication of intensive groundwater use in the Bogotá River Upper Basin.

Key words: benefits, collective management, groundwater, impacts, intensive use, sustainable development

Introducción

La Cuenca Alta del Río Bogotá es una cuenca intracordillerana de aproximadamente 4300 km² de superficie y está ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental de Colombia. Está definida por dos tipos de relieve, uno montañoso y otro plano. El primero constituye los límites de la Sabana de Bogotá a manera de cordones alargados de orientación SO-NE y varía entre los 2700 y los 4000 ms.n.m.; el segundo comprende la zona plana, denominada Sabana de Bogotá que oscila entre los 2450 y los 2600 ms.n.m. y que se extiende por 1400 km².

El área está ubicada entre las coordenadas UTM: N: 965.000 a 1.080.000 y E: 960.000 a 1.060.000 (Fig.

1). Está limitada al este por los Cerros Orientales, al sur, por la desembocadura del río Tunjuelo, el embalse del Muña, las poblaciones de Bojacá y Madrid. Al oeste por la población de Facatativá, el Cerro Loma Chica del Ocho, el Alto del Tablazo y al norte por el Páramo de Guerrero y las poblaciones de Chocontá y Villapinzón.

La población de la cuenca es con un total de 848.400 habitantes, más la ciudad capital de Colombia, Bogotá, con unos 6.500.000 habitantes (DANE, 1993). La agricultura es el principal uso de la tierra en la cuenca, y seguido por la ganadería.

La motivación del presente documento fue recoger elementos técnico-científicos que sirvan de base para identificar el estado de utilización del recurso

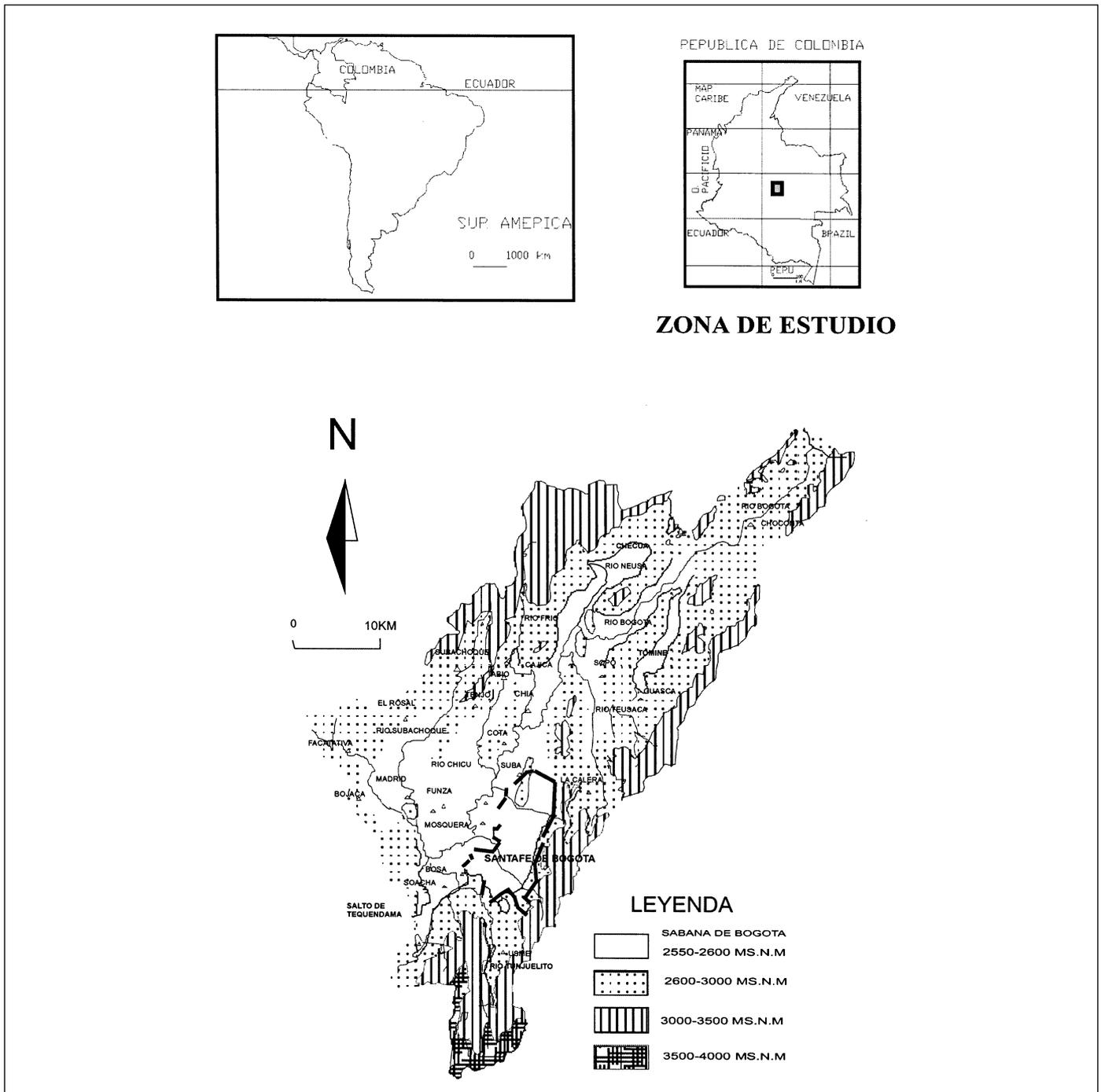


Fig. 1. Localización de la cuenca alta del río Bogotá, con indicación de la distribución altitudinal en la cuenca
 Fig. 1. Location of the upper basin of the Bogotá river, showing the topographic structure of the basin

hídrico subterráneo de la cuenca. Para ello se hizo necesario responder en forma específica a preguntas relacionadas con el balance hídrico en la cuenca, la ubicación de las zonas de recarga, y las posibles interacciones entre los acuíferos.

El Estudio hidrogeológico cuantitativo de la

Sabana de Bogotá, realizado por CAR e INGEOMINAS entre 1989 y 1993, se constituyó en el primer estudio hidrogeológico de toda la Cuenca Alta del Río Bogotá. Para su ejecución se dividió el área en 9 subcuencas superficiales en las cuales se realizó la cartografía geológica, sondeos geoelectrónicos, inventario de pun-

tos de agua, pozos, aljibes (pozos excavados someros) y manantiales, pruebas de bombeo en pozo único y con pozos de observación, muestreos para análisis físico-químicos y balances hidrológicos. Este estudio constituye la base de la información hidrogeológica que aquí se presenta.

Aspectos generales de la cuenca

Geomorfología y clima

La cuenca se compone de una morfología montañosa y otra morfología plana y de terrazas que en conjunto se extienden por aproximadamente 4300 km².

La geomorfología está compuesta por cerros elongados en dirección noreste-suroeste, con pendientes que generalmente sobrepasan los 40 grados. Hacia los piedemontes de éstos se presentan las geoformas de abanicos aluviales y depósitos de gravedad. La geomorfología plana la integran diferentes niveles de terrazas aluviales y los depósitos de llanura de inundación, generadas por los ríos actuales y los depósitos de origen fluvio-glaciar y lacustre.

La temperatura promedio anual de los cerros oscila alrededor 10°C y en los valles y en la zona plana fluctúa en torno a los 14°C. La precipitación en la cuenca se distribuye en forma bimodal, con un máximo en el mes de abril y otro en el mes de octubre y dos mínimos, uno en el mes de julio y otro en el mes de enero, asociadas a la zona de convergencia intertropical. Las lluvias procedentes de Los Llanos son unimodales y tienen un máximo entre los meses de junio y julio (Claro, 1995). El promedio anual de lluvia en la estación del Aeropuerto "El Dorado" (zona plana) para una serie de 18 años es de 800 mm y en las laderas más húmedas está por encima de 1500 mm/año.

Marco estructural e hidrogeológico regional

En la cuenca confluyen diferentes direcciones de esfuerzos, principalmente desde el oeste y suroeste, que produjeron una serie de bloques hundidos y levantados limitados por fallas de cabalgamiento, de desgarré y gravitacional que constituyen las fosas de acumulación de los sedimentos cuaternarios. Aunque estas fallas han actuado desde el cretácico, alcanzaron su máxima expresión en el Paleoceno. La forma de la cuenca y el espesor de los sedimentos neógenos y cuaternarios se observa en la Fig. 2.

A lo largo de los valles longitudinales de los ríos Subachoque, Chicú y Bogotá se observan espesores

en los sedimentos cuaternarios que fluctúan entre 100 y 400 m.

Entre las fallas de Madrid y Mosquera se presenta un adelgazamiento en el espesor de los sedimentos que podría estar asociado con el fallamiento que levantó una cuña del grupo Guadalupe en dirección norte-sur. Posiblemente el mismo mecanismo causó el levantamiento de las otras cuñas que afloran en la parte plana de la Sabana, tal como la de los cerros de Suba. El sector comprendido entre estas dos fallas se reconoce en el presente estudio como sector del centro.

A escala de toda la cuenca alta el máximo espesor de sedimentos cuaternarios, que es <600 m, aparece entre las poblaciones de Funza (pozos Funza I y Funza II, de Van der Hammen, 1995) y Engativá, en el centro de la Sabana. Los espesores tienden a disminuir débilmente hacia los bordes y los valles interiores de la cuenca, ya que las fallas de alto ángulo generan al parecer cortes verticales en las rocas encajantes, como se observa en el corte transversal de la Fig. 2.

Hidroestratigrafía

La geología de la cuenca presenta un marco extremadamente complicado. Las principales unidades geológicas de carácter regional están representadas por el Grupo Guadalupe, compuesto por areniscas y limolitas consolidadas y localmente fracturadas de edad cretácica; las formaciones paleógenas Guaduas, Bogotá, Cacho, Regadera y Usme, de composición arcillosa y arenosa, y los sedimentos fluvio-glaciares y lacustres que componen el relleno cuaternario.

Los fenómenos tectónicos de tipo compresivo han generado los principales rasgos estructurales de la Sabana, dando como resultado dos aspectos principales: el intenso plegamiento de las series de depósitos pre-cuaternarios y el hundimiento de las fosas que favorecieron la acumulación del relleno fluvio lacustre cuaternario. La estructura resultante condiciona la geometría y disposición de los distintos acuíferos.

