

ACERCAMIENTO A UN MODELO CONCEPTUAL DE RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DE LA REGION DE BUCARAMANGA

Sully Gómez y Ángel A. Anaya
*Escuela de Sistemas, Facultad de Minas
Universidad Industrial de Santander
sgomez@uis.edu.co*

Recibido para evaluación: 16 de Julio de 2004 / Aceptación: 03 de Septiembre de 2004 / Recibida versión final: 07 de Septiembre de 2004

RESUMEN

En la región de Bucaramanga la explotación de agua subterránea se ha desarrollado a escalas poco significativas, pero actualmente existe un gran interés en su aprovechamiento para abastecimiento humano e industrial. Dos unidades geomorfológicos se distinguen en la Cuenca Superior del Río Lebrija, el Macizo de Santander formado principalmente por rocas metamórficas del Precámbrico con algunas intrusiones ígneas. El segundo sistema corresponde a las formaciones aluviales de la meseta de Bucaramanga y sus alrededores; estos dos sistemas se encuentran separados por la Falla Bucaramanga–Santa Marta e igualmente están afectados por una cantidad significativa de rasgos estructurales. Este comportamiento afecta la hidrogeología presente en la región. La precipitación en la región varía entre los 700 mm y 2200 mm, encontrándose el óptimo pluviométrico entre los 1800 y 2200 m.s.n.m. Para realizar un primer acercamiento a un modelo conceptual de recarga en la región se usaron isótopos estables ^{18}O y ^2H (oxígeno 18 y deuterio) y el isótopo radioactivo ^3H (tritio) y se relacionaron sus resultados con los principales rasgos hidrogeológicos. Una primera hipótesis propone tres posibles zonas de recarga o mezcla de ellas, la primera localizada entre los 1800 y los 2200 m.s.n.m que recargaría las aguas subterráneas de la meseta; una segunda zona de recarga entre los 1300 y los 1500 m.s.n.m que alimentaría las aguas del cerro de la Cumbre, el Carmen, las calizas de la formación Diamante y otras formaciones acuíferas. Existiría una tercera zona de recarga entre los 2300 y los 2700 m.s.n.m que evidenciaría un flujo más profundo el cual alimentaría la zona sur. Los resultados de tritio permiten identificar aguas subterráneas de dos épocas, una época reciente asociada a las aguas del acuífero superior de la meseta y otra menos reciente asociada a las aguas del acuífero más profundo. De igual forma se identificaron dos comportamientos de la precipitación en la región, el primero esta relacionado con las lluvias orográficas datadas a lo largo del macizo de Santander, el segundo con las lluvias convectivas muestreadas a lo largo de la meseta de Bucaramanga.

PALABRAS CLAVES: Isótopos estables, Tritio, Agua subterránea, recarga, acuíferos, Meseta de Bucaramanga.

ABSTRACT

In the Bucaramanga region the exploitation of groundwater has not been developed to a significant level, but at the moment there is a great interest in its use for human and industry supply. Two geomorphology units are distinguished in the Superior Basin of the Lebrija River. Macizo of Santander is formed mainly by metamorphic rocks of the Precámbrico with some igneous intrusions, the second system corresponds to the Bucaramanga plateau, these two systems are separated by the Bucaramanga-Santa Marta Fault and equally they are affected by a significant quantity of structural features. This behaviour affects the regional hydrogeology. The precipitation vary between 700 and 2200 mm, being the pluviométric optimum between 1800 and 2200 m.s.n.m. Isotopes stable ^{18}O and ^2H (oxígeno 18 and deuterio) and the radio-active isotope ^3H were used to establish a conceptual preliminary model that allows to identify the origins and the areas of recharge of the aquifer systems of the region. Three possible recharge areas have been described for the studied area, the first one among 1800 and 2200 m.s.n.m that it would recharge the plateau; a second recharge area among 1300 and 1500 m.s.n.m that it would feed the waters of La Cumbre hill, El Carmen, the limestones of the Diamond formation, and the other bodies of groundwater. Finally a third recharge area among 2300 and 2700 m.s.n.m that it would evidence a deeper flow which would feed the south area. The results of the tritium help us to identify groundwater at two times, the first one is recent water related with superficial aquifer and the other one is older water related with deep aquifer. In the same form two precipitation behaviors were identified in the region, the first one this related with the orographic precipitation dated along the Macizo of Santander, the second with the convective precipitation dated along the Bucaramanga plateau.

KEY WORDS: Isotopes, Hydrogeology, Recharge, Aquifer

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca Superior del Río Lebrija tiene una superficie de aproximadamente 1280 km² y en ella se encuentra localizada la ciudad de Bucaramanga y su zona metropolitana que alberga cerca de un millón de habitantes. El suministro de agua requiere actualmente complementar la demanda y se piensa que el agua subterránea puede ser una de las alternativas a tener en cuenta, por lo cual el conocimiento de la recarga a acuíferos es un tema fundamental para la planificación y manejo del recurso.

Se distinguen dos unidades geomorfológicas en la cuenca, el Macizo de Santander conformado principalmente por rocas metamórficas del Precámbrico (Neiss de Bucaramanga) con algunas intrusiones ígneas (Cuarzomonzonitas), y los rellenos aluviales conformada por la Formación Bucaramanga, depósitos de origen cuaternario, los dos sistemas se encuentran separados por la Falla Bucaramanga – Santa Marta y su sistema asociado de fallas. La meseta de Bucaramanga, sobre la cual se encuentra localizada la ciudad, con un área de aproximadamente 18 km² representa algo mas de 1% del área de la cuenca. La escarpa occidental y noroccidental de la meseta, históricamente ha sido afectada por continuos procesos erosivos, debido a la acción de movimientos de remoción en masa por ascensos de niveles freáticos. Gómez, 1991. Para control de estos procesos se construyeron estructuras de drenaje del agua subterránea (Drenes) en la parte superior de la meseta a lo largo de la escarpa occidental.

El presente trabajo busca presentar un primer modelo conceptual que explique las posibles zonas de recarga que alimentan a los sistemas acuíferos de la meseta y sus alrededores, así como la identificación de los sistemas acuíferos existentes y sus mecanismos de recarga.

Con este fin se realizó un programa de muestreo de aguas de precipitación y aguas subterráneas presentes sobre las dos unidades geomorfológicas anteriores. Muestras de estas aguas se analizaron usando técnicas isotópicas, como son isótopos estables del agua (trazadores naturales), Deuterio (²H) y Oxígeno 18 (¹⁸O), los cuales permiten determinar el fraccionamiento isotópico de las aguas de precipitación y obtener así un comportamiento de la recta meteórica de la región. Igualmente es posible correlacionar las aguas provenientes de manantiales,

drenes, aljibes y pozos, representativas del agua subterránea en la región con las aguas de precipitación. La datación del agua subterránea fue realizada mediante el análisis de tritio.

El contenido isotópico de las aguas lluvias analizadas permiten diferenciar dos comportamientos bien definidos en la precipitación en la región, el primero esta relacionado con las lluvias orográficas muestreadas a lo largo del Macizo de Santander (alturas entre 1000 y 3200 msnm), el segundo con las lluvias convectivas muestreadas en la zona de la meseta de Bucaramanga (alturas entre 900 y 1000 msnm). Procesos como la evaporación se evidencian en algunos lagos y quebradas sobre la meseta y zonas cercanas (Lago del Cacique, Lago Miramanga y quebrada El Carmen). Estos lagos se encuentran localizados sobre la zona de Falla.

Los resultados de Tritio permiten identificar diferencia de edades entre las aguas subterráneas presentes, diferenciándose dos grupos, uno correspondiente al acuífero superior y otro al acuífero inferior de la Meseta de Bucaramanga.

