



## **Recarga hidrogeológica y concentración de gas asociado al carbón (cbm) - sinclinal de Umbita (Colombia)**

### **Hydrogeological recharge and coal-bed methane (cbm) concentration - Umbita syncline (Colombia)**

**Jorge Eliecer Mariño Martínez., Yessica Eliana Araque Sanabria, Yessica Andrea Meneses Medina**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Sogamoso.

#### **Resumen**

Estudios sobre contenidos de CBM en el sinclinal de Úmbita (Boyacá) encontraron valores de gas de hasta 308 pie<sup>3</sup>/t a profundidades de 411 m, en carbones de rango bituminoso C y sub bituminoso B, siendo estos contenidos de los mayores reportados en el altiplano Cundiboyacense. Debido a que los carbones no se consideran de alto rango y se ubican a poca profundidad, se establece la hipótesis sobre concentración de metano debido a recarga hidrogeológica, puesto que en otras cuencas del mundo se ha demostrado que el flujo del agua transporta y acumula CBM. Para el desarrollo del proyecto se realizó un análisis hidrogeológico, en el que se tuvieron en cuenta parámetros geológicos, hidrológicos, geomorfológicos, hidrogeoquímicos, así como aspectos relacionados con la formación generadora de CBM. El área se dividió en dos zonas principales, Pozo Úmbita 1 y Pozo Chinavita 1. Los análisis hidrogeoquímicos mostraron que el agua presenta composiciones bicarbonatadas sódicas, sulfatadas magnésicas y bicarbonatadas magnésicas con contenido iónico similar entre muestras de precipitación y de la mina Usillo. Finalmente se compararon los resultados encontrados en la zona de estudio con otras cuencas generadoras de CBM, donde se obtuvo similitud en la composición química del agua y el rango del carbón.

**Palabras clave:** Gas metano asociado al carbón (CBM), hidrogeología, recarga, hidrogeoquímica, modelo hidrogeológico. Colombia.

#### **Abstract**

CBM contents studies in the Úmbita syncline (Boyacá) found gas values up to 308 ft<sup>3</sup>/t, in depths of 411 m, in bituminous C and subbituminous B coals, these are the highest contents reported in the Cundiboyacense plateau. Although the coals are not considered of high range and are located in shallow depths, it is necessary to consider the hypothesis about methane accumulations for hydric recharge, since other basins around the world have demonstrated that recharged water flow transported and accumulated CBM. For the development of the project a hydrogeological analysis was done, which included geologic, hydrologic, geomorphologic, hydrogeochemistry parameters, and also included aspects related to CBM's formation. The study area was divided in two zones denominated Umbita 1 well and Chinavita 1 well. In the hydrogeochemistry analysis, the water presents sodium bicarbonates, magnesium sulfates and magnesium bicarbonates with Ionic content similar between samples of

precipitation and of the main mine. Finally, the results are compared with others generated by CBM basins around the world, which have obtained similar results in water geochemical composition and coal range.