Complejo acuífero neógeno-cuaternario

Debido a su extensión y espesor tradicionalmente se ha considerado que el acuífero principal de la cuenca está compuesto por los sedimentos fluvio-lacustres del neógeno-cuaternario. Sin embargo las características texturales y geométricas de la mayor parte de estos depósitos hacen dudar, a priori, de su funcionamiento como acuíferos. La Formación Sabana podría

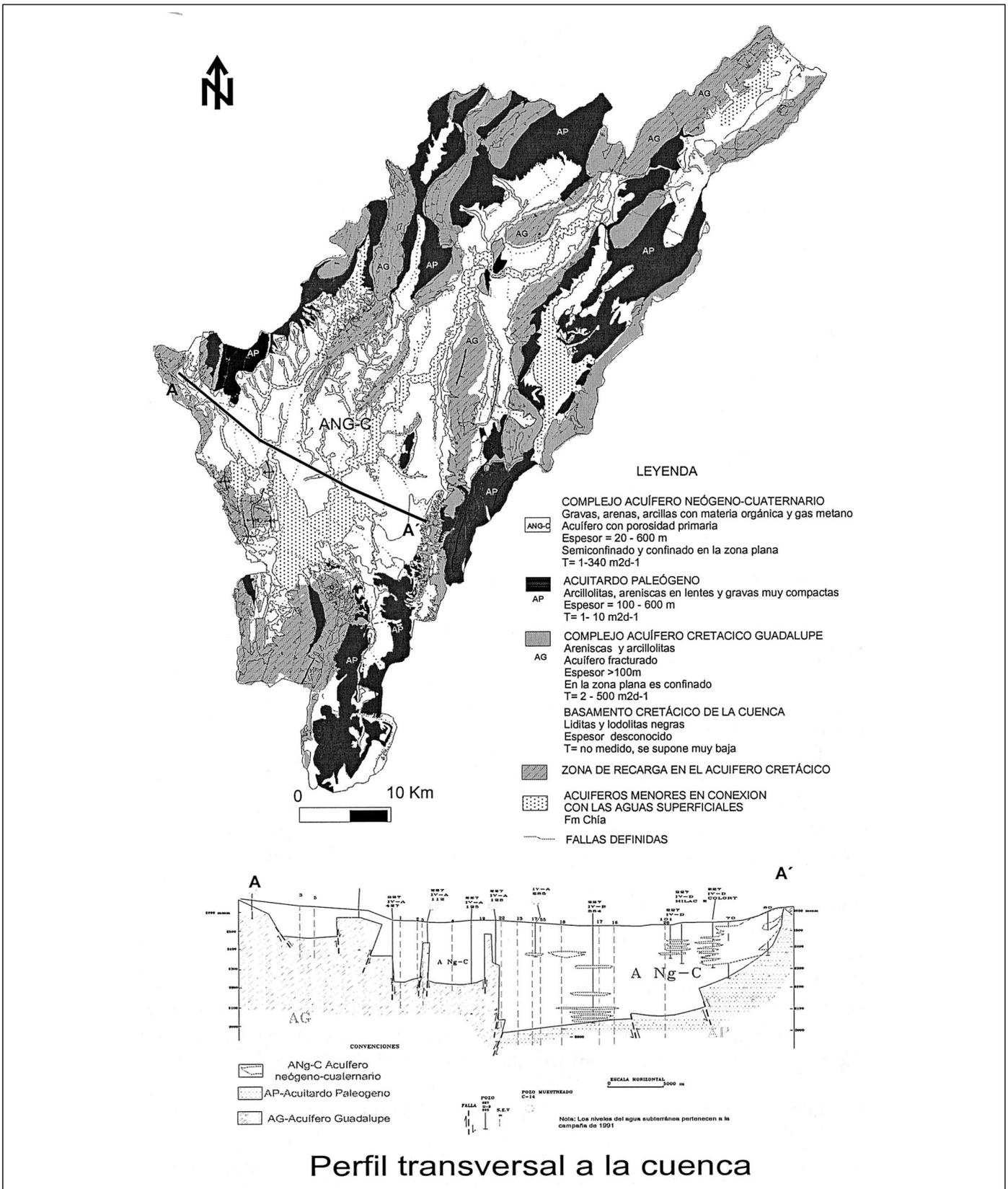


Fig. 2. Mapa hidrogeológico simplificado de la cuenca y corte transversal modificado de INGEOMINAS (2000)
Fig. 2. Simplified hydrogeologic map of the basin and cross-section, modified after INGEOMINAS (2000)

perfectamente ser considerada como un acuitardo, y los sedimentos infrayacentes de las Formaciones Subachoque y Tilatá, así como los depósitos gruesos de la Formación Tunjuelito, podrían ser considerados como acuíferos. Sin embargo, a la luz de los datos hidrogeológicos existentes, no es posible la diferenciación de estas unidades y en la práctica se considera que existe un Complejo Acuífero Neógeno-Cuaternario, como ya ha sido considerado por De Bermoudez y Quiroz (2000).

El acuífero neógeno-cuaternario tiene sus límites laterales en los piedemontes, los cuales forman parte del mismo. Por su base limita con el acuífero Guadalupe o con el acuitardo paleógeno; al sur de la cuenca limita con el acuífero Guadalupe. En condiciones naturales el acuífero Guadalupe recarga al neógeno-cuaternario, pero localmente (cerros de Suba, al N de Bogotá DC; área de Madrid, al SO de la Sabana; margen izquierda del valle de Chicú) los bombeos en el cretácico invierten el gradiente hidráulico entre ambos acuíferos. Su relación con el acuitardo paleógeno es poco conocida por la ausencia de pozos.

El acuífero presenta en su parte superior la Formación Chía, la cual se compone de los depósitos de arcillas y limos y, constituye las llanuras de los ríos principales que drenan la cuenca. Muchas veces se le considera parte del Neógeno-Cuaternario.

Acuífero Guadalupe

El segundo acuífero en importancia está compuesto por las rocas fracturadas del Grupo Guadalupe. El fracturamiento podría conectar las distintas unidades de este Grupo, lo cual hace difícil su diferenciación en profundidad.

El acuífero se ha considerado de la misma forma que en el estudio de INGEOMINAS (1993) y en De Bermoudez y Quiroz (2000), quienes le denominan Complejo Acuífero por ser una unidad constituida por las tres formaciones geológicas que conforman el Grupo que lleva su mismo nombre. Frecuentemente se le denomina simplemente acuífero cretácico.

Los límites del acuífero serían: en superficie, la divisoria de aguas superficiales o límite exterior de la Cuenca Alta del Río Bogotá; por la base la Formación Chipaque, y por el techo el Complejo acuitardo Paleógeno y el Complejo acuífero neógeno-cuaternario.

En este acuífero el flujo se efectúa principalmente a través de fracturas (Molano, 1988). La fragmentación del acuífero parece darle carácter de funcionamiento en bloques separados y/o en forma de cuencas hidrológicas más o menos independientes y con

características propias (TNO, 1975), las cuales podrían estar eventualmente conectadas entre sí. Ello hace más difícil la caracterización regional del acuífero.

El acuífero Guadalupe parece estar en conexión hidráulica con el acuífero neógeno-cuaternario en los piedemontes, y también por su techo allí donde el Guadalupe no está recubierto por el acuitardo paleógeno. Esta sería la situación hacia el sur del valle del río Subachoque, en el Sector del Centro, hacia el valle de Muña y posiblemente en el valle de Chicú.

Acuíferos menores: Formación Chía

Los depósitos aluviales superficiales, principalmente la Formación Chía (que alcanza hasta 3 m de espesor, Van Hammen, 1995), y los depósitos de pendiente (abanicos aluviales, principalmente) constituyen acuíferos menores. Podrían estar conectados hidráulicamente a los cursos de agua superficial y ser recargados por éstos además de por la precipitación, y quizá lateralmente por transferencia desde las partes altas del Acuífero Guadalupe.

Unidades no acuíferas regionales: Complejo acuitardo del Paleógeno

Debido al alto grado de consolidación y a la granulometría entre fina y muy fina, se puede considerar como unidades no acuíferas regionales a la Formación Chipaque (Cretácico). De las unidades del Paleógeno, por su alto grado de compactación, posición estratigráfica y topográfica, las Formaciones Guaduas, Bogotá, Regadera y Usme presentan condiciones muy pobres como acuíferos en comparación con el Grupo Guadalupe y el Neógeno-Cuaternario. Aunque localmente, y principalmente al norte de la cuenca, las areniscas y gravas de la Formación Cacho podrían constituir un acuífero, su extensión está limitada a los bordes de algunos sinclinales y su continuidad en profundidad se desconoce.

Esta unidad fue denominada por De Bermoudez y Quiroz (2000) como Complejo relativamente impermeable del Paleógeno.

Basamento de la cuenca

Allí donde los sondeos han atravesado las formaciones neógeno-cuaternarias y las del grupo Guadalupe, el basamento está formado por la Formación Chipaque.

Parámetros hidráulicos de los acuíferos

La información sobre las propiedades hidráulicas de los acuíferos se recopiló en INGEOMINAS en 1999. Los valores de la transmisividad del acuífero neógeno-cuaternario, en 20 pruebas con pozo de observación en el acuífero, están entre 2 y 340 m²/d, pero los valores más frecuentes están entre 10 y 50 m²/d. El coeficiente de almacenamiento en la mayoría de los pozos en este acuífero oscila entre $1 \cdot 10^{-2}$ y $7 \cdot 10^{-7}$ y los valores más frecuentes están entre $1 \cdot 10^{-4}$ y $1 \cdot 10^{-5}$, lo cual corresponde al esquema de un acuífero confinado. Álvarez (1998) reporta coeficientes de almacenamiento de $5.6 \cdot 10^{-4}$ y $2.2 \cdot 10^{-3}$ en 2 pruebas de 24 horas de duración con piezómetros de observación en la Formación Tilatá, en el valle de Subachoque.

En 43 pruebas con pozo de observación, la transmisividad del acuífero Guadalupe oscila entre 5 y 536 m²/d. De la distribución espacial de las pruebas se observa que pozos que están muy cerca entre sí y sobre un mismo tren de fallas presentan valores de transmisividad que difieren hasta 2 órdenes de magnitud, lo cual indica la dificultad de parametrizar el acuífero. Los coeficientes de almacenamiento del acuífero Guadalupe oscilan entre $1 \cdot 10^{-2}$ y $9 \cdot 10^{-7}$, pero los valores más frecuentes están entre $1 \cdot 10^{-4}$ y $1 \cdot 10^{-5}$. Molano (1988) estimó coeficientes de almacenamiento del orden de $5 \cdot 10^{-4}$ en pruebas realizadas en el sector del centro en cercanía a la población de Madrid (Cundinamarca).

Esquema regional de flujo del agua subterránea

El esquema de flujo de agua subterránea se basa en la información de Diezemann (1951); una campaña realizada por INGEOMINAS-CAR en 1991 (INGEOMINAS-CAR, 1993) y una campaña por la CAR (2000). Las dos últimas cubren toda la cuenca mientras que la primera cubre la zona de Bogotá DC. Diezemann (1951) observó pozos surgentes en ambos acuíferos, principalmente en el entorno de la ciudad de Bogotá; observó también una surgencia de hasta 2 m en el acuífero neógeno-cuaternario en la zona plana, que según estudios posteriores (TNO, 1975) es generada por la presencia de gas metano.

Diezemann también observó pozos surgentes en el acuífero Guadalupe, en concreto una surgencia de 3 m en el pozo Los Lagartos, entre los cerros de Suba y los Cerros Orientales, y en el piedemonte, en el sector de Usaquén. Asimismo TNO (1975) reporta que el pozo de Madrid que capta el acuífero Guadalupe era surgente en esta época, pero no reporta su magnitud.

Las campañas de mediciones de niveles más

recientes están basadas en pozos de extracción, de los cuales se desconoce su funcionamiento y sus características técnicas (profundidad y tramos filtran-tes). En teoría sí se conoce la unidad acuífera en la que están, la cual se tomó del inventario del proyecto INGEOMINAS-CAR (1993), si bien su fiabilidad es moderada.