2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio pertenece a la Cuenca Superior del Río Lebrija, la cual geográficamente, se encuentra ubicada al nororiente del departamento de Santander, en la Provincia de Soto, aproximadamente entre los 6° 54' y 7° 27' de Latitud Norte y 73° 15' y 72° 15' de longitud. La cuenca comprende parte de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta,

El clima de la Cuenca está definido por dos factores: La orografía, caracterizada por ser montañosa y variable, crea innumerables microclimas, presentándose variaciones en la temperatura en función de la altitud sobre el nivel del mar, con una tasa de lapso de 6.9 °C/km.

El principal aporte de humedad que proviene del valle del Magdalena Medio, es transportado por los vientos alisios que llegan hasta la cordillera oriental. Se habla de la presencia de un núcleo convectivo presente en el valle del Magdalena Medio, el cual transporta humedad hasta las estribaciones de la vertiente occidental de la cordillera Oriental donde se localiza el macizo de Santander. El macizo constituye una barrera orográfica que da lugar a un óptimo pluviométrico, identificado en

la zona comprendida entre los 2000 y 2200 msnm (Gómez y Vargas, 2002). Ver Figura 2.

Las masas de humedad, en su recorrido por la cuenca crean un gran centro de humedad en los alrededores de la Corcova y la Mariana, sitios donde nacen los ríos Frío,

Hato (ó Lato), de Oro y parte del Tona. Otro componente de estos vientos recorre el cañón del Río Suratá y descarga su humedad en las partes altas de la cordillera, en la zona donde nacen los ríos Tona, Charta, Vetas y Suratá. El área de Girón y Chocoa localizada hacia el sur occidente de la región es bastante seca.



FIGURA 1. Zona de estudio demarcada dentro de la Cuenca Superior del Rio Lebrija.

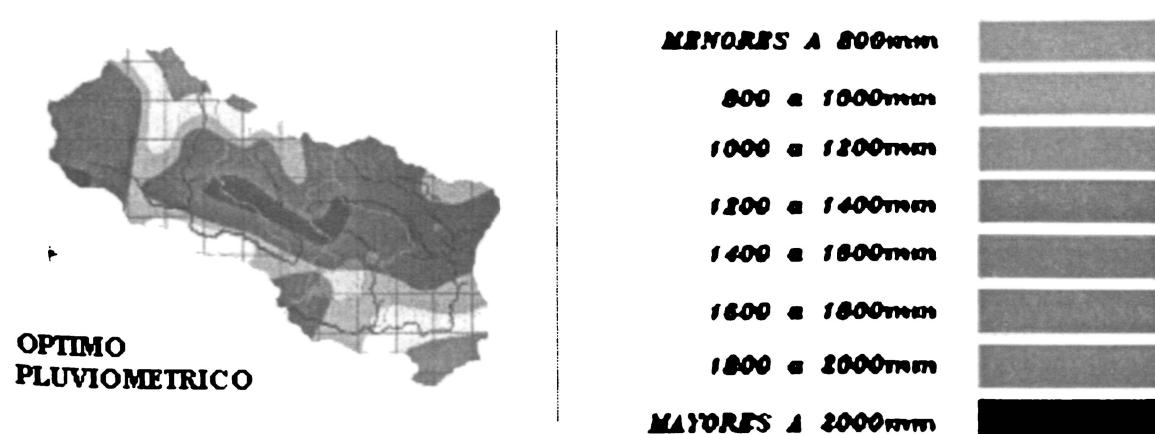


FIGURA 2. Distribución espacial de la precipitación en la Cuenca Superior del Río Lebrija

Las lluvias en la región presentan el ciclo anual típico de las zonas montañosas de Colombia, este comportamiento es marcado en la zona alta del Macizo de Santander, ver Figura 3. Se observan dos épocas lluviosas con períodos secos intercalados, el primero de estos períodos secos se inicia a finales de diciembre y finaliza en marzo, el segundo período se inicia a finales de junio y finaliza a mediados de agosto. En las zonas bajas de la cuenca el

comportamiento varía un poco, presentándose lluvias significativas en el mes de julio.

La precipitación varía entre los 700 mm/año y los 2200 mm/año siendo la precipitación media de la cuenca de 1280 mm/año. La distribución espacial de la lluvia se puede observar en Maradei, Rojas (2002).

VARIACIÓN ANUAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CSR LEBRIJA

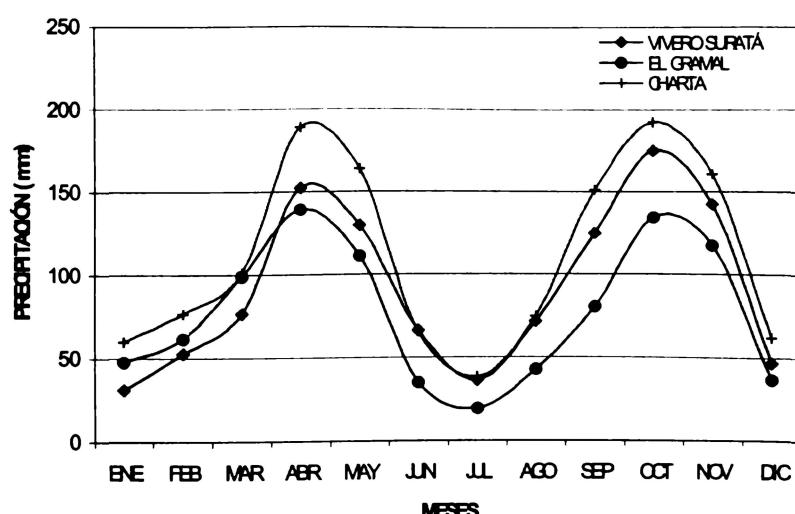


FIGURA 3. Variación de la precipitación anual.

La Evapotranspiración promedio (Mendoza y Sandoval, 2002) de la cuenca está alrededor de los 658 mm/año.

3. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de materiales de edad precámbrica correspondientes a las rocas metamórficas e ígneas del Macizo de Santander; además se destacan las rocas sedimentarias mesozoicas y depósitos cuaternarios. Se describen brevemente las rocas presentes.

3.1. Rocas ígneas y metamórficas

Las rocas del macizo son metamórficas (PE) con intrusiones y diques. De acuerdo con las dataciones realizadas, el Neis de Bucaramanga se considera de edad precámbrica y se encuentra localizado al oriente de la falla de Bucaramanga, constituyendo la parte occidental

del macizo de Santander. También se presentan intrusiones de roca ígnea principalmente cuarzomonzonitas, como es el caso de la cuarzomonzonita de La Corcova y la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara

Las rocas metamórficas, se exponen en la parte oriental del área de estudio, en las pendientes más altas. Se tiene tres tipos de rocas metamórficas: neises, esquistos y anfibolitas. En la parte occidental del macizo, las masas ígneas (JRcg) corresponden a granitos, sienogranitos y dioritas muy compactas pero bastante fracturadas.

3.2. Rocas sedimentarias

En la región se encuentran suprayaciendo las rocas ígneas metamórficas del macizo o subyaciendo los depósitos aluviales o formando mesas. Las formaciones sedimentarias presentes están claramente identificadas en los estudios geológicos publicados. El comportamiento de estas rocas respecto al almacenamiento de agua

subterránea puede ser variable, poseen características de casi impermeables a permeables; algunas de ellas presentan algunos materiales altamente fracturados.