**Keywords:** Coalbed methane (CBM), hydrogeology, recharge, hydrogeochemistry, hydrogeological model, Colombia.

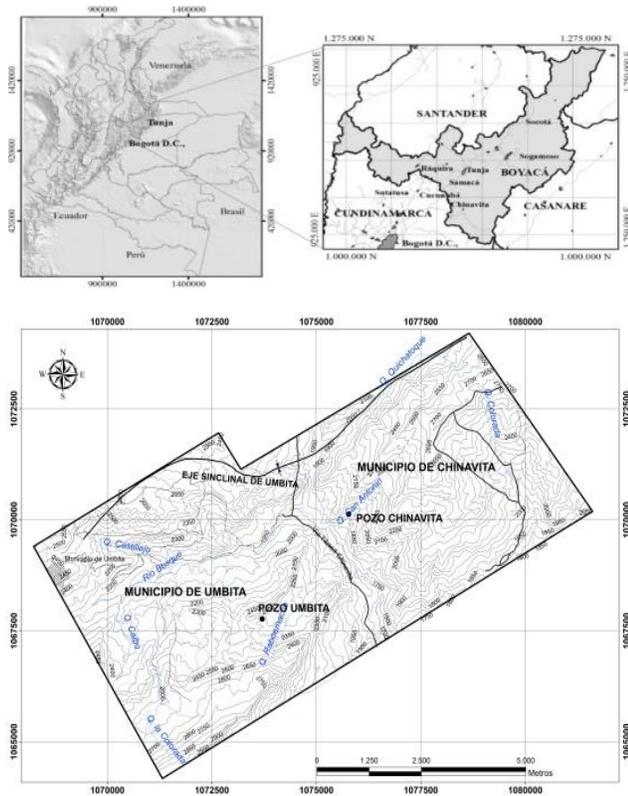
## INTRODUCCIÓN

El consumo de gas en Colombia ha aumentado en los últimos años al mismo tiempo que disminuyen las reservas por lo que se están buscando fuentes adicionales de gas (UPME, 2015). El gas asociado al carbón (CBM) es una de las fuentes que se debe considerar. Los estudios preliminares de CBM adelantados en el interior del país indican que los contenidos de gas no son altos y que se deben estudiar los lugares con las condiciones ideales donde el gas se haya concentrado y los contenidos sean mayores (Mariño et al., 2015).

Estudios recientes han demostrado que el agua ejerce presión para mantener el gas in situ, adicionalmente la hidrogeología afecta a la distribución de los contenidos de gas bajo la superficie y también influye en la composición del gas y sus orígenes (Kaiser and Ambrose, 1992). Los mantos de carbón pueden actuar como acuíferos regionales si se tienen condiciones aptas de permeabilidad, una constante recarga de las partes altas y una continuidad en las capas. Los aspectos de vital importancia a estudiar son permeabilidad, presión, dirección de flujo, hidrogeoquímica, recarga y temperatura (Kaiser *et al.*, 1994).

El gas metano asociado al carbón (CBM) es un gas hidrológico, y por consiguiente el flujo de agua de formación juega un papel importante en el mantenimiento y la productividad de los reservorios de CBM (Li *et al.*, 2015). Los avances en cuanto a la relación entre hidrogeología y acumulaciones de CBM se han realizado alrededor del mundo, en cuencas como: San Juan (Colorado – Nuevo México), Alberta (Canadá) y Ordos (China) (Kaiser and Ambrose, 1992; Bachu and Michael, 2003; Li. *et al.*, 2015). Específicamente, en la cuenca de San Juan que es considerada como una de las más prolíficas del mundo, en las zonas sobrepresurizadas por efecto de la recarga, los contenidos de gas son altos (560 pies<sup>3</sup>/ton) porque se armonizan los factores geológicos e hidrogeológicos (Moore, 2004). En la Cuenca Powder River (Wyoming, USA) a pesar de que los carbones son lignitos, contiene altos contenidos de gas por efecto de la recarga, y por el efecto de las bacterias metanogénicas que se introdujeron en los carbones arrastradas por la recarga (Florez, 2004).

En Colombia no se ha avanzado mucho en cuanto a la relación entre la recarga y el contenido de gas. Sin embargo, en el sinclinal de Úmbita (Boyacá) se encontraron altos contenidos de gas en pozos de exploración que se comportaron como artesianos. Por lo anterior, se adelantó esta investigación sobre el flanco oriental del Sinclinal de Úmbita con el fin de determinar si existen las condiciones de recarga meteórica y concentración de gas que explique los altos contenidos de gas encontrados en la zona (Figura 1). El estudio se justifica por la necesidad que tiene Colombia de encontrar fuentes adicionales de gas.



**Figura 1:** Localización área de estudio. Hace parte del flanco oriental del sinclinal de Úmbita, entre los municipios de Chinavita y Úmbita, cubriendo un área de 63 Km<sup>2</sup>.