La interpretación de la piezometría del año 1991 para el acuífero neógeno-cuaternario en la cuenca se observa que los niveles más altos están alrededor de 2590 ms.n.m.; desde los piedemontes descienden generalmente en dirección sur y en forma concéntrica hacia la parte central de la Sabana, donde alcanzan hasta 2512 ms.n.m. De las direcciones de flujo observadas en las interpretaciones piezométricas se puede deducir que los cerros son las zonas de recarga del acuífero neógeno-cuaternario.

En el acuífero Guadalupe las líneas piezométricas representativas de la situación en 1991 muestran que el acuífero es captado principalmente hacia las márgenes internas de la cuenca, esto es donde el acuífero es más somero o aflora y está fracturado. En los sectores donde se trazaron isolíneas de piezometría se observa que la tendencia del flujo va desde los cerros hacia la parte plana de la cuenca. Al sur del valle de Subachoque, donde el acuífero es continuo en una buena extensión bajo el neógeno-cuaternario, se observa un cono de depresión que alcanza una cota mínima de 2484 ms.n.m. y están reflejando las extracciones de esta parte de la cuenca.

En diciembre 2000 (época seca) la CAR realizó mediciones de niveles en los acuíferos neógeno-cuaternario y Guadalupe. Esta campaña está basada en la red de monitoreo propuesta por Lobo-Guerrero, Compañía Ltda. en 1998. La información disponible para la elaboración de las piezometrías no cuenta con las características técnicas de los sondeos y se conoce sólo la atribución del acuífero captado realizada por CAR. Esto significa que pueden existir pozos cuyos niveles representen mezclas entre los dos acuíferos. Para su representación se ha separado la información de los dos acuíferos.

Zonas de mayor descenso en la cuenca

Las observaciones que siguen (Fig. 3) podrían ser sólo un efecto aparente derivado del hecho de que todas las piezometrías representan la situación dinámica en las áreas donde hay extracciones; también reflejan que los pozos presentan una cercanía excesiva entre ellos y ausencia de racionalidad en las concesiones. Esto es principalmente en el centro de los valles:

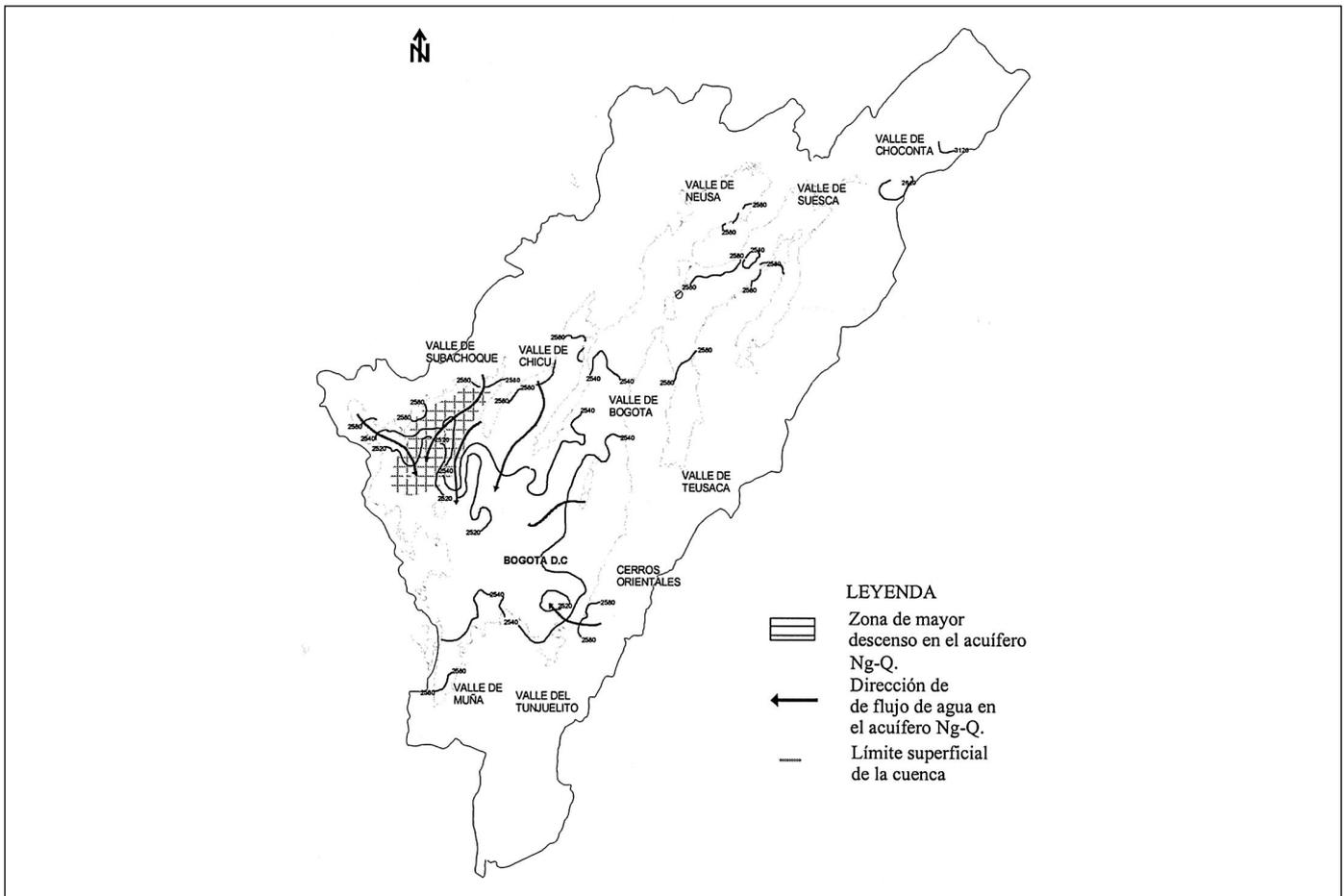


Fig. 3. Piezometría del acuífero neógeno-cuaternario y localización de la zona de mayor descenso en los acuíferos de la cuenca alta del río Bogotá en 1992. Datos tomados de INGEMINAS-CAR (1993)

Fig. 3. Piezometry of the Neogen-Cuaternary aquifer and location of the highest drawdowns in the aquifers of the upper basin of the Bogotá river in 1992. Data after INGEMINAS-CAR (1993)

- En el acuífero neógeno-cuaternario se observa que en relación a la piezometría de 1991 los niveles del 2000 presentan un descenso general en el valle de Subachoque. La isopieza de 2480 ms.n.m., que en la piezometría de 1991 no se detectó, en el 2000 empieza a insinuarse en el centro del valle. En el valle de Chicú la isopieza de 2520 ms.n.m. avanza hacia la salida del valle de Chicú, mientras que en el interior del valle los niveles parecen ser estables en relación a lo observado en 1991. En este sector es donde se ha detectado una zona de mayor descenso, alcanzando hasta 60m.
- La piezometría del acuífero Guadalupe de diciembre del año 2000 está limitada al suroeste de la cuenca y sector central; se observan descensos generales de hasta 20 m en relación con los niveles de 1991. La isolínea de 2480 ms.n.m. parece estar ocupando la parte central y la isolínea 2520

ms.n.m. se ve desplazada hacia los piedemontes, es decir que el cono de bombeo se ha ampliado en esta parte de la cuenca.

Balance hidrogeológico

En la cuenca se han desarrollado hasta la fecha varios balances hídricos. En estos se han tenido en cuenta aspectos hidroclimatológicos, edafológicos, e hidrogeológicos. Estos balances han surgido de diversas motivaciones, pero principalmente todas tienden a evaluar a capacidad potencial de explotación de agua del sistema.

El balance más completo ha sido efectuado dentro del marco del estudio cuantitativo de la Sabana de Bogotá, cuyo objetivo era el de cuantificar la disponibilidad y demanda de agua subterránea.

Demanda de agua subterránea y oferta de agua en la cuenca

La descarga actual del sistema se efectúa principalmente por los pozos que drenan la cuenca. Aunque también existen manantiales, estos están principalmente localizados en cotas elevadas. Aún se observan manantiales en las zonas de falla y en los contactos de las dos unidades acuíferas principales, Guadalupe y neógeno-cuaternario, y también entre el Guadalupe y el acuitardo paleógeno, como se ha dicho antes.

El inventario cuyos resultados aquí se presentan no ha sido actualizado hasta la fecha y se basa en los datos recopilados entre 1989 y 1992 por el INGEOMINAS. El inventario realizado arrojó un total de 5258 puntos de agua, incluidos pozos, aljibes (pozos someros excavados a mano) y manantiales. Con estos se calculó que la descarga sólo por explotación de pozos ascendía a 39,4 hm³/a.

La descarga natural del sistema se puede clasificar en "externa" e "interna". La descarga externa tiene lugar hacia el exterior de la cuenca hidrográfica. La descarga interna se localiza en los contactos entre el acuífero Guadalupe y el acuitardo paleógeno, y/o en las intersecciones de las fallas con los depósitos de piedemonte. En estos sectores se localizan manantiales, algunos de ellos termales, lo cual implica que puede existir una mezcla de aguas de flujos profundos con otros más someros.

En el cálculo de la recarga a los acuíferos de la cuenca se considera que las áreas con mayor potencialidad podrían estar localizadas en los afloramientos del Complejo acuífero de Guadalupe que forman los cerros principales. En estos sectores el acuífero Guadalupe recibiría recarga directa de la precipitación y el flujo de agua se efectuaría principalmente a través de las fracturas y fallas del acuífero.

Una segunda zona de recarga está localizada en los piedemontes, por encima de la cota 2600 ms.n.m. El agua recargada en los piedemontes se transferiría localmente a los acuíferos Guadalupe y/o neógeno-cuaternario.

La recarga principal del acuífero neógeno-cuaternario tendría lugar por transferencia lateral de agua desde el acuífero Guadalupe. También se recarga en los piedemontes y en los afloramientos de las formaciones Tiltatá y Subachoque, formadas por depósitos fluvio-glaciares groseros. Potencialmente también puede recargarse por transferencia directa desde los aluviales reciente Formación Chía, suprayacente y por infiltración de la lluvia en el resto de su afloramiento.

La cuantificación de la recarga en los diferentes acuíferos según INGEOMINAS, comparada con la descarga por pozos en el período 1989-1992, se presenta en la tabla 1.

Aunque no se tienen cifras sobre la explotación actual, se observa que la explotación era más intensa en el acuífero Neógeno-Cuaternario, y de acuerdo con los niveles piezométricos de este período se podría inferir que está localizada en el valle de Subachoque.

Hidrogeoquímica e isótopos ambientales

Con el fin de establecer los procesos dominantes en la hidrogeoquímica de la cuenca, plantear hipótesis sobre la localización de las zonas de recarga de los acuíferos y las posibles interacciones entre estos, se realizó un muestreo basado en una red de 95 pozos de bombeo, manantiales y pozos someros o aljibes.

Los análisis de alcalinidad, conductividad, temperatura y pH se efectuaron en campo y en el laboratorio de química ambiental de INGEOMINAS, se efectuaron los análisis fisicoquímicos complementarios de iones mayoritarios según Cleseri *et al.* (1999).