3.3. Depósitos cuaternarios

La meseta de Bucaramanga localizada al occidente de la zona de estudio es una depresión tectónica cuyo origen es una cuenca de tracción, es decir una zona hundida con relación a la falla Bucaramanga-Santa Marta y la falla del Suárez. Esta zona ha sido rellenada por material aluvial proveniente de las quebradas que nacían en el Macizo de Santander y atravesaban el área que al cambiar de pendiente formaban los llamados conos de deyección. Hacia la zona de Floridablanca y Piedecuesta existen aportes de sedimentos provenientes del sur y occidente. En las cumbres del Macizo de Santander también se encuentran depósitos cuaternarios al igual que en vertientes y fondos de valle.

Los sedimentos que constituyen la meseta se diferencian en niveles debido a su contenido litológico, el nivel superior o nivel de limos rojos, el nivel intermedio o miembro gravoso y el nivel inferior o miembro órganos.

El principal rasgo estructural de la zona lo constituye la falla de Bucaramanga, la cual es inversa y de rumbo sinstral, y cuya característica neotectónica más notoria es la posición de las rocas del macizo sobre un deposito cuaternario como consecuencia de un corrimiento subparalelo y ramificado. Localmente la zona presenta numerosas familia de diaclasas asociadas a las anteriores fallas, las cuales presentan direcciones y buzamientos predominantes (Beltrán. y Rey, 2002, Vergara, 2003). A partir del estudio de diaclasas en la zona de la Falla de Bucaramanga, se ha concluido que existen líneas de flujo preferenciales a lo largo de los principales rasgos estructurales presentes, desde la zona del Macizo de Santander hacia las zonas aluviales, lo cual ayuda a transportar parte de la recarga hacia los acuíferos de las formaciones aluviales. Gómez, 2003 y Gómez et al. 2004.

4. MÉTODOLOGIA

Con el fin de iniciar el estudio de la recarga en la región, se realizó un muestreo isotópico sobre la Meseta de Bucaramanga, sus zonas aledañas, y el Macizo de Santander, se tomaron muestras de agua subterránea de pozos y cisternas de la zona aluvial, la Meseta y zonas

de descarga de los acuíferos, como drenes, afloramientos y manantiales. Para analizar la variación isotópica estacional de la región y observar una primera línea meteórica regional, se tomaron muestras de aguas lluvias integradas mensuales, durante un periodo de invierno y durante un periodo de verano, desde octubre del 2002 hasta marzo del 2003. Estos periodos se escogieron con base en el comportamiento del ciclo anual de las lluvias en la región. Para evaluar la función de entrada en el sistema (composición isotópica de la lluvia) se instalaron tres estaciones colectoras de precipitación en las localidades del Diviso, 1950 m.s.n.m, Estación UIS 1018 m.s.n.m y La Cumbre 1008 m.s.n.m, la primera al oriente de la zona de la Falla de Bucaramanga, sobre el Macizo de Santander y las dos restantes en zonas aluviales localizadas al norte y sur de la zona de estudio respectivamente, igualmente se tomaron muestras representativas de aguas lluvias en manantiales localizados alrededor de los 2600 m.s.n.m.

Los análisis isotópicos de ^2H y ^{18}O se llevaron a cabo en el laboratorio de Isótopos Ambientales de la Comisión Chilena de Energía Nuclear y los análisis de tritio en laboratorios de Estados Unidos. Las muestras se tomaron siguiendo el procedimiento técnico para el muestreo de precipitación (muestras integradas).

Los resultados obtenidos se expresan como δ (variación de la relación isotópica respecto a un patrón) definido como:

$$\delta = 1000 \frac{R_s - R_p}{R_p} \text{ ‰}$$

Donde:

δ : Desviación isotópica en ‰

R_s : Relación isotópica muestra.

R_p : Relación isotópica patrón internacional (SMOW)

R: relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

El patrón utilizado es Viena Standard Mean Ocean Water, Craig, 1961.

Para el proceso de análisis de ^3H (Tritio) se utilizó el enriquecimiento electrolítico. Posteriormente la muestra se midió por espectrometría de centelleo líquido. Las concentraciones de ^3H se expresan en unidades de tritio definidas como:

$$1 \text{ U.T.} = \frac{1 \text{ atomo de } ^3\text{H}}{10^{18} \text{ atomo de } ^1\text{H}}$$

y el error analítico es en promedio ± 0.5 T.

En total se muestraron 52 puntos, 27 para cada periodo, incluyendo muestras de agua subterránea de pozos y

aljibes de la zona aluvial, la Meseta y zonas de descarga de los acuíferos, como drenes, afloramientos y manantiales. Su localización se puede observar en la Figura 4.

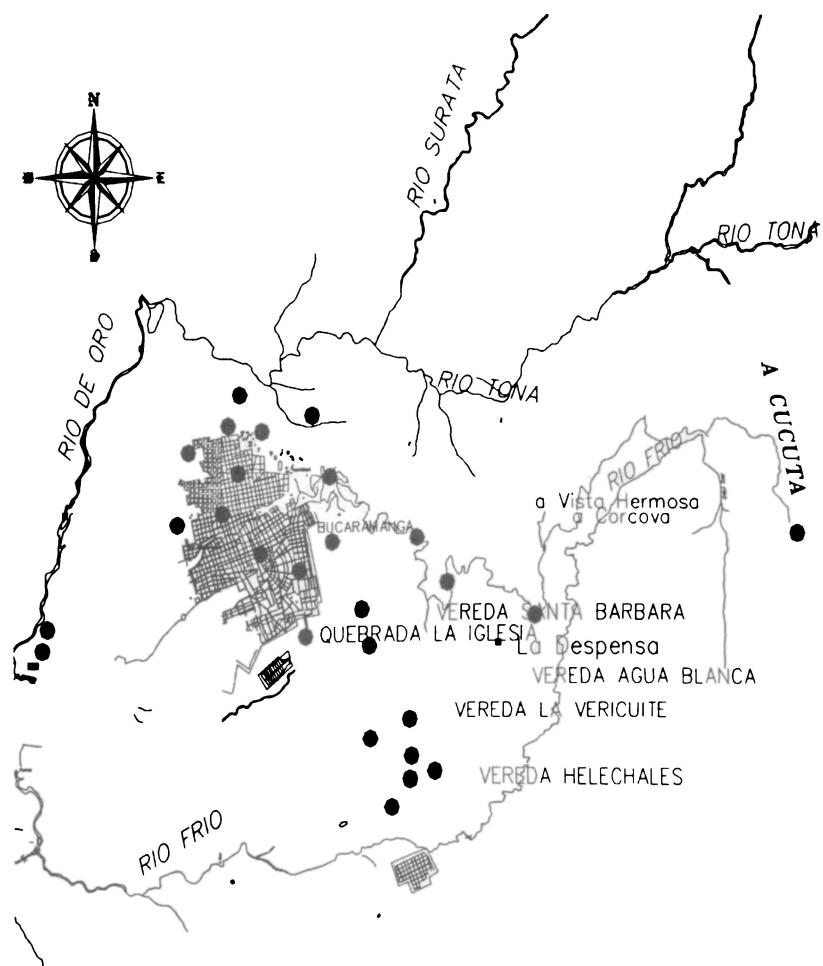


FIGURA 4. Localización de puntos de muestreo

5. ANÁLISIS DE ISÓTOPOS ESTABLES.

Con los resultados obtenidos de isótopos estables se realizó el siguiente análisis a las aguas meteóricas, aguas subterráneas en drenes, afloramientos, aljibes y pozos profundos así:

Análisis de Aguas Meteóricas: Se analizaron 12 muestras de aguas de precipitación localizadas a diferentes elevaciones, las cuales varían entre la cota 1000 y la 2600 m.s.n.m. Las muestras de precipitación se tomaron en sitios sobre la meseta de Bucaramanga y sitios a lo largo del Macizo de Santander. Otros valores de δD

y $\delta^{18}\text{O}$ que complementan los anteriores se tomaron entre las cotas 2600 y 3200 m.s.n.m, en un estudio anterior (Navia y Suárez, 1994).