## MARCO GEOLOGICO

El estudio se centró sobre el flanco oriental del sinclinal de Úmbita entre los municipios de Úmbita y Chinavita a ambos costados de la carretera que une a Tunja con Garagoa. En el área de estudio se identificó una secuencia de rocas del cretáceo que comienza con la formación Une K1K2u (miembro superior), Chipaque K2cp, Grupo Guadalupe K2g que comprende las formaciones Dura K2d, Plaeners K2p, Labor y Tierna K2lt; supra yaciéndolas y en el límite con el Paleógeno se encuentra la formación Guaduas K2E1g marcando el límite entre la secuencia Cretácea y Paleógena, le sigue la formación Socha Inferior E1si, Socha Superior E1ss, Picacho E2p, Concentración E2E3co, siendo esta ultima el eje del sinclinal de Úmbita, finalmente se encuentran unidades inconsolidadas del neógeno de tipo coluvial. (Ver Figura 2). Esta estructura presenta en su flanco fallas de rumbo, siendo las más importantes la Falla del Rio Garagoa y la Falla el Uvero y fallas inversas como Falla el Volador. Aunque hacia la parte central del flanco oriental del Sinclinal de Úmbita se presentan inversiones del buzamiento o volcamiento, hacia profundidad el buzamiento se regulariza y buza normalmente hacia el NW. En esta forma la recarga del agua en los carbones finalmente se va hacia el NW y hacia el eje de la estructura. Varios de los carbones de la zona se acercan al metro de espesor y por lo tanto se midieron sus contenidos de gas (Tabla 1).