Grupos de aguas

Los diagramas de Piper (Figs. 4a y b) muestran que en los pozos del acuífero Guadalupe existen dos gru-

	Acuífero Neógeno Cuaternario	Acuífero Guadalupe	Otras unidades	Total
Descarga (hm ³ /a)	23,9	10,9	4,3	39,1
Recarga (hm ³ /a)	22,8	29,1	30,7	92,6
Diferencia	-1,1	18,1	26,1	

Tabla 1. Balance hídrico de los acuíferos en la cuenca según INGEOMINAS (1995)
 Tabla 1. Water balance of the aquifers in the upper basin after INGEOMINAS (1995)

pos de aguas: un primer grupo de aguas de tipo $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ en los piedemontes y un segundo de tipo $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ en los pozos profundos con sedimentos cuaternarios suprayacentes. El acuífero neógeno-cuaternario, por su parte, presenta una distribución similar de estos tipos de aguas: en los piedemontes son del tipo $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ y en los depósitos cuaternarios lacustres, hacia el centro de la cuenca, son de tipo $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$. Adicionalmente se observa un tercer grupo de tipo $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ en este acuífero, representado por un número limitado de pozos con tramos de filtros someros.

A continuación se describirán dos perfiles hidrogeoquímicos representativos de los procesos que ocurren en los acuíferos de la cuenca. Están ubicados en una de las zonas con mayor explotación de aguas subterráneas.

Perfil hidrogeoquímico de Valle del río Subachoque

Este perfil se inicia en el manantial 6G, que descarga agua del acuífero Guadalupe, y se continúa en los tres pozos localizados aguas abajo sobre una trayectoria de flujo regional en el acuífero neógeno-cuaternario. Los procesos hidrogeoquímicos más importantes están representados por el incremento de los iones bicarbonato y sodio, que alcanzan hasta $3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, de carbono orgánico disuelto (COD), así como por la presencia de metano (CH_4). El ión Ca^{2+} aumenta a lo largo del perfil en una menor proporción ya que alcanza hasta $0.18 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, mientras que el ión Mg^{2+} y el Cl^- disminuyen y aumentan sin ninguna tendencia explicable en forma sencilla, finalmente los iones Fe , NO_3^- y SO_4^{2-} están presentes pero en una muy baja proporción, reflejando condiciones reductoras a lo largo del perfil.

Perfil hidrogeoquímico del Sector del Centro

Este perfil ha sido construido con dos pozos, localizados en una zona de alto régimen de bombeo sobre la zona plana de la Sabana de Bogotá. Sus filtros están localizados en el acuífero Guadalupe exclusivamente, y en esta zona el acuífero neógeno-cuaternario suprayacente puede alcanzar más de 200m de espesor.

De la misma forma que en el perfil anterior se observa el incremento de los iones bicarbonato y sodio, que alcanzan mas de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, se detectó carbono orgánico disuelto (COD) y CH_4 ; los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} alcanzan hasta $0.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, mientras que el ión Cl^- aumenta entre los dos pozos. Los iones Fe , NO_3^- y SO_4^{2-} están presentes pero en una proporción muy baja.

Los cambios hidrogeoquímicos a lo largo del flujo en los dos perfiles están representados por el incremento del bicarbonato, que puede ser producto de diferentes procesos, pero debido a la alta presencia COD y la presencia de metano se sugiere que la descomposición de materia orgánica es dominante en el acuífero neógeno-cuaternario. El incremento en ión sodio, que está en una magnitud mayor a la del ión cloruro, indicaría que un proceso diferente al de la disolución de cloruro de sodio estaría sucediendo en el acuífero; este podría ser el intercambio catiónico. La presencia de los iones bicarbonato y sodio, así

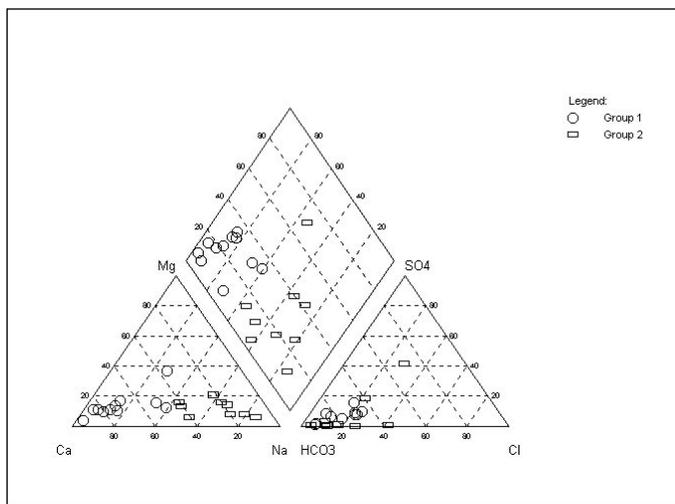


Fig. 4.a Diagrama Piper de las aguas del acuífero Guadalupe
Fig. 4.a. Piper diagram for water samples from the Guadalupe aquifer.

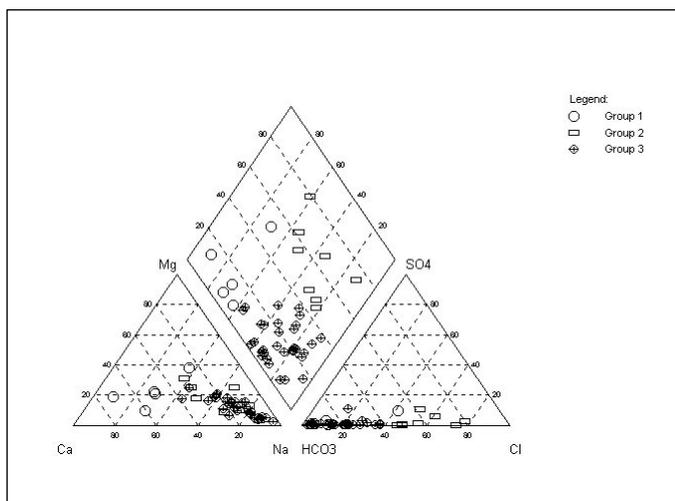


Fig. 4.b. Diagrama Piper de las aguas del acuífero neógeno-cuaternario
Fig. 4.b. Piper diagram for the Neogene-Cuaternary aquifer waters

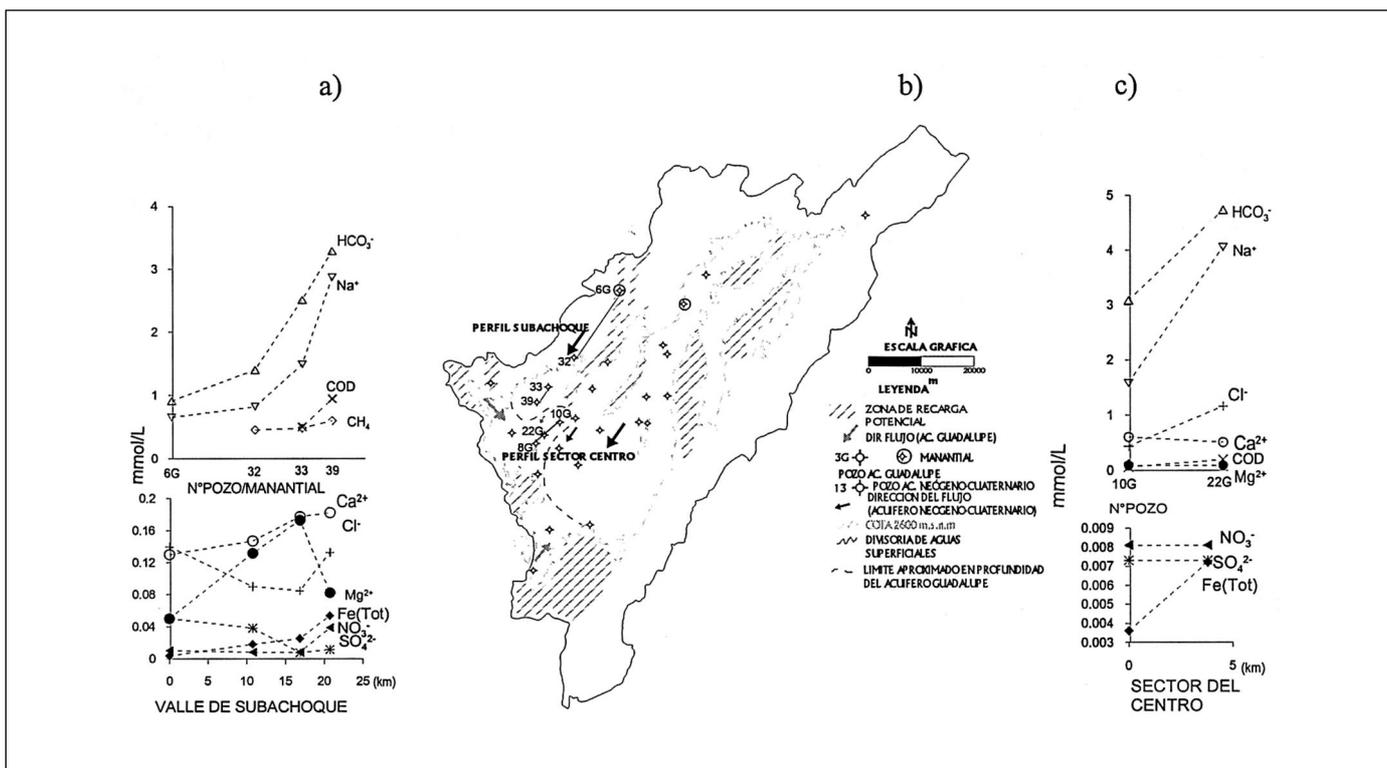


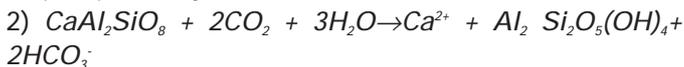
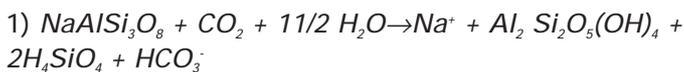
Fig. 5. a) perfil hidrogeoquímico del valle de Subachoque; b) localización de los perfiles en la cuenca; c) perfil hidrogeoquímico del sector del centro

Fig. 5. a) Hydrogeochemical profile of the Subachoque valley, b) location of the profiles in the basin; c) hydrogeochemical profile of the central sector

como la presencia del COD y el metano en el acuífero Guadalupe, estarían sujetas a la entrada de agua desde el acuífero neógeno-cuaternario suprayacente, causada por el sobredescenso en los pozos o bien por mal diseño de los pozos.

Reacciones y procesos hidrogeoquímicos asociados al HCO_3^- , Na^+ , COD y CH_4 en el agua subterránea

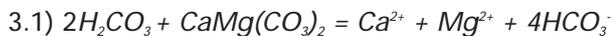
Meteorización de plagioclasas



En estas reacciones se disuelven de forma incongruente minerales silicatados tales como albita ($NaAlSi_3O_8$) y/o anortita ($CaAl_2SiO_8$), los cuales reaccionan con el CO_2 para producir principalmente iones de sodio, calcio y bicarbonatos (Na^+ , Ca^{2+} , HCO_3^-) en

solución, caolinita sólida ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) y sílice disuelta (H_4SiO_4).