La correlación para las muestras tomadas se ajusta a una línea recta de ecuación:

$$\delta D = 7.9 * \delta (\text{O}18) + 10.5. \quad \text{Factor } R^2 = 0.986$$

La Figura 5 muestra el diagrama que relaciona las desviaciones isotópicas δD (Deuterio) y $\delta^{18}\text{O}$. En ella se incluye la recta meteórica mundial de ecuación $\delta D = 8 \delta \text{O}18 + 10$, a la cual se ajustan la mayoría de las precipitaciones muestreadas.

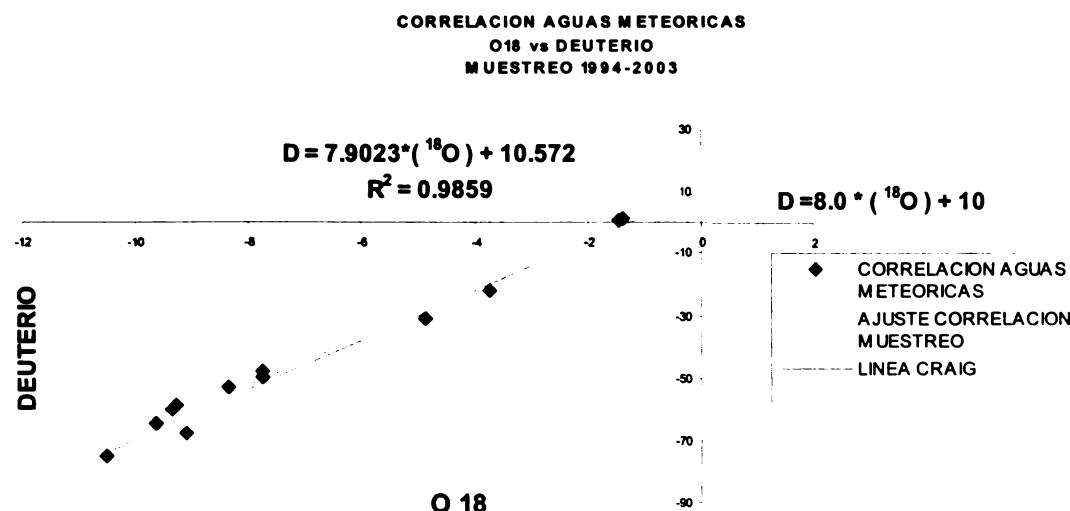


FIGURA 5. Aguas Meteóricas vs. Correlación de Craig

De la comparación del comportamiento isotópico de las aguas meteóricas con la recta de Craig, es posible identificar las precipitaciones producto de la condensación de masas húmedas oceánicas y las precipitaciones originadas por condensación de masas húmedas continentales.

La composición isotópica de las precipitaciones que ocurren sobre los continentes depende de la historia del agua, que se inicia en el momento de evaporarse en el océano y termina cuando se colecta la muestra. A medida que la nube avanza, va perdiendo agua por condensaciones sucesivas hasta que el frente nuboso pierde su actividad de fraccionamiento isotópico. Puesto que las moléculas pesadas HDO y H₂¹⁸O condensan de forma preferente, la nube se va empobreciendo en estas dos especies moleculares. Esto hace que las precipitaciones tengan valores más negativos a medida que nos alejamos de la fuente de producción de vapor. Es por ello que lluvias propias de condiciones continentales presentan una pendiente menor a 8 o interceptos menores a 10. De igual forma precipitaciones de origen oceánico presentan pendientes mayores a 8 o interceptos mayores a 10. Ver IAEA, 1978.

Dos comportamientos de la precipitación pueden identificarse en la región de investigación, el primero está relacionado con las lluvias de tipo orográficas muestreadas a lo largo del Macizo de Santander, el segundo con las lluvias convectivas muestreadas en el área de la meseta de Bucaramanga y alrededores.

Los valores de precipitación sobre la meseta tanto en invierno como en verano parecen estar influenciados por masas húmedas convectivas provenientes de masas oceánicas donde las desviaciones tanto de ¹⁸O como de D, son más positivas. En las muestras de invierno (Meseta de Bucaramanga), las muestras aparecen a la derecha de la recta de Craig, esto se puede notar en la Figura 6 y prácticamente sobre la recta meteórica característica de la región caribe Colombiana (Hoyos et al, 1992). Este comportamiento se acentúa en verano y muestra valores de desviaciones tanto de ¹⁸O como de D muy positivas características de fuentes oceánicas.

En cuanto a las precipitaciones muestreadas a lo largo del Macizo de Santander, en su mayoría se agrupan en torno a la recta meteórica para la cordillera Oriental que según Hoyos et al., 1992, está dada por la ecuación: $D = 12.46 + 8.32 * (^{18}\text{O})$. Las precipitaciones en esta zona podrían ser producto de la combinación de frentes húmedos del Caribe con otros procedentes de la Amazonía y Orinoquía.

Además de lo anterior, se puede observar que las muestras de precipitaciones tomadas en invierno son algo más negativas, que las tomadas en verano, esto puede tener explicación en la menor temperatura ambiente en invierno y mayor temperatura en verano. Al ser inversamente proporcional el coeficiente de fraccionamiento isotópico con la temperatura, las precipitaciones de la mayor parte de los puntos del planeta son más negativos en invierno que en verano. En este caso se observa diferencia entre el régimen de invierno y verano de las lluvias de la región. Ver Figura 6.

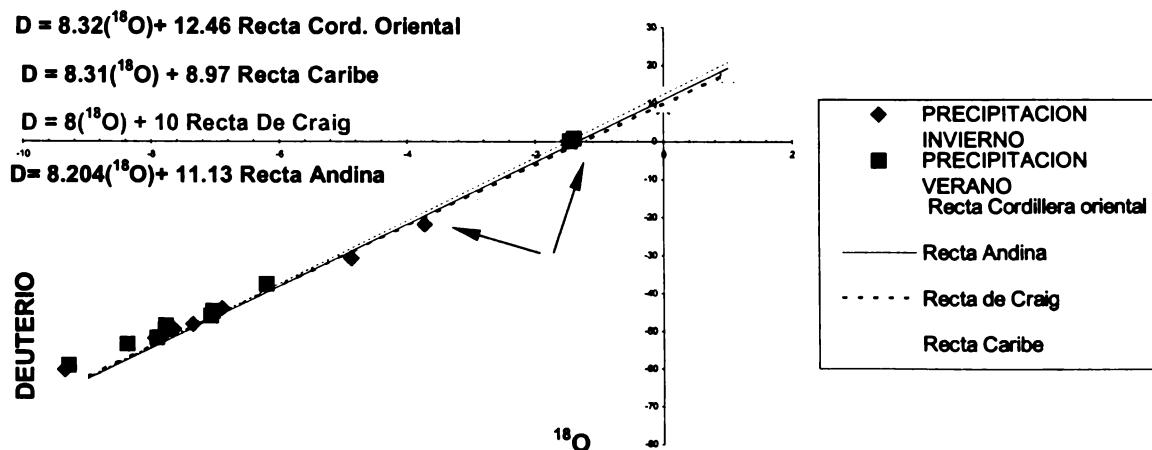


FIGURA 6. Ajuste de la precipitación con las diferentes rectas nacionales

El efecto de altitud (derivado de la mayor velocidad de difusión de las moléculas ligeras en la atmósfera durante el desarrollo vertical de las nubes y del aumento de la condensación del vapor de agua a medida que disminuye la temperatura, hace que las precipitaciones de cotas más elevadas sean más negativas) en las precipitaciones del Macizo de Santander, presenta tasas de cambio del orden de 0.3 a 0.35 por mil para ^{18}O y de 2 a 2.5 por mil para D para cada 100 metros de diferencia de altitud. Este efecto se observa en las Figuras 7 y 8.