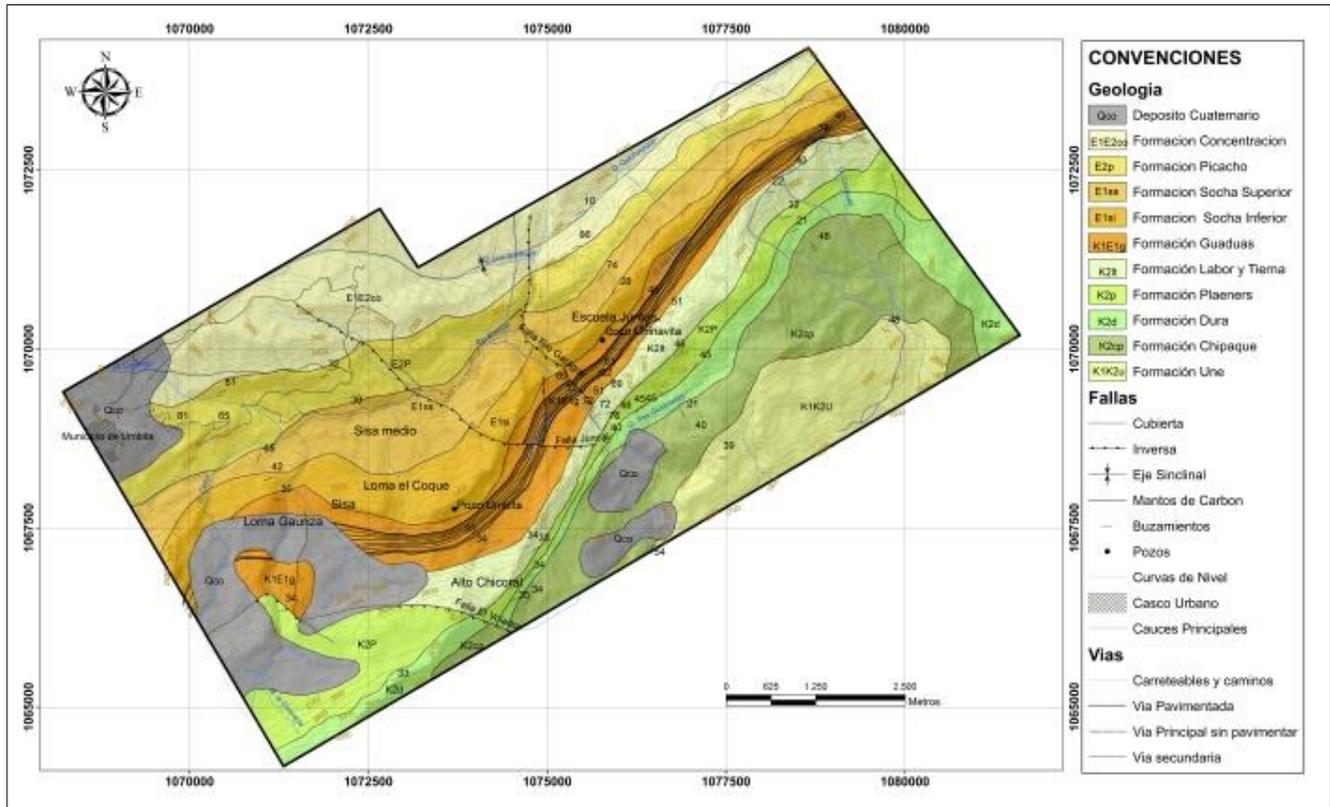


FIGURA 2. Geología del área y traza de los mantos de carbón en la Formación Guaduas.

## METODOLOGÍA

Como se sospecha un enriquecimiento de gas por efecto de la recarga hidrogeológica, se recolectó información existente en el área del sinclinal de Úmbita sobre geología, hidrografía, hidrología, hidrogeología, y contenido de gas metano asociado al carbón, conjuntamente con el SGC. Se realizó levantamiento de unidades geológicas, geomorfológicas, muestreo de agua para análisis químicos y físicos, inventario de puntos de agua, reconocimiento de unidades hidrogeológicas y finalmente una localización de los mantos de carbón. Se elaboró el mapa geológico e hidrogeológico a escala 1:25000 con sus respectivos perfiles; de igual forma se realizó una interpretación de unidades geomorfológicas, con el fin de identificar áreas de recarga. Para caracterizar hidrológicamente la zona se desarrolló un balance hídrico con el fin de encontrar la cantidad de agua infiltrada y de escorrentía producida en la zona, también se obtuvieron parámetros morfométricos de las microcuencas y subcuencas presentes. Posteriormente, las unidades litológicas se caracterizaron hidrogeológicamente. Para determinar la conexión hidrogeológica, se tomaron muestras de agua de la zona de recarga y en las zonas más bajas en quebradas y explotaciones mineras de carbón. Para cada una de las muestras se determinaron los iones de  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  y  $Fe^{2+}$ . Esto se hizo en con el cromatógrafo iónico para líquidos 761 Compact IC Metrom del Laboratorio de Química Ambiental de la UPTC-sede Sogamoso. A partir de los datos procesados se obtuvo el modelo hidrogeológico conceptual, el cual asocia zonas de evaporación, recarga, precipitación y escorrentía.

211

También se analizaron los contenidos de gas metano asociado al carbón en el Pozo Úmbita 1 y el Pozo Chinavita 1 (Tabla 1). De igual forma se caracterizó estructuralmente la zona, se describieron las áreas con mayor recarga para de esta forma plasmar la dirección del agua en la formación Guaduas.

Finalmente se elaboró un modelo hidrogeológico con énfasis en la afectación de la recarga en las acumulaciones de gas metano asociado al carbón para cada sector (Sector Umbita 1 y Sector Chinavita 1) Ver Figuras 9 - 11.

## **RESULTADOS Y DISCUSION**

Los resultados y los análisis de los mismos se analizarán secuencialmente, primero los contenidos de gas obtenidos en los pozos, posteriormente el balance hídrico y la hidrogeología en general, seguido por la hidrogeoquímica, y finalmente el modelo hidrogeológico conceptual.