Disolución de calcita y dolomita

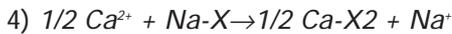


Estos procesos podrían ocurrir simultáneamente a la disolución de plagioclasas. Frecuentemente los carbonatos son secundarios y están rellenoando grietas y fracturas, por lo que pueden ser redissueltos e incorporados al agua subterránea. La disolución de carbonatos puede ocurrir en ambos acuíferos.

Intercambio de cationes

Los minerales arcillosos, la materia orgánica y los óxidos e hidróxidos tienen una cierta capacidad de

intercambio de cationes (Appelo y Postma, 1996). La siguiente reacción representa el proceso general de intercambio de calcio en solución por sodio adsorbido:



En esta reacción el calcio es retenido en el sustrato intercambiador y el Na⁺ es liberado a la solución.

Metanogénesis y COD

Inicialmente se tiene la turba y/o el lignito formados durante la edafogénesis. Una vez enterrados y en ausencia de oxígeno se inicia el proceso de descomposición, que conlleva la producción ácidos húmicos y fúlvicos, los cuales favorecen la producción del COD, que es soluble en agua. Debido a que en el proceso de descomposición de la materia orgánica se generan compuestos de diverso tamaño, se define como COD aquel que puede pasar a través de un filtro comercial de 0.45µm (Clark y Fritz, 1997). En acuíferos cuaternarios es frecuente encontrar turba, por lo que ésta es una fuente potencial de COD en el agua subterránea (Aravena y Wassenaar, 1993). Este puede ser el principal origen del aumento del COD a lo largo del flujo en los perfiles muestreados, como apoya la existencia de CH₄.

Evaluación isotópica

Los análisis de isótopos estables ¹⁸O y ²H, se realizaron por espectrometría de masas en los laboratorios del OIEA en Viena (Austria) y se expresan en notación δ(‰-VSMOW); el error analítico se calculó en +/- 0,5‰ para el ¹⁸O y +/- 0,05‰ para ²H. Los análisis del ¹³C en el carbono inorgánico disuelto ó CID, se efectuaron por espectrometría de masas; se expresan en notación δ(‰-PDB) y el error analítico se calculó en +/- 0,3‰.

Los resultados de los análisis hidrogeoquímicos e isotópicos, las posibles hipótesis sobre procesos, y las fases minerales que podrían dar lugar a dicha composición se incluyeron en el modelo NETPATH (Plummer *et al.*, 1994) con el fin de identificar su validez entre las zonas de recarga y los pozos de aguas más evolucionadas, y calcular su edad de acuerdo con el ¹⁴C.

¹⁸O, ²H y altitud.

De las muestras de lluvia y manantiales a diferentes

altitudes es posible diferenciar que las lluvias más empobrecidas en δ¹⁸O están entre 3700 y 3170 msnm y las más enriquecidas a menos de 2700 ms.n.m. Ver Figuras 6a y b. Las estaciones y manantiales localizados a altitudes de 2700 msnm o menos se asocian con las lluvias convectivas de la Sabana de Bogotá; por tal razón se presentan alejadas de la línea de tendencia principal. Algunos manantiales que se localizan por debajo de las líneas de correlación corresponden al flujo base y por ello la altura de recarga de estos podría ser mayor.

La línea isotópica local: δ²H = 7,92¹⁸O‰ + 8,8, fue elaborada con los datos del IAEA/WMO (2001) en la estación del aeropuerto El Dorado, en Bogotá (N° datos =136, período 1971-1990). Se pueden dife-

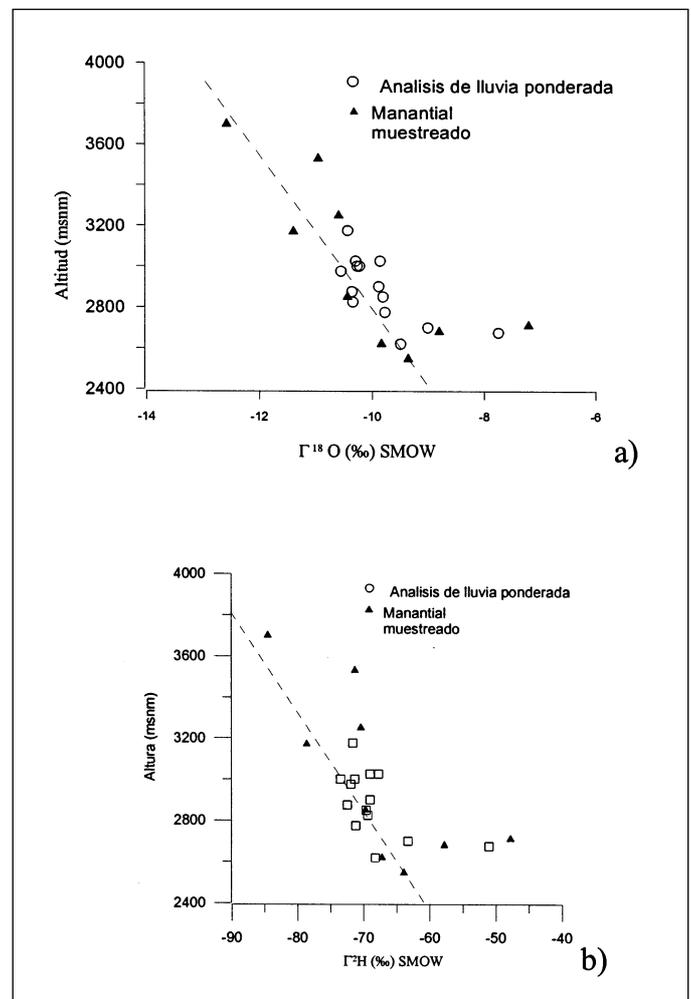


Fig. 6 a) y b) Gradientes isotópicos con la altitud, para el δ¹⁸O se ha calculado en -0.4‰ y para el δ²H en -2.0‰ por cada 100m de variación en altitud

Fig. 6 a) y b) Isotopic distribution as a function of the altitude. The gradient is estimated as -0.4‰ and -2.0‰ for δ²H for every 100m of change in elevation

renciar dos grupos isotópicos, los pozos profundos están más empobrecidos que $-9,0\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$ y pozos excavados o aljibes que alcanzan hasta $-7,0\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$. Los últimos se correlacionan con las estaciones de lluvia y manantiales de alturas menores de 2700 msnm, sugiriendo una recarga superficial del sistema. Muy probablemente los pozos profundos en el acuífero neógeno-cuaternario no están asociados a este sistema de flujo y su recarga se localiza por encima de los 2700 msnm. En el acuífero Guadalupe los

pozos profundos están asociados al rango $-9,0$ a $-11,0$ ‰ $\delta^{18}\text{O}$ y -70 y -80 ‰ $\delta^2\text{H}$ (Figs. 7a y b).

Isotopía del carbono

En el presente trabajo se presentan los análisis isotópicos del carbono seleccionados a lo largo del flujo, partiendo desde la zona de recarga (manantial) hacia las aguas de zonas hidrogeoquímicas más evolucionadas (pozos) en el valle de Subachoque, en el acuífero neógeno-cuaternario y en el acuífero Guadalupe Posteriormente mediante la aplicación del código NETPATH (Plummer *et al.*, 1994) se calcularon las edades del agua en las zonas influenciadas por la presencia de metano.

Variación del $\delta^{13}\text{C}$ y el ^{14}C en CID a lo largo del flujo en el Valle de Subachoque.

Los análisis isotópicos del carbono se enfocaron hacia el muestreo de $\delta^{13}\text{C}$ y ^{14}C en el carbono inorgánico disuelto (CID) y el $\delta^{13}\text{C}$ en CH_4 (ver tabla 2). Adicionalmente se midió la concentración (mmol/L) del metano disuelto y el carbono orgánico disuelto, COD, en algunos pozos; y los resultados ya han sido presentados en apartado de hidroquímica.

En las Figs. 8 (a y b) se observa un aumento continuo del bicarbonato y el enriquecimiento $\delta^{13}\text{C}$ (CID) desde $-13,83$ hasta $+2,7$ ‰ (PDB) y el ^{14}C disminuye desde $51,3$ hasta $0,81$ PCM en el perfil. En la zona de recarga, punto 6G (Manantial la Pradera) del acuífero Guadalupe, el bicarbonato presenta $0,8$ mmol/L, el contenido de $\delta^{13}\text{C}$ (CID) es de $-13,83\text{‰}$ (PDB) y el ^{14}C es de $51,3$ (PCM). Donde el flujo es confinado (puntos 32, 33 y 34) en los sedimentos neógeno-cuaternarios, el $\delta^{13}\text{C}$ (CID) presenta un enriquecimiento continuo desde $-3,7$ hasta $+2,7$ ‰ (PDB) y el ^{14}C disminuye sucesivamente de $10,2$ a $2,1$ (PCM) y finalmente alcanza $0,81$ (PCM).

Variación del $\delta^{13}\text{C}$ y el ^{14}C en CID a lo largo del flujo en el Sector del Centro

Este perfil está representado por pozos que captan el acuífero de Guadalupe, cuyo flujo se efectúa principalmente por fracturas; sobre él suprayacen los sedimentos neógeno-cuaternarios. Está representado por los puntos 10G y 22G y los contenidos de $\delta^{13}\text{C}$ (CID) en estos es de $-2,5$ y $-2,1\text{‰}$ (PDB) respectivamente, y el ^{14}C en estos mismos puntos presentan $2,6$ y $7,1$ (PCM), para este perfil se detectó metano en muy

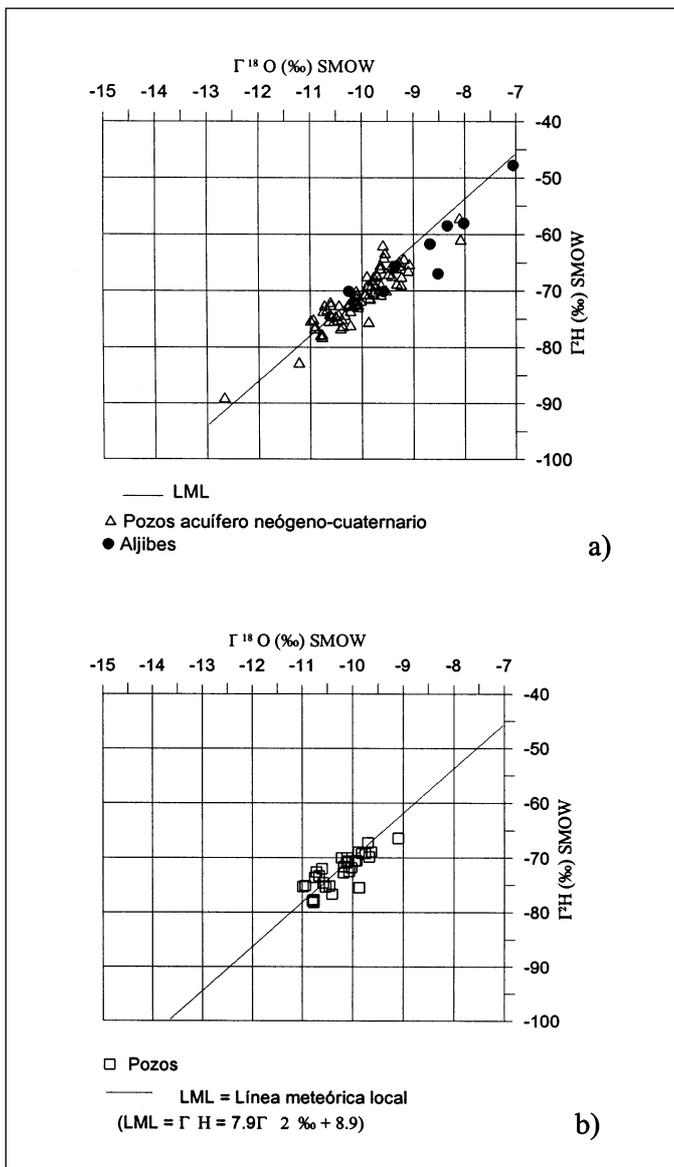


Fig. 7 a) y b) Los resultados isotópicos de los pozos profundos y someros en los acuíferos neógeno-cuaternario y Guadalupe, respectivamente

Fig. 7 a) y b) Isotopic results for the deep and shallow wells in the Neogene-Quaternary and Guadalupe aquifers

baja proporción, y el carbono 13 medido en este fue de -54,4‰.