Análisis Drenes y afloramientos Sobre la Escarpa occidental en la meseta de Bucaramanga: El comportamiento presentado en las Figuras 7 y 8 que correlacionan oxígeno 18 y Deuterio contra elevación tanto para invierno como para verano, permite deducir lo siguiente:

1. El agua muestreada en los drenes de la escarpa occidental presenta valores isotópicos diferentes a los que presentan las aguas lluvias tomadas en la meseta de Bucaramanga, no se puede relacionar con las precipitaciones datadas sobre la meseta o pensar que estas precipitaciones son las que recargan el sistema acuífero principal asociado a la meseta.
2. Las muestras tomadas de los drenes, presentan un contenido isotópico, muy similar, como puede apreciarse en las figuras, esto sugiere un origen común para las aguas drenadas de la meseta.
3. El agua que recarga el sistema del acuífero superior de la meseta, y que ha sido muestreada en los drenes de la escarpa occidental y aljibes, procede de precipitaciones o mezclas ocurridas entre las

cotas 1950 a 2100 aproximadamente. Un afloramiento de agua subterránea localizado al sur oriente de la meseta, tiene un comportamiento isotópico similar al de los drenes de la escarpa occidental.

4. El intervalo de altura entre 1950 a 2100 m.s.n.m en el Macizo de Santander, coincide con las elevaciones propuestas para el óptimo pluviométrico en la Cuenca Superior del Río Lebrija, y la geología que le corresponde en un corte geológico es la roca ígnea llamada Cuarzomonzonita de la Corcova.

Análisis Cuerpos de agua evaporables (Lago del Cacique): En la Figura 9 se observa el comportamiento atípico que representa la muestra del lago del Cacique, sus valores son muy positivos, y se encuentran a la derecha de la línea de Craig, lo cual indica que son aguas sometidas a procesos de evaporación constantes.

Análisis de los pozos profundos: Los dos pozos profundos muestreados en las zonas bajas se encuentran localizados en diversas formaciones geológicas y presentan resultados algo diferentes al resto de aguas subterráneas muestreadas en la meseta, la zona de recarga parece encontrarse algo mas alejada. En las Figuras 7 y 8, estos pozos están representados por triángulos localizados mas a la derecha del grafico.

El pozo de bombeo localizado en la zona nor oriental (profundidad 70 metros) sobre el miembro órganos de la formación meseta, presenta las desviaciones mas negativas, lo cual significa que su origen (recarga) ocurre

aproximadamente entre las cotas 2300 y 2700 m.s.n.m, un poco mas alejada que las aguas que afloran en los drenes de la meseta.

El pozo de bombeo construido en predios de jardines La Colina (Profundidad 60 metros) y localizado en el Neis de Bucaramanga de origen precámbrico, presenta desviaciones isotópicas similares a las de los drenes de la escarpa occidental y su recarga se encontraría entre las cotas 1900 y 2200 m.s.n.m.

El pozo de bombeo construido en ciudad norte al noroccidente de la meseta (profundidad 60 metros) es representativo de un acuífero mas profundo, presenta desviaciones un tanto mas bajas que las aguas datadas en los drenes, su recarga se encontraría entre las cotas 1800 a 2000.

El pozo artesiano construido en predios de Terpel, en Chimitá al occidente de la meseta y localizado sobre una terraza aluvial presenta un comportamiento isotópico similar al anterior pozo, la zona de posible recarga se encontraría entre los 1450 m.s.n.m y los 1800 m.s.n.m. Cabe anotar que en esta zona puede existir influencia de la recarga proveniente de otras zonas, como la mesa de Lebrija.

Análisis de aljibes: Se tomaron muestras en el barrio La Cumbre al sur de la meseta y en el Barrio Galán al occidente de la misma.

El aljibe del barrio Galán localizado a los 650 m.s.n.m (zona occidental), presenta un comportamiento isotópico similar al de los drenes de la escarpa, lo cual indica que la zona de recarga se encuentra entre los 1950 m.s.n.m y los 2100 m.s.n.m. Los resultados de aljibes y afloramientos localizados alrededor del Barrio La Cumbre (zona sur oriental) indica que la zona de recarga se encuentra entre los 1300 y los 1500 m.s.n.m, así como el pozo de Albania localizado en la zona oriental de la meseta sobre la Falla de Bucaramanga.

La muestra de La Malaña (zona nororiental de la meseta), la cual fue tomada directamente sobre la fisura en una roca cercana a la quebrada, presenta desviaciones más altas, la zona de recarga estaría entre los 1700 y 1800 m.s.n.m.

Ánálisis de manantiales: Se muestraron manantiales localizados entre las cotas 940 y 1380, al respecto cabe anotar, que al ser cuerpos de agua evaporables, su memoria isotópica tiende a sufrir ligeras variaciones, en proporción a la evaporación actuante. Tres de los puntos muestreados, evidencian una tendencia (La Aurora, La Flora, Suratoque) en función del fenómeno orográfico (a mayor altura, mayores desviaciones isotópicas), lo cual puede representar relación con las aguas lluvias de esas zonas.

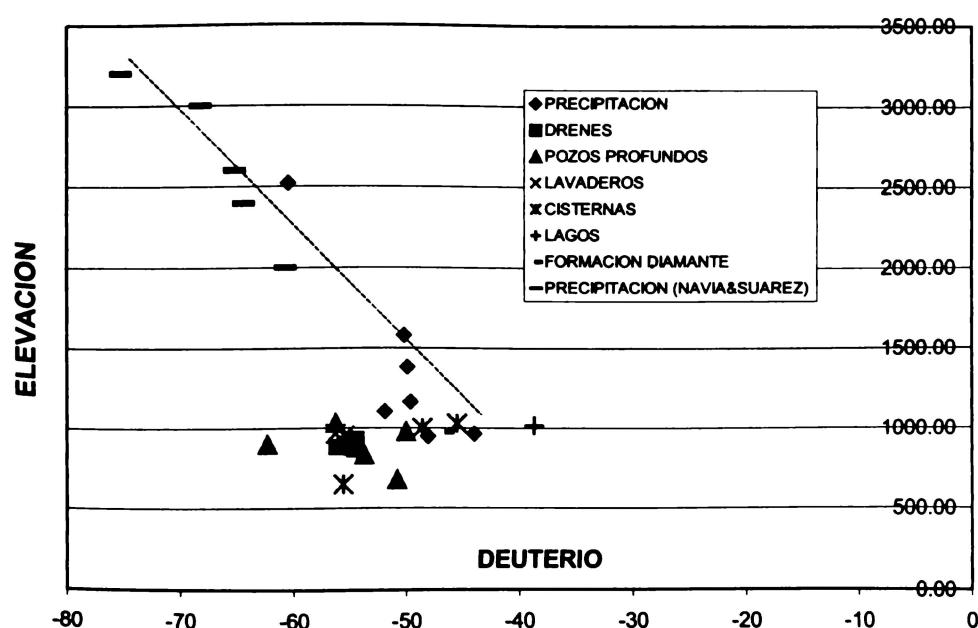


FIGURA 7. Elevación vs. Deuterio (invierno)