### **Contenido de gas**

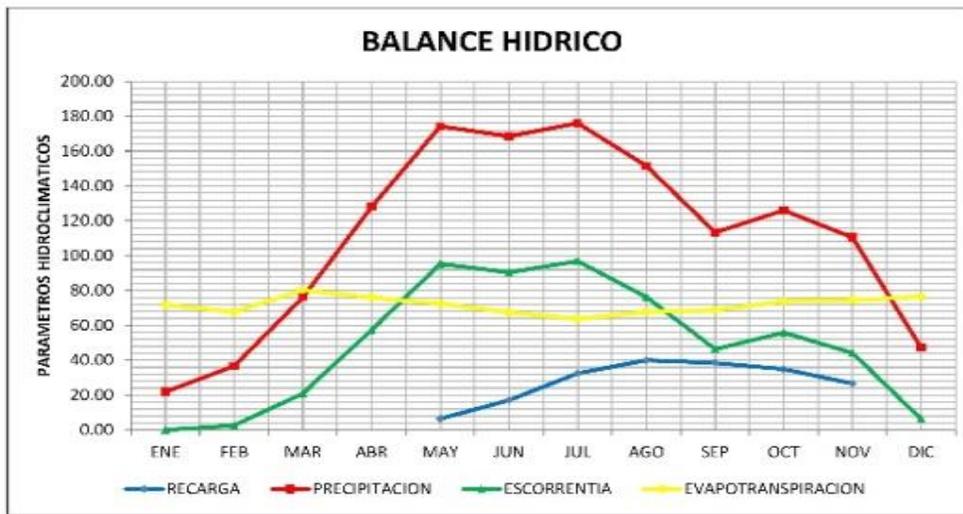
Se presentan los resultados en la Tabla 1 de cada una de las 13 muestras tomadas en el Pozo Chinavita 1 en la Vereda Usillo en el Municipio de Chinavita (Boyacá). La primera columna presenta la identificación de la muestra, seguido del espesor del manto, la profundidad y el gas total libre de cenizas en  $\text{pie}^3/\text{ton}$ . Los carbones fueron clasificados como bituminosos altos en volátil C y sub bituminosos B (clasificación ASTM), lo que los coloca dentro de la capacidad de generar metano termogénico y biogénico. Los contenidos de gases totales libres de cenizas en el pozo Chinavita 1 son relativamente altos ya que dos de las 13 muestras sobrepasan los  $250 \text{ pie}^3/\text{ton}$  y uno de ellos sobrepasa los  $300 \text{ pie}^3/\text{ton}$  a profundidades que están sobre 400 m de profundidad (Tabla 1). Por el contrario, los contenidos de gas en el pozo Úmbita 1 fueron relativamente bajos y ninguna de las 10 muestras sobrepaso lo  $60 \text{ pie}^3/\text{ton}$  a pesar de que las profundidades estaban cerca o sobre los 200 m.

**Tabla 1.** Valor de los contenidos de gas a diferentes profundidades en el pozo Chinavita 1.

Manto	Espesor (m)	Profundidad (m)	Gas Total (pies <sup>3</sup> /ton)
M13	1.22	233,0	90,4
M11	0.93	241,5	106,3
M11	0.93	243,0	169,3
M10	1.20	254,3	187,8
M9	1.47	282,0	109,9
M8	1.41	300,0	152,9
M7	1.00	333,5	149,3
M6	1.03	411,2	308,0
M5	1.00	417,0	88,3
M4	0.80	421,7	271,3
M3	1.43	475,7	50,2
M2	0.80	513,1	111,1
M1	1.61	526,3	43,6

#### 4.2 Balance hídrico y caracterización hidrológica

Para el desarrollo del balance hídrico se utilizaron los datos de 12 estaciones meteorológicas del IDEAM, durante un periodo de 21 años. Se tuvo en cuenta parámetros climatológicos como precipitación, evaporación, evapotranspiración, humedad relativa y temperatura a fin de hallar la cantidad de agua infiltrada y la escorrentía (Figura 3).



**FIGURA 3.** Gráfico de balance hídrico de la zona Úmbita-Chinavita. Se observa el comportamiento promedio de recarga, precipitación, escorrentía y evapotranspiración a lo largo del año.