Cálculo de la edad del agua subterránea en el acuífero Guadalupe en zonas de recarga.

Para la evaluación de la edad del agua subterránea en el sistema se procedió a calcular inicialmente la edad del agua en el acuífero Guadalupe, y posteriormente en el acuífero neógeno-cuaternario. Para el cálculo se tienen una variedad de modelos en la literatura; sin embargo en este estudio se aplicarán los modelos que incorporen los procesos hidrogeoquímicos descritos anteriormente.

El modelo de evaluación de la edad del agua subterránea en este acuífero se basa sobre el concepto de recarga en un sistema cerrado al CO₂, que recibe el agua del suelo y posteriormente fluye a través de fracturas en el acuífero.

Para la evaluación de la edad del agua subterránea con ¹⁴C se aplicó la siguiente ecuación:

$$5) A_t = A_o \cdot e^{-t} \text{ o también } A_t = A_o \cdot e^{-t \ln 2 / T_{1/2}}$$

Donde A_t = actividad del carbono-14 en un t dado
 A_o = actividad inicial del carbono-14
 O = constante de desintegración
 $T_{1/2}$ = período de semi-desintegración (5730/ $\ln 2$ = 8267 años).

Y se obtiene

$$6) t (\text{edad}) = - 8267 \ln (A_t / A_o);$$

Para este modelo se supone que la actividad inicial de carbono ¹⁴C es conocida, que ha permanecido constante durante el pasado y que el sistema es

cerrado con respecto a salidas o entradas de carbono, excepto a través de desintegración radiactiva.

Adicionalmente, cuando el ¹⁴C entra al sistema (A_o) las reacciones geoquímicas a lo largo del flujo pueden alterar el contenido final de ¹⁴C (A_t) en un factor q de dilución. Para ello es necesario aplicar modelos que tengan en cuenta dicho factor. En el caso del ¹⁴C en el acuífero de Guadalupe se supuso el modelo de Pearson *et al.* (1972), el cual se ajusta a un sistema de interacción del CO_{2(SUELO)} y los carbonatos procedentes de fuentes inorgánicas.

En el perfil del valle de Subachoque el punto 6G, en el manantial de la Pradera (2820 m.s.n.m) se encontró 1,1 unidades de tritio, lo cual sugiere que el agua podría ser moderna, partiendo del hecho que en 1990 el tritio en las precipitaciones de la cuenca estaba alrededor de 3 UT, según los datos tomados de ISOHIS (IAEA/WMO, 2001).

Para los pozos 10G y 22G ubicados sobre el perfil del Sector del Centro, que captan el acuífero de Guadalupe, sería necesario tener en cuenta la presencia de metano para el cálculo de la edad del agua subterránea. El $\delta^{13}C$ en el metano, CH₄, en los pozos de los acuíferos neógeno-cuaternario y Guadalupe, presentan valores entre -42,7 y -79,2 ‰; este rango indicaría que el gas tiene origen biogénico, ya que el metano de origen termocatalítico tendría valores más enriquecidos según Whiticar *et al.*, 1986.

Para la modelación con NETPATH se tomaron los pozos del perfil del valle de Subachoque. Este perfil se ajusta muy bien para el modelamiento por los siguientes factores:

1. Al inicio del transecto se detectó agua moderna (con 1,1 +/- 0,5 UT) en el manantial 6G.
2. Se observó un aumento del bicarbonato a lo largo del flujo.
3. Presenta un enriquecimiento continuo en $\delta^{13}C$ (CID) y decrecimiento en la actividad del ¹⁴C.

N °	Identificación	Profundidad del pozo	Filtros	Perfil	$\delta^{13}C$ (CID) ‰ PDB	$\delta^{13}C$ (CH4) ‰ PDB	¹⁴ C (CID) (PCM)	Tritio (UT)
6G	208IVD020	MANAN	*	1	-13,83		51,30	1,1 +/- 0,5
32	227IIB024A	135	45-126	1	-3,7	-79,20	10,20	0,8 +/- 0,5
33	227IIC200	180	120-176	1	-4,30	-77,95	2,19	
39	227IIC321	320	142-252	1	2,70	-74,30	0,81	
10G	227IVA450	279	134-279	4	-2,50	-54,40	2,63	
22G	227IVA128	424	292-424	4	-2,10		7,16	

Tabla 2. Resultados de los isótopos del carbono para los pozos en los perfiles a lo largo del flujo en el valle de Subachoque y en el sector del Centro

Tabla 2. Results for C isotopes for the wells of the profiles along the flow in the Subachoque valley and in the central sector

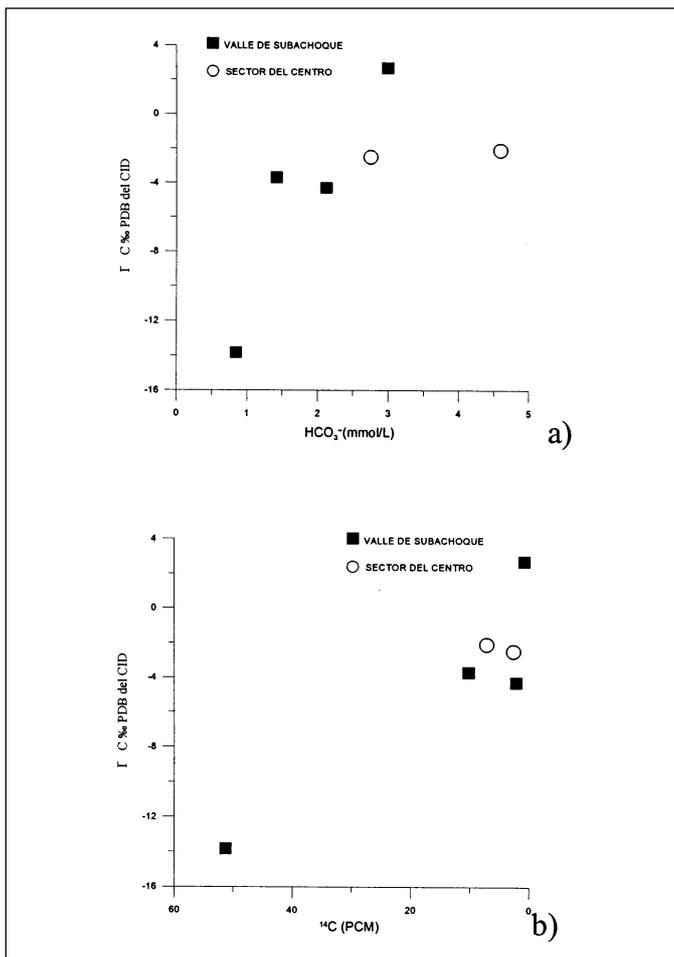


Fig. 8a) y b) Representan la variación de los perfiles analizados en función de la distribución de los isótopos del carbono y del bicarbonato. A medida que el carbono 13 se enriquece, el bicarbonato aumenta y el carbono 14 disminuye en su actividad
 Fig. 8a) y b) Profiles variation as a function of the bicarbonate content and C is of topic distribution. An increase in ¹³C is followed by an increase in bicarbonate and a decrease in ¹⁴C activity

4. Aumenta en el contenido del COD y CH₄ a lo largo del flujo.
5. El método de explotación (bomba sumergible) de los pozos da una mejor confiabilidad en los resultados del CH₄ muestreado en boca de pozo.

De los iones (restricciones) y fases minerales involucrados en modelación a lo largo de este perfil se obtuvo un balance de masas. Este es un resultado adicional al cálculo de la edad del agua subterránea.

Ajuste del modelo hidrogeoquímico e isotópico.

Los resultados de la modelación con NETPATH se presentan en la tabla 4. La comparación de las composiciones isotópicas observadas y computadas por el modelo en el pozo final es un medio de eliminar modelos inapropiados (Plummer *et al.*, 1994). En las tablas se observa que para el δ¹³C (CID) se da un ajuste aceptable entre las concentraciones computadas y observadas en los modelos. Podría lograrse un mejor ajuste en estos por tanteo de la concentración de metano disuelto y el δ¹³C (CH₄). Es posible que este se hubiese desgasificado durante la toma de la muestra; sin embargo en estos modelos se incluyeron las concentraciones de los resultados analíticos.

En la modelación se observó que los resultados de la edad son más sensibles al "ajuste" de la concentración del metano que a los cambios en el δ¹³C (CH₄). Por otro lado no se observó un cambio significativo al incluir la disolución de la dolomita (con el fin de tener en cuenta las transferencias de masas por cambio en Mg²⁺ a lo largo del flujo) como una fase del modelo; por tal razón no se incluyó. El cambio en el δ¹³C (COD) tampoco tiene influencia sobre los resultados de la edad calculada por el modelo y se supuso -25‰.

De acuerdo con NETPATH las edades del agua subterránea calculadas a lo largo del perfil del valle de Subachoque en los pozos del acuífero neógeno-cuaternario son antiguas y están comprendidas en el rango de 7400 y 25.000 años. Ver tabla 4.

Discusión

La Cuenca Alta del Río Bogotá es una zona muy complicada desde el punto de vista estratigráfico y tectónico. Desde el punto de vista de sus connotaciones

FASES	CH ₂ O	MINERALES		
		calcita	intercambio de Ca/Na	plagioclasa Ca-Na
Perfil Subachoque				
8G-32	0.89	0.89	0.39	-1.14
8G-36	1.45	0.66	0.78	-0.89
8G-39	2.12	1.76	1.51	-1.48

Tabla 3. Modelo hidrogeoquímico planteado y balance de masas obtenido
 Tabla 3. Theoretical Hydrogeochemical model and mass balance results

hidrogeológicas la geología se ha simplificado en cuatro unidades principales: el basamento, considerado como impermeable a efectos prácticos, y formado por los limos arcillosos de la Formación Chipaque; el complejo acuífero Guadalupe, integrado por las formaciones cretácicas Arenisca Dura, Arcillolita Plaeners y Arenisca Tierna-labor; el acuitardo Paleógeno, formado por arcillolitas, areniscas, conglomerados cementados y capas de carbón de las formaciones Guaduas, Bogotá, Cacho, Regadera y Usme, el complejo acuífero neógeno-cuaternalario, formado por depósitos de arenas, gravas, arcillas orgánicas y capas de turba interstratificados de las Formaciones Tilatá, en la parte inferior, Subachoque en la parte media y Sabana en la parte superior, además de los depósitos de piedemonte (abanicos aluviales y depósitos de gravedad en laderas, de extensión reducida).