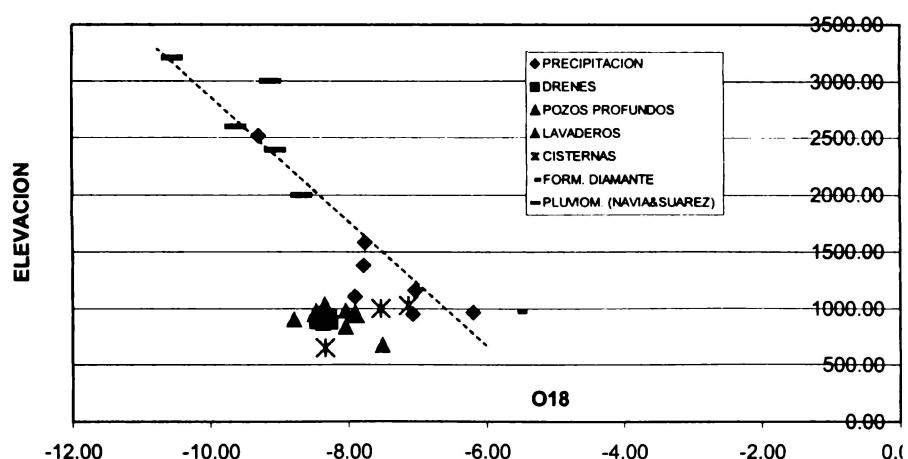


FIGURA 8. Elevación vs. Oxígeno 18 (verano)

CORRELACION UTILIZANDO TODOS LOS PUNTOS MUESTREO

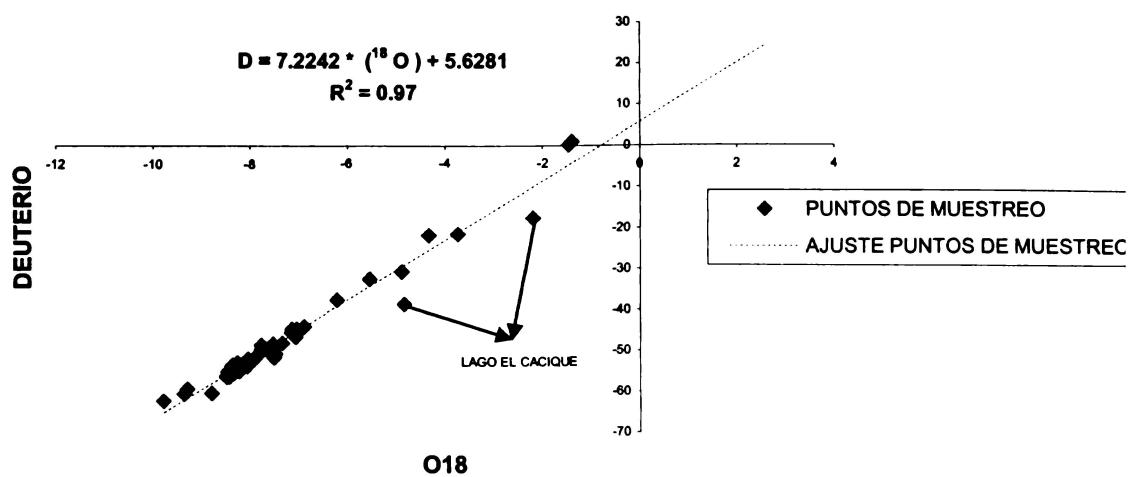


FIGURA 9. Correlación de todos los puntos del Muestreo

6. ANALISIS DEL MUESTREO DE TRITIO

El laboratorio del US Geological Survey fue el designado por la IAEA (International Atomic Energy Agency) para llevar a cabo los análisis de tritio. Analizada en total 11 once muestras para tritio los resultados son los siguientes:

TABLA 1. Resultados de Tritio

| MUESTRA | CLASE | H ³ UT | ERROR H ³ |
|-----------------------------|------------------|----------------------|-------------------------|
| Quebrada La cascada zmga | Precipitación | 3 | 0.6 |
| Ciudad Norte Pozo de Bombeo | Pozo de Bombeo | 0.1 | 0.5 |
| Terpel - Chimita | Pozo Artesiano | 0.4 | 0.5 |
| Lavadero San FSCO. | Pozo de Bombeo | 2.4 | 0.5 |
| Estación La Cumbre | Precipitación | 2 | 0.5 |
| Jardín La Colina | Pozo de Bombeo | 0 | 0.5 |
| Estación Oriental Trans. | Pozo de Bombeo | 0.1 | 0.5 |
| Lavadero la Cumbre | Cisterna | 2.7 | 0.6 |
| Q. El Carmen | Quebrada | 2.1 | 0.5 |
| Barrio La Esmeralda | Calizas Devonico | 0.3 | 0.5 |
| Piezómetro la Flora | Piezómetro | 1.9 | 0.5 |

La confrontación de estos resultados con la curva de decrecimiento del tritio en el hemisferio sur y en Colombia, IAEA, 2001, permiten identificar tres comportamientos diferentes en la zona de estudio:

Un primer grupo formado por los pozos profundos de Ciudad Norte, La estación oriental de transportes y Jardines la Colina, el cual se caracteriza por presentar bajos valores de tritio entre 0.0 y 0.4, son valores que corresponden a épocas en las cuales no existía el tritio en la atmósfera (muy cercanas o anteriores a las explosiones atómicas). La zona de recarga para estos puntos desde los resultados de isótopos estables, oscila aproximadamente entre los 2000 y 2600 m.s.n.m, que son los sitios de recarga mas alejados identificados en este trabajo, por lo tanto podría existir correspondencia entre estos bajos valores de tritio y un mayor tiempo de residencia en la cuenca. Esta es una hipótesis que se puede plantear a partir de los resultados obtenidos, sin embargo se requiere hacer pruebas de carbono 14 para constatar que no se trata de la existencia de paleo climas en la región de estudio. De cualquier manera estos puntos corresponden a pozos profundos que pueden compartir aguas de un acuífero mas profundo.

Un segundo grupo correspondiente a aguas superficiales presenta valores de tritio mayores a 1.9, estas son las muestras tomadas en aljibes y piezómetros, ambos localizados sobre el acuífero superior de la meseta o aguas superficiales de sitios alrededor de ella. Los análisis de Deuterio y Oxígeno 18 indican que la zona de recarga para esta agua se encuentra entre los 1300 y 1800 m.s.n.m aproximadamente, alturas mas bajas que las correspondientes al primer grupo. Podría pensarse en este caso en tiempos de residencia menores que corresponden a distancias menores de recorrido de las aguas subterráneas desde su sitio de recarga.

Los valores de tritio 3 y 2 respectivamente son representativos de aguas mas nuevas, en este caso corresponden a las aguas lluvias datadas, estos puntos constituyen el tercer grupo. Los valores muestran cierta diferencia que podría estar relacionada con los resultados de isótopos estables de las aguas lluvias, las cuales parecen mostrar dos comportamientos diferentes, un comportamiento orográfico de las precipitaciones en el Macizo de Santander y un comportamiento convectivo en las precipitaciones de la meseta, sin embargo esta hipótesis debe ser estudiada posteriormente.

7. MODELO CONCEPTUAL DE RECARGA

A partir de las anteriores consideraciones se proponen algunas hipótesis, que plantean varias zonas de recarga o mezcla de ellas, ubicadas sobre el Macizo de Santander. Se puede hablar de una primera zona de recarga ubicada entre los 1800 m.s.n.m y los 2200 m.s.n.m para los puntos de aguas subterráneas tomados sobre la meseta de Bucaramanga y al occidente de la meseta. Figura 10. La formación geológica asociada a esta zona es cuarzomonzonita, que se caracteriza por presentar permeabilidad primaria y también secundaria debido a fallamientos presentes en la zona.