De la Figura 3 es evidente que la mayor precipitación está entre los meses de mayo y noviembre, y que por lo tanto la mayor recarga de los acuíferos también se da durante estas épocas. La precipitación fluctúa entre 1447 y 1083 mm/año. El área de estudio presenta precipitación media de 1209 mm, temperaturas entre 16,2°C – 17,2°C, humedades relativas con valores de 82% a 84%, evaporación 950 a 175 mm y evapotranspiración 782 – 876 mm. Estos valores se obtuvieron a partir de cálculos realizados con los datos meteorológicos, e interpolación con la herramienta IDW del programa Arcgis. En cuanto a la escorrentía se tuvo en cuenta la cobertura vegetal presente en la zona y se determinó el número de curva (nc) según el método del Soil Conservation Service (1972), obteniendo un valor medio anual de 592 mm. Finalmente se obtuvo una recarga o infiltración de 196 mm y como se observa en la Figura 4 hacia la parte NE de la zona de estudio se presenta exceso hídrico que coincide también

214

con los altos contenidos de gas en el sector Chinavita.

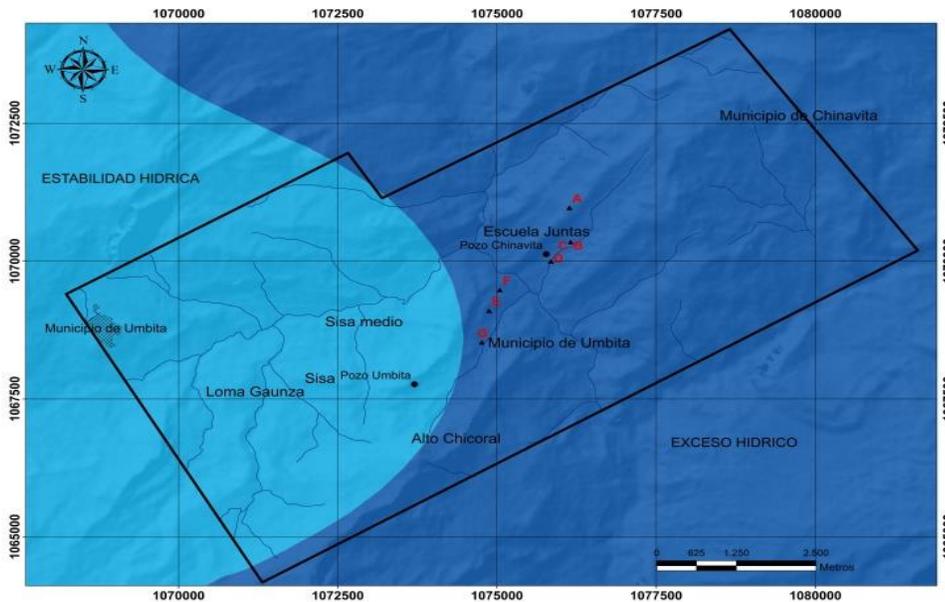


FIGURA 4. Mapa del balance hídrico de la zona Úmbita-Chinavita.

A partir de la litología de cada formación se realizó la caracterización hidrogeológica de la zona (Ver Tabla 2). Aunque la formación Guaduas se determinó como un acuitardo, en las zonas con presencia de areniscas guías y capas de carbón, por la porosidad primaria y permeabilidad secundaria se determinó que dichas zonas se pueden considerar como acuíferos.

**TABLA 2.** Caracterización hidrogeológica de las formaciones.

<b>FORMACIÓN</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>CARAC. HIDROGEOLÓGICAS</b>
Labor y tierna		
Socha inferior	Acuífero de porosidad primaria	Acuíferos que presentan porosidad y permeabilidad primaria que permite interconexión hidráulica.
Picacho		
Deposito coluvial		
Une	Acuífero de porosidad secundaria	Están restringidos a áreas fracturadas donde se genera porosidad y permeabilidad secundaria.
Dura		
Chipaque		Presenta porosidad y permeabilidad secundaria.
Plaeners		
Guaduas	Acuitardo	Debido a la presencia de areniscas y capas de carbón se consideras como transmisor y almacenador.
Socha superior		Presenta porosidad y permeabilidad secundaria.
Concentración		

### **Hidrogeoquímica**

Se tomaron siete muestras de agua (Ver Tabla 3) para sus correspondientes análisis fisicoquímicos.