A efectos prácticos, en el acuífero neógeno-cuaternalario se ha incluido también el acuífero superficial, compuesto por los depósitos aluviales recientes (Formación Chía) y con un espesor máximo de 3 m.

Una dificultad importante es la carencia de perforaciones con testigo continuo. La información sobre la cual se plantea el modelo hidrogeológico conceptual está sustentada por información de pozos de riego y abastecimiento e información de sondeos eléctricos verticales. Otra limitación del estudio es la falta de una red de monitoreo de acuíferos diseñada especialmente para este fin, ya que la información hidrogeológica disponible de los pozos no siempre coincide en los mismos puntos, lo cual dificulta el contraste de la información básica de los acuíferos.

De forma general el movimiento del agua subterránea va desde los cerros, formados por afloramientos del acuífero Guadalupe, hacia el centro y la zona plana del fondo de los valles, rellenos por sedimentos neógeno-cuaternalarios. Los niveles piezométricos reflejan los bombeos de la parte baja de la cuenca. Al

comparar la piezometría de 1991 con la del 2000 se observa un descenso de al menos 20 m en la parte baja del Valle de Subachoque (sector del centro de la Sabana, donde se concentran las mayores extracciones).

Los datos de transmisividad disponibles del acuífero neógeno-cuaternalario varían entre 1 y 400 m²/d, aunque los valores más frecuentes están entre 10 y 50 m²/d. Los coeficientes de almacenamiento locales, con valores entre 1•10⁻² y 7•10⁻⁷, indican condiciones de semiconfinamiento a confinamiento. Esto es coherente con la estructura interna del sistema acuífero y con las características de las profundidades y longitudes variables de los filtros de los pozos de bombeo.

Según INGEOMINAS (1995) en la cuenca se recargaban 93 hm³/a y se bombeaban 39 hm³/a. Sin embargo a la luz de los estudios isotópicos aquí realizados la recarga tiene lugar mayoritariamente en los afloramientos del acuífero Guadalupe, que forma los cerros. Partiendo de este supuesto, según los cálculos de INGEOMINAS la recarga solamente en el acuífero Guadalupe supondría 29 hm³/a.

Por otro lado, es de esperar que la depresión regional del nivel estático de los acuíferos ocasione una recarga procedente de la superficie. Sin embargo su efectividad está condicionada entre otros factores por la conductividad hidráulica vertical de los niveles superficiales, los cuales son predominantemente arcillosos, y por el carácter semiconfinado a confinado de los niveles acuíferos.

De acuerdo con la investigación hidrogeoquímica e isotópica, las zonas principales de recarga están entre los 2600 y los 3300 msnm, lo cual corresponde a los afloramientos del acuífero Guadalupe. Localmente también existe recarga en los depósitos de piedemonte y en los estrechos afloramientos de las formaciones neógeno-cuaternalarias, Río Siecha, Río Tunjuelito Tilatá, ubicados en los flancos de pliegues y en superficie en los acuíferos menores.

Identificación	$\delta^{13}\text{C}$ corregido ‰	$\delta^{13}\text{C}$ (CID) medido ‰	Ao corregida (PCM)	Ao medida (PCM)	At medida (PCM)	Edad (años)
6G 208IVD020		-13,83		51,3		Moderna
32 227IIB024A	-1,65	-3,7	21,96		8,75	7.600
33 227IIC200	-3,52	-4,3	19,24		1,59	20.604
39 227IIC321	-1,35	2,7	13,17		0,52	25.919

Tabla 4. Edad del agua subterránea en el perfil de Subachoque Cuenca Alta del Río Bogotá
 Tabla 4. Groundwater age in the Subachoque profile of the Uppen Basin of the Bogota river

Los manantiales localizados en las zonas de recarga presentan agua bicarbonatada sódica-cálcica y baja mineralización, asociada principalmente a cortos tiempos de tránsito del agua en el acuífero y a una relativamente baja reactividad de los materiales silicatados de las formaciones del Grupo Guadalupe. No obstante los balances de masa realizados entre el agua de lluvia media y el manantial 6G indican que el agua de éstos puede haber disuelto ya silicatos sódico-cálcicos, y quizá también algo de carbonatos.

El tritio en un manantial y un pozo presentó valores medidos de 0,8 y 1,1 UT ($\pm 0,5$ UT). En 1990 el agua de lluvia del aeropuerto "El Dorado" de Bogotá presentaba 3 UT, lo que sugiere que el agua de estos manantiales podría ser moderna. Sin embargo el error analítico es elevado en relación con los valores medidos, por lo que también podría tratarse de aguas con larga permanencia en el acuífero.

El manantial con mayor contenido de tritio presenta una actividad de ^{14}C del CID de 51,3 pcm y $\delta^{13}\text{C}$ del CID de $-10,63\%$ PDB. El $\delta^{13}\text{C}$ del CID sugiere una dilución con carbonatos sólidos (suponiendo que el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo es $\approx -22\%$, aunque este no fue medido para el estudio). Corrigiendo las medidas de ^{14}C para el efecto de envejecimiento por la disolución de carbonatos se confirma que en ambos casos se trata de aguas modernas.

La composición química de las aguas subterráneas muestreadas a lo largo de los valles en pozos y manantiales indica que en los dos acuíferos principales hay los mismos dos grupos de aguas: uno de tipo $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$, ubicado en los piedemontes y zonas altas en general, y otro de tipo $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$, ubicado en el centro y parte baja de los valles. El carácter bicarbonatado-sódico va aumentando en el sentido del flujo regional, desde las partes altas hacia las partes bajas de los valles.

En los perfiles hidrogeoquímicos muestreados hay un claro aumento de bicarbonato y sodio en el sentido del flujo regional, tanto en el acuífero neógeno-cuaternario como en el Guadalupe. Con base en el conocimiento litológico e hidrogeológico que se posee los procesos hidrogeoquímicos que se han propuesto para explicar estos incrementos son la disolución de productos derivados de la descomposición de materia orgánica, el intercambio catiónico de Ca en solución por Na adsorbido y la disolución y/o precipitación de carbonatos y quizá también de silicatos sódico-cálcicos principalmente. El aumento de COD en los perfiles así como la presencia de metano disuelto en el agua de algunos pozos son coherentes con los análisis isotópicos del carbono: el enriquecimiento hasta valores positivos del $\delta^{13}\text{C}$ del CID sólo podría ocurrir en ambientes metanogénicos. El $\delta^{13}\text{C}$

del CH_4 presenta valores entre $-42,7$ y $-77,95\%$ PDB, que según la clasificación propuesta por Whiticar *et al.* (1986) estarían indicando un metano de origen biogénico.

Las evidencias geológicas hidrogeoquímicas e isotópicas apuntan a la disolución de la materia orgánica procedente de las turbas del acuífero neógeno-cuaternario. Estas turbas fueron depositadas durante la formación del lago que existió hasta hace unos 30.000 años y están perfectamente documentadas en Van der Hammen (1995). La descomposición de la materia orgánica antigua presente en los sedimentos del acuífero neógeno-cuaternario introduce en el agua subterránea un efecto envejecimiento aparente adicional al de la desintegración radiactiva, pues incorpora al agua carbono con una actividad de ^{14}C muy baja o nula.

Se calculó la edad de las aguas subterráneas a lo largo de una trayectoria de flujo regional en el perfil del Valle de Subachoque. Para ello se utilizó el programa NETPATH (Plummer *et al.*, 1994). El cálculo consistió en cuantificar el balance y la transferencia de masas entre un punto ubicado en la zona de recarga (punto inicial) y tres pozos (punto final) situados a distancias crecientes del primero. Se efectuó la comprobación termodinámica y se compararon con los índices de saturación de las fases minerales correspondientes en las aguas de cada uno de los cuatro puntos. Adicionalmente se incluyó el valor del $\delta^{13}\text{C}$ del CID calculado por el programa y se comparó con el valor medido analíticamente como criterio final de calibración.

Se observa que el efecto del metano en la edad del agua subterránea no es cuantitativamente muy importante, quizá debido a que las concentraciones de CH_4 no son muy grandes. La comparación de los resultados de los distintos modelos que tienen en cuenta el metano y aquellos que no lo tienen sugiere que tanto los modelos de Ingerson y Pearson (1964), como el modelo de Eichinger (1983) y el de Fontes y Garnier (1979) podrían ser válidos para interpretar los datos de ^{14}C en este perfil.

De acuerdo con los resultados de las edades aplicando NETPATH en el perfil de valle de Subachoque éstas están comprendidas entre 7400 y 25.000 años. Estas edades son coherentes con lo que se podría esperar, ya que como se ha mencionado antes el agua de los acuíferos Guadalupe y neógeno-cuaternario en las zonas de piedemontes es menor.

La hipótesis de que en la cuenca hay una interacción entre el acuífero aluvial somero que recubre al neógeno-cuaternario, las aguas superficiales y de recarga a baja altura y las estaciones de lluvia de la Sabana no se ha podido comprobar con los datos de

los isótopos estables. Una vez calculado el gradiente isotópico altitudinal con los manantiales y lluvias (-0,4 ‰ $\delta^{18}\text{O}/100\text{ m}$ y -2,0 ‰ $\delta^2\text{H}/100\text{ m}$), se ha comprobado que todas las aguas subterráneas de largo recorrido parecen proceder de la recarga de la lluvia que cae entre los 2600 y los 3300 ms.n.m. Como la cota 2600 ms.n.m. coincide razonablemente con el límite superior de afloramiento de los sedimentos cuaternarios, esto significaría que la recarga tiene lugar principalmente en las zonas altas (cerros), formados como ya se ha dicho por materiales del complejo acuífero Guadalupe.

Una segunda zona de recarga podría estar localizada a una altitud menor que 2600 ms.n.m., interpretada de algunos manantiales y una estación de lluvia, y es a esta altitud donde están localizados los aljibes muestreados en la zona plana de la cuenca. Sin embargo es necesario muestrear en forma continua y más completa los pozos someros y los aljibes.

Desde la perspectiva de los datos piezométricos disponibles de los acuíferos parece bastante probable que exista interacción entre los acuíferos, al menos localmente. En el sector del Centro de la Sabana las depresiones por bombeos profundos indicarían un drenaje de los sedimentos neógeno-cuaternarios hacia los cretácicos del acuífero Guadalupe. Otra evidencia de que al menos existen las condiciones hidráulicas para que se produzcan flujos verticales de un acuífero a otro es la anomalía térmica medida en el sector central de la Sabana.