Una segunda zona de recarga ubicada a menor altura, entre los 1300 y los 1500 m.s.n.m para la zona sur del área de estudio (aljibes y afloramientos), la formación geológica asociada es el Neis de Bucaramanga, especialmente fracturado y meteorizado en esta zona. Una tercera zona de recarga entre los 2300 m.s.n.m y los 2700 m.s.n.m para un pozo profundo localizado también en la zona sur. Las formaciones geológicas asociadas corresponden al Neis y Cuarzomonzonita de las anteriores zonas.

La recarga de los acuíferos de Bucaramanga se puede explicar como la mezcla de la infiltración de las aguas lluvias precipitadas entre los 1800 y 2200 m.s.n.m, donde se localiza un óptimo pluviométrico. En esta zona las condiciones geológicas para la infiltración son favorables. El flujo del agua infiltrada hacia la meseta, se facilitaría debido al marcado fracturamiento del macizo caracterizado por familias de fallas y el intenso diaclasamiento de las rocas ígneas y metamórficas del Macizo de Santander. La Falla de Bucaramanga favorece el paso del agua subterránea infiltrada en la zona alta del Macizo de Santander hacia los acuíferos aluviales conformados por la meseta de Bucaramanga y sus alrededores, este flujo ocurre a través de sistemas de fallas y diaclasas asociadas al gran sistema de la Falla de Bucaramanga, ver Gómez et al, 2004.

En las Figuras 7 y 8 se observa que existe un contenido isotópico similar, en muestras de drenes sobre la escarpa occidental, lavaderos y aljibes localizados sobre la meseta de Bucaramanga que pueden correlacionarse con muestras de manantiales y precipitaciones localizadas entre los 1800 m.s.n.m a los 2200 m.s.n.m; además como se observó anteriormente, la variación del contenido

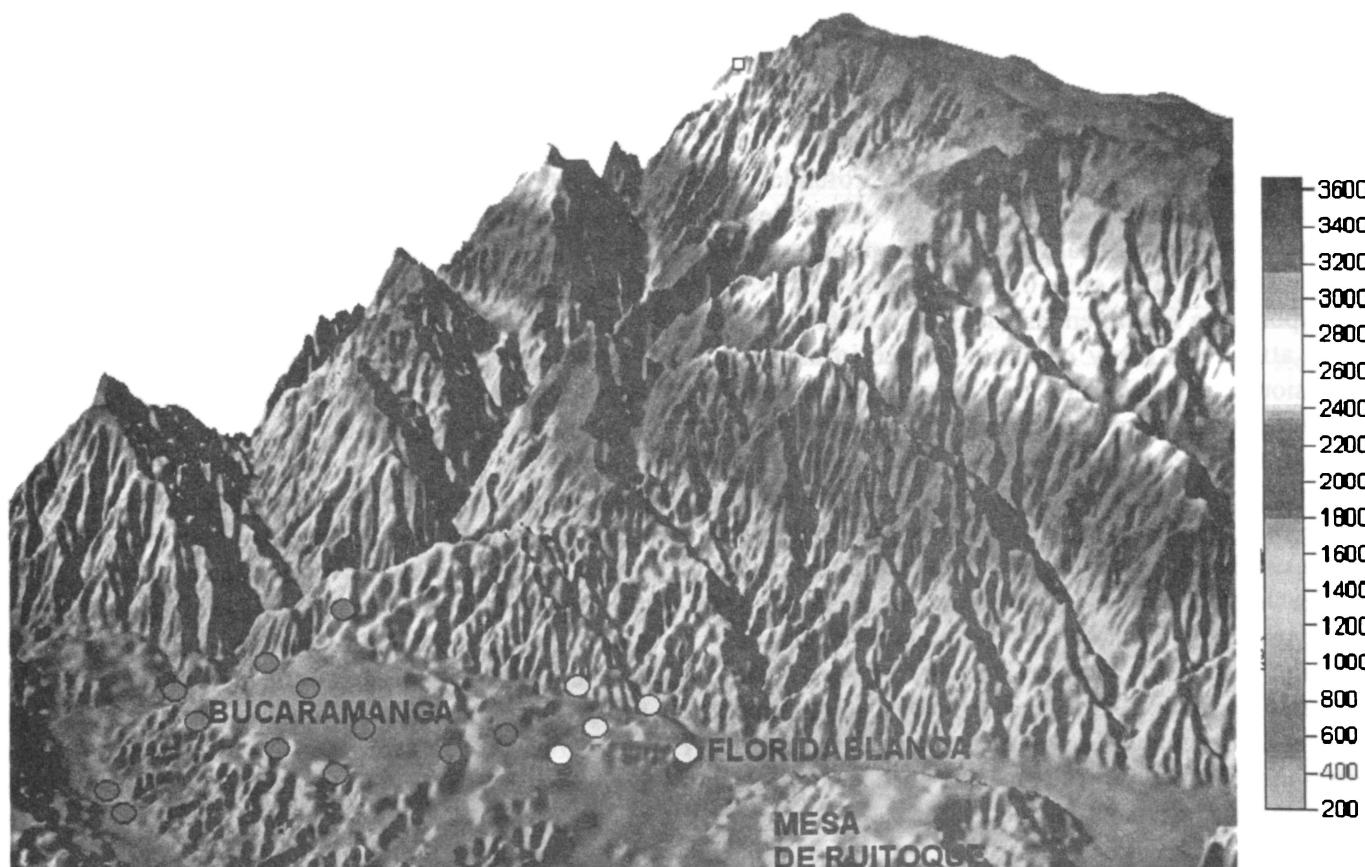


FIGURA 10. Correlación Isotópica entre los puntos muestreados en la zona aluvial y las elevaciones en el Macizo

isotópico con respecto a la altura, indica que el agua captada en los drenes construidos, no se origina en la zona vecina de estas estructuras, sino alrededor de los 1800 a 2200 m.s.n.m en la zona del Macizo, esto permite suponer que existe una conexión casi directa por el sistema de discontinuidades antes descrito, entre contribuciones de infiltraciones ocurridas en cotas elevadas y los acuíferos de Bucaramanga.

Las zonas de recarga 2 y 3 al sur del área de estudio, se caracterizan por presentar una geología compleja, con fuerte fallamiento (Fallas Bucaramanga – Santa Marta, Batatas, Trinidad, La Cumbre), que conlleva a diversos afloramientos de rocas en superficie de diversas edades geológicas, desde el Precámbrico, carbónico, jurásico, hasta el cuaternario. (Formación Diamante, Girón, Jordán, Macizo de Santander). Ver Gómez, et al. 2003. La zona de recarga 2 alimentaría las aguas localizadas alrededor del cerro de la Cumbre, El Carmen y La Formación Diamante (calizas). Este sistema complejo

de acuíferos identificado en la zona sur de este estudio, debe ser estudiado con mayor profundidad.

La zona de recarga 3 parece evidenciar una línea de flujo más profunda que la producida por la zona de recarga 2, la cual alimentaría el acuífero mas profundo de la zona sur occidental muestreado en el pozo llamado de la Transversal Oriental, la edad del agua en este sitio datada con el tritio corresponde a aguas mas antiguas que las del acuífero superior de la meseta, por lo tanto empieza a aparecer evidencia de la existencia de mas de un acuífero en la región.

8. CONCLUSIONES

El muestreo y análisis de los isótopos estables del agua realizado en la región de Bucaramanga incluyó aguas lluvias medidas entre la meseta de Bucaramanga y el Macizo de Santander y aguas subterráneas medidas en puntos representativos de diferentes acuíferos. A partir

de una línea meteórica obtenida entre alturas 1008 y 3200 msnm, se concluye que el agua subterránea presente en los acuíferos de la formación Bucaramanga, no proviene de las lluvias locales, sino de infiltraciones ocurridas en la parte alta del Macizo de Santander. Lo anterior permite suponer que existe una conexión a través del sistema de discontinuidades (diacasas y fallas) presente en el Macizo de Santander, entre aguas de infiltraciones ocurridas en cotas elevadas y los acuíferos de Bucaramanga.