**TABLA 3.** Parámetros Físicos de las muestras de agua tomadas en campo.

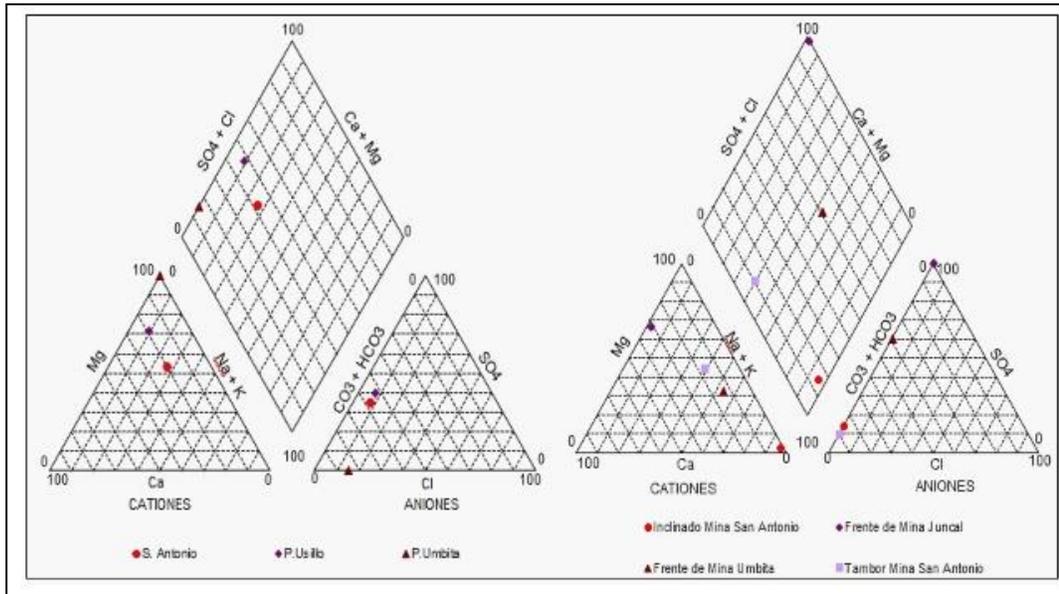
MUESTRA	LOCALIZACIÓN			CONDUCTIVIDAD µs/cm	T (°C)	Ph	T (°C)	DUREZA CALCIO	DUREZA MAGNESIO	DUREZA TOTAL
	NORTE	ESTE	ALT.							
1 QDA. SAN ANTONIO	1070091	1075866	1997	23,5	22,5	5,75	17,3	3,15	7,03	10,18
2 VEREDA USILLO PRECIPITACION USILLO	1070881	1075655	2133	18,2	22,5	5,31	18,3	2,6	8,13	10,73
3 PRECIPITACION UMBITA	1069100	1074877	2031	10	21,9	5,51	18,5	1,99	4,11	6,1
4 INCLINADO MINA SAN ANTONIO	1070349	1076157	2058	479	22,1	7,32	19,3	3,49	6,03	9,52
5 FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte Alta)	1068527	1074764	2028	959	23,1	2,86	19,2	82,33	148,08	230,41
6 FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte Baja)	1069478	1075045	1971	797	23,4	6,85	19,2	58,81	114,45	173,26
7 TAMBOR MINA SAN ANONIO	1070415	1076266	2073	180,8	22,9	5,61	18,8	18,52	43,04	61,56

Posteriormente se realiza una evaluación de los resultados químicos para verificar el grado de confiabilidad de la información. A partir de los contenidos iónicos (Ver Tabla 4) con sus respectivas conversiones, se realizaron diagramas de Piper, Stiff y Schöeller-Berkaloff, mediante los programas EasyQuim y Diagrammes, con el fin de observar las relaciones entre las muestras de agua de superficie y las muestras de agua en los mantos de carbón, caracterizar químicamente el agua y ver los iones predominantes en superficie y subsuelo Freeze and Cherry (1979).