El aumento en los iones HCO_3^- y Na^+ , la presencia de metano de origen biogénico, así como el enriquecimiento en el $\delta^{13}\text{C}$ del CID de los pozos y la baja actividad del ^{14}C del CID en los pozos del acuífero Guadalupe en varios de los perfiles estudiados parecen resultar coherentes con un flujo de agua subterránea proveniente del acuífero neógeno-cuaternario. No obstante esto sería así si los pozos efectivamente tienen los filtros en el acuífero Guadalupe exclusivamente; pero una posibilidad que no puede descartarse es la entrada de agua desde niveles superiores por efecto de fallos constructivos en los pozos.

La combinación de todos los elementos tales como los datos de explotación en el acuífero neógeno-cuaternario, las zonas de mayor descenso concentradas en el Sector del Centro y en el Valle de Subachoque, la interacción con el acuífero Guadalupe identificada con las herramientas hidrogeoquímicas e isotópicas, los largos tiempos de tránsito y las pobres características acuíferas, deben ser elementos que los planificadores y autoridades que manejan el recurso hídrico deben tener en cuenta al aprobar nuevos planes de explotación en estos sectores, y esto sin tener en cuenta los fenómenos

ambientales en superficie que ya han sido detectados.

De acuerdo con la legislación colombiana sólo se debería explotar el recurso subterráneo renovable. Sin embargo la renovación del agua podría no estarse dando a escala humana en el sistema profundo, donde la explotación es más concentrada, pero sí en las partes más altas de acuerdo con los resultados isotópicos de los manantiales muestreados.

Los efectos de la explotación intensiva son evidentes en el sistema; sin embargo no debe caerse en la especulación ya que se necesitan datos fiables. Es mucho más evidente que los efectos aquí presentados pueden ser debidos a un manejo inadecuado de las explotaciones en forma sectorizada y que de continuar en este mismo sentido sería susceptible de convertirse en un fenómeno extensivo a toda la cuenca.

Conclusiones

1. Partiendo de la información mineralógica disponible en la literatura y de los análisis químicos e isotópicos realizados para este estudio, se ha propuesto un modelo hidrogeoquímico conceptual para explicar la evolución de la composición del agua subterránea observada a lo largo de líneas de flujo que representan razonablemente el flujo regional en los acuíferos de la Cuenca Alta del Río Bogotá. Este modelo hidrogeoquímico se ha validado termodinámicamente mediante simulación con el programa NETPATH (Plummer *et al.*, 1994).
2. El modelo propuesto es coherente con lo siguiente: en las zonas de recarga el agua de lluvia se infiltra disolviendo preferentemente CO_2 , plagioclasas (sódicas o sódico-cálcicas) y calcita, originando aguas bicarbonatadas cálcicas de mineralización muy débil (<2mmol/L) y valores de $\delta^{13}\text{C}$ típicos de disolución de carbonatos sólidos. Hacia el centro de los valles el agua empieza a incorporar carbono procedente de la descomposición de materia orgánica que forma parte de los sedimentos fluvio-lacustres del Neógeno-Cuaternario que rellenan los valles. Adicionalmente se estaría produciendo un intercambio iónico de Ca^{2+} en solución por Na^+ adsorbido en las arcillas y la materia orgánica. Estas dos reacciones principales van acompañadas de disolución y/o precipitación de calcita y quizá dolomita, pero la transferencia de masa entre el agua subterránea y el terreno debida a estas últimas reacciones es mucho menor que la ocasionada por las dos primeras. El resultado final

es un progresivo y significativo enriquecimiento del agua subterránea en Na^+ , HCO_3^- , COD y CH_4 y un enriquecimiento isotópico del $\delta^{13}\text{C}$ hasta valores superiores a +10 ‰. Las concentraciones del resto de especies químicas varían de forma poco apreciable y sin mostrar una tendencia clara, lo que indica que están controladas por procesos locales y no regionales.

3. El enriquecimiento del ^{13}C del CID del agua se ha atribuido a la metanogénesis biogénica que tiene lugar en los sedimentos. Con base en los contenidos de $\delta^{13}\text{C}$, ^{14}C , CH_4 y HCO_3^- medidos en las aguas subterráneas, mediante el código NETPATH se ha modelado la edad de las aguas corrigiendo la actividad inicial del ^{14}C para el envejecimiento aparente que supone la incorporación de C de la materia orgánica al agua. Con el fin de conocer el error que se cometería ignorando el efecto de la materia orgánica sobre la composición isotópica del CID, adicionalmente se han calculado las edades suponiendo que el enriquecimiento de ^{13}C se debe únicamente a la disolución de carbonatos sólidos. Dependiendo del método de corrección usado y de la muestra en cuestión, las edades se sobrestiman entre 1000 y 4000 años o se subestiman entre 1000 y 18.000 años.
4. Las edades se distribuyen de esta forma: en las zonas de recarga de la cuenca están las aguas modernas, aunque localmente y en zonas muy fracturadas puede haber mezclas de aguas con distintos tiempos de residencia por flujos profundos ascendentes; en los piedemontes y partes altas de los valles, cerca de las zonas de recarga, se obtiene un amplio rango de edades entre centenares y varios miles de años. Ello se explica porque las muestras fueron tomadas en pozos con tramos de filtros muy largos y por la complejidad de la estructura del acuífero Guadalupe. Finalmente las aguas localizadas en la parte baja de los valles fluviales y en el Sector del Centro de la Sabana se han calculado edades entre varios miles y unos 25.000 años, aunque probablemente las haya más viejas.

- En cuanto a las aportaciones al modelo al conocimiento del funcionamiento de los acuíferos:

5. La recta isotópica altitudinal y los valores de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ que se poseen de aguas de pozos, lluvias y manantiales parecen indicar una probable procedencia común, y que las principales zonas de

recarga están situadas por encima de los 2600 msnm. Esto significaría que la mayor parte de la recarga a ambos acuíferos tiene lugar en los afloramientos del acuífero Guadalupe en las zonas altas. Esto contrasta con el modelo existente hasta ahora, que suponía recarga en toda la cuenca, e invalida las cifras de los balances hidráulicos existentes. Sin embargo es coherente con el hecho de que exista una fuerte depresión piezométrica en la Sabana, de que los niveles hayan bajado varios m en pocos años en la zona de máxima extracción hasta hacer desaparecer manantiales y pozos surgentes y, sobre todo, con el hecho de que se estén extrayendo aguas con varios miles de años de permanencia en el acuífero.

6. En cuanto a la posible interrelación entre los dos acuíferos, ésta se sustenta fuertemente en los datos isotópicos del carbono en los pozos del acuífero Guadalupe localizados en el Sector del Centro de la Sabana y por su composición química, ya que ambos aspectos son similares a los del acuífero neógeno-cuaternario suprayacente. Los bombeos de agua profunda inducen además esta conexión al aumentar el gradiente hidráulico vertical entre ambos acuíferos.

La inexistencia de una red de control específica que informe sobre las características hidráulicas e hidroquímicas de cada acuífero por separado no invalida las conclusiones anteriores, pero disponer de esta red permitiría no sólo confirmar las hipótesis propuestas sino proponer planes de gestión y conservación de ambos acuíferos, especialmente en lo que se refiere a la explotación intensa de los acuíferos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al OIEA el apoyo económico y científico para el desarrollo del proyecto, lo mismo que al personal técnico y de laboratorio de la CAR y del INGEOMINAS (Bogotá). Un agradecimiento especial a Richard Elgood, del laboratorio de isotopía de la Universidad de Waterloo por el apoyo en los análisis de metano y COD. Se agradece también a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-EAAB, que apoyó en el muestreo de las precipitaciones, lo mismo que a los propietarios de los pozos que permitieron el muestreo. Un agradecimiento muy especial a la Dra. Marisol Manzano de la Universidad Politécnica de Cartagena (Murcia, España), por las correcciones y aportes al estudio base del presente documento.

Referencias

- Alvarez, A. 1998. Acuíferos de la Formación Tiltá (Mioceno Plioceno) en dos pozos del suroeste de la Sabana de Bogotá. *Geología Colombiana*, 23: 79-95.
- Aravena, R. y Wassenaar, L.I. 1993. Dissolved organic carbon and methane in a regional confined aquifer, southern Ontario, Canada: Carbon isotope evidence for associated subsurface sources, *Appl. Geoch.*, 8: 483-493.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). 2000. Medición de niveles y caudales en los pozos de la red de monitoreo de la Sabana de Bogotá. Contrato No 317 de 11 de diciembre del 2000. Informe interno.
- Clark, I. y Fritz, P. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers. Boca Ratón, USA. 1-328.
- Claro, F. 1995. *Estudio agroclimático de la Cuenca Alta del Río Bogotá y del río Ubaté-Suárez*. Instituto de Hidrología y Medio Ambiente, IDEAM, Bogotá, Colombia, 1-23.
- Cleseri, L., Eaton, A.L. y Greenberg, A. 1995. *Standard methods for examination of water & wastewater*. 20th Ed. 1-1325.
- De Bermoudez y Quiroz (2000). *Informe Interno*. INGEOMINAS.
- DANE. 1993. *Censo de Población en Colombia. Proyecciones al año 2015*. Boletín de consulta pública. Bogotá. 1-80.
- Diezemann, W. 1951. *Estudio de aguas subterráneas en los alrededores de Bogotá*. 2 tomos, incluye mapas y columnas litológicas. INGEOMINAS. Informe Interno.
- Fontes, J.C. y Garnier, J.M. 1979. *Water Resources Research*, 2: 399-413.
- IAEA/WMO. 2001. *Global Network for Isotopes in Precipitation. The GNIP Database*. Accesible en <http://isohis.iaea.org>
- INGEOMINAS-CAR. 1993. *Evaluación hidrogeológica de la Sabana de Bogotá*. Convenio CAR-INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. Vol.15: 7-11.
- INGEOMINAS. 1995. Informe ejecutivo. *Evaluación hidrogeológica de la Sabana de Bogotá*. Convenio CAR-INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. 1-26.
- Molano, C. 1988. *Modelo de simulación del acuífero de Guadalupe en el sector de Madrid, Cundinamarca*. INGEOMINAS. Informe interno: 1-23.
- Pearson, F.J.Jr., Bedinger, M. S. y Jones, B. F. 1972. Carbon-14 ages of water from the Arkansas Hot Springs. En: *Proceedings of Eight International Conference on Radiocarbon Dating*, 1:330-341. Royal Society of New Zeland, Wellington.
- Plummer, L.N., Prestemon, E.C. y Parkhurst, D.L. 1994. U.S. Geological Survey. *Water-Resources Investigations Report 94-4169*, 1-130.
- TNO, 1975. *Estudio de Aguas subterráneas en la Sabana de Bogotá*. II Etapa. Informe final. Cooperación técnica bilateral entre la República de Colombia y el Reino de los Países Bajos. Bogotá: 1-85.
- Van der Hammen, T. 1995 (Ed). Plioceno y Cuaternario del Altiplano en Bogotá y alrededores. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. IGAC. *Análisis Geográficos*, Bogotá, Colombia, 24:1-142.
- Withicar, M.J., Faber, E. y Schoell. M. 1986. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction vs. acetate fermentation-Isotope evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50: 693-709.

Recibido: Mayo 2002

Aceptado: Septiembre 2002