Se han planteado tres posibles zonas de recarga o mezcla de ellas, la primera entre los 1800 y los 2200 m.s.n.m que recargaría las aguas subterráneas de la Meseta, desde la Quebrada La Iglesia en el sur, hasta la Quebrada La Malaña en el norte y al occidente este efecto se extendería hasta el Río de Oro. Una segunda zona de recarga entre los 1300 y los 1500 m.s.n.m que alimentaría las aguas del cerro de la Cumbre, el Carmen y las calizas de la formación Diamante. Finalmente una tercera zona de recarga entre los 2300 y los 2700 m.s.n.m que evidenciaría un flujo más profundo el cual recargaría los acuíferos profundos de la zona sur. Por lo tanto la recarga en la región de Bucaramanga proviene de la infiltración ocurrida en el Macizo de Santander desde largas distancias. Las formaciones geológicas asociadas a estas zonas de recarga son favorables para la infiltración, sin embargo se requieren estudios geológicos y estructurales detallados que permitan observar rutas preferenciales de flujo y corroborar las zonas de recarga. Se deben realizar otros muestreos isotópicos que permitan corroborar las hipótesis anteriores y mejorar el modelo conceptual de recarga.

Comparando la recta meteórica o recta de Craig con los datos obtenidos en el análisis isotópico, Figura 8, se observa que estos siguen el mismo comportamiento, $\delta D = 7.9 * \delta(^{18}O) + 10.5$, lo cual significa que los resultados son validos y representativos de la precipitación de la zona de estudio. Se evidencian dos procesos de precipitación en la zona de estudio, uno de tipo orográfico sobre el Macizo de Santander que en su mayoría se agrupan en torno a la recta meteórica para la cordillera Oriental dada por la ecuación: $\delta D = 12.46 + 8.32 * \delta (^{18}O)$. Las precipitaciones en esta región, son producto de la combinación de frentes húmedos del Caribe con otros frentes probablemente procedentes de la Amazonía y Orinoquía. Parece existir otro proceso de tipo convectivo sobre la Meseta de Bucaramanga, proveniente

de masas oceánicas donde las desviaciones tanto de O^{18} como de D, son más positivas. Las muestras de precipitaciones tomadas aparecen a la derecha de la recta de Craig y prácticamente sobre la recta meteórica característica de la región caribe Colombiana. En la región se debe estudiar la existencia de dos regímenes de lluvia mediante muestreos mensuales de isótopos y correlación con procesos de generación de lluvias.

Desde los valores encontrados de tritio parece existir aguas muy jóvenes y aguas menos jóvenes, asociadas al acuífero superior e inferior de la meseta de Bucaramanga, esto corrobora la existencia de dos aguas subterráneas de diferentes edades y por lo tanto diferentes acuíferos. Podría existir correspondencia entre los valores bajos de tritio y un mayor tiempo de residencia y viceversa. Esta hipótesis se plantea a partir de los resultados obtenidos en la investigación, sin embargo se requiere hacer pruebas de carbono 14 para constatar que no se trata de la existencia de paleo climas en la región de estudio.

9. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos: Se agradece a OIEA, COLCIENCIAS, UIS, CDMB Y CAMB, el apoyo ofrecido a este trabajo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Baonza, E., Plata, A. y Silgado, A., 1982. Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia. Cuadernos de Investigaciones, C7, CEDEX. Madrid. 139 Pág.
- Beltrán R, y Rey A., 2002. Comportamiento estructural asociado al sistema e Fallas Bucaramanga – Santa Marta y diacasas, para definir una red de drenaje subterráneo en el Macizo de Santander, sección entre Piedecuesta (Río de Oro) y Bucaramanga (Río Surata). Proy. de Grado. Geología. UIS.
- Craig, H., 1961. Isotope variations in meteoric waters. Science, 133.
- CDMB., 1981. Estudio integral de la Cuenca Superior del Río Lebrija, Tomo I y II, editado por Jaime Ramírez Rivera.

- CAMB – UIS., 2002. Caracterización Hidrogeológica y patrones de flujo a través de las diaclasas en el macizo de Santander, con fines de abastecimiento de agua. Informe Final. Bucaramanga.
- Custodio E y Llamas M., 1996. Hidrología Subterránea. Tomo 2. Barcelona Ediciones Omega. 1269 pag.
- GNIP (Global network for isotopes in precipitation). Internat. Atomic Energy Agency, Viena.
- Gómez S., 1991. Predicción de niveles freáticos a partir e la precipitación y su influencia en la estabilidad de taludes. Caso de aplicación meseta de Bucaramanga. Tesis de Maestría Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Gómez S. y Vargas W., 2002. Precipitación en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Informe Técnico. Grupo en Preedición y Modelamiento Hidroclimático, GPH. UIS.
- Gómez S. y Zambrano, J., 2002. Caracterización hidrogeológica y patrones de flujo a través de las diaclasas en el Macizo de Santander, con fines de abastecimiento de aguas. Informe Técnico. CAMB.
- Gómez, S, Zambrano, J., Beltrán, R. y Rey, A., 2004. Caracterización estructural del Gneiss de Bucaramanga en la zona de la Falla de Bucaramanga, para identificar sistemas de flujo subterráneo. Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. Medellin.
- Gómez S. y Colegial J.D., 2003. Interacción entre los sistemas hidrogeológicos en el macizo de Santander para el estudio de la recarga e identificación de acuíferos. Informe de Investigación. Grupo en Preedición y Modelamiento Hidroclimatico UIS - Colciencias.
- Hoyos F., Velásquez E. y Vélez J., 1992. Variación regional en la composición isotópica en el agua lluvia en Colombia. XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. X Seminario nacional de Hidráulica e Hidrología.
- Hoyos F. y Vélez, M. V., 1998. Determinación Mediante Isótopos Ambientales de Zonas y Mecanismos de Recarga en el Departamento de Risaralda Colombia. 4° Congreso Latinoamericano de Hidrología. Subterránea. Montevideo.
- IAEA/WMO, 2001. Global Network for Isotopes in Precipitation. GNIP Database: <http://isohis.iaea.org>
- IAEA., 1978. New Technique of in-situ soil-moisture sampling for enviromental isotope analysis applied at pilat sand dune near Bordeaux – HETP modelling of bomb tritium propagrion in the unsaturated and saturated zones. IAEA – SM –228/37 isotopes Hidrology Vol II.. 753 págs.
- Julivert. M., 1963. Los rasgos tectónicos de la región de la sabana de Bogota y los mecanismos de formación de las estructuras, Bucaramanga. En Boletín de Geología UIS No 13 – 14. p.1-104.
- .Maradey, Z, Rojas, 2002. Distribución espacial de variables hidrológicas en la Cuenca Superior del Rio Lebrija utilizando geoestadística. Proyecto de Grado. Universidad Industrial de Santander.
- Mendoza R. C y Sandoval S R., 2002. Un estudio de oferta hídrica en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Proyecto de Grado UIS.
- Navia D M y Suárez N M., 1994. Aplicación de isótopos en Hidrologia. Proyecto de Grado UIS.
- Vergara, O., 2003. Prospección geológica para aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas del macizo de Santander, sector oriental de Bucaramanga. Proy. Grado-Geología. Universidad industrial de Santander.
- Ward D. E., 1973. Geología de los Cuadrángulos H12 y H13. En Boletín Geológico. Vol XXI Numero 1-3 Ingeominas.