**TABLA 4.** Parámetros químicos de las muestras de agua tomadas en campo.

NOMBRE	(F-)	(Cl-)	(NO <sub>2</sub> -)	(Br)	(NO <sub>3</sub> -)	(SO <sub>4</sub> )	(OH)	(CO <sub>3</sub> )	(HCO <sub>3</sub> )	(Fe)
QDA. SAN ANTONIO	0,000	0,772	0,000	0,000	0,000	4,878	0,000	0,000	10,200	0,000
VEREDA USILLO										
NACIMIENTO USILLO	0,000	0,686	0,000	0,000	0,000	4,896	0,000	0,000	8,160	0,000
NACIMIENTO UMBITA	0,000	1,071	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,200	0,000
INCLINADO MINA SAN ANTONIO	1,516	1,416	0,000	0,000	0,000	34,508	0,000	0,000	261,120	0,000
FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte alta)	0,311	0,842	0,000	0,000	1,744	422,831	0,000	0,000	0,000	53,796
FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte Baja)	0,478	2,148	1,005	0,000	2,329	240,447	0,000	0,000	197,880	31,053
TAMBOR MINA SAN ANTONIO	0,288	0,471	0,000	0,000	4,247	7,749	0,000	0,000	91,800	11,159
NOMBRE	<b>(Li)</b>	<b>(Na)</b>	<b>(NH<sub>4</sub>)</b>	<b>(K)</b>	<b>(Mg)</b>	<b>(Ca)</b>	<b>(Sr)</b>	<b>(Zn)</b>	<b>(Co)</b>	<b>(Ni)</b>
QDA. SAN ANTONIO	0,000	1,906	0,000	0,666	2,026	1,262	0,000	0,000	0,000	0,000
VEREDA USILLO										
NACIMIENTO USILLO	0,000	0,559	0,000	0,000	2,343	1,042	0,000	0,000	0,000	0,000
NACIMIENTO UMBITA	0,000	1,186	0,000	0,530	1,186	0,796	0,000	0,000	0,000	0,000
INCLINADO MINA SAN ANTONIO	0,000	127,709	0,000	2,532	1,739	1,398	0,000	0,000	0,000	20,629
FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte alta)	0,000	2,605	0,449	3,457	42,687	32,958	0,000	0,000	0,000	0,000
FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte Baja)	0,064	106,014	0,000	4,934	32,993	23,540	0,000	77,423	0,000	0,000
TAMBOR MINA SAN ANTONIO	0,000	21,050	0,000	3,317	12,407	7,412	0,000	0,000	0,000	17,772

En los diagramas de Piper (Ver Figura 5) se observa que las muestras de agua superficial presentan composición bicarbonatada magnésica, mientras que las muestras de agua de los mantos de carbón presentan composición bicarbonatada sódica y magnésica en las minas San Antonio de Usillo del municipio de Chinavita y Sulfatada Sódica y magnésica en las minas de Juncal municipio de Úmbita. Según los diagramas de Stiff (Ver Figura 6 y 7) las muestras de agua de precipitación muestran una alta correlación iónica con el agua de la quebrada San Antonio y con la mina Usillo, lo cual coincide con los resultados del diagrama de Piper. En el diagrama de Schöeller-Berkaloff (Ver Figura 8) se evidencia que el ion con menor contenido en las muestras es el Cl<sup>-</sup>, mientras que los demás iones analizados se presentan en cantidades variadas.



**FIGURA 5.** Representación de cationes y aniones según el diagrama de Piper para muestras de agua superficiales (Derecha) y frentes de mina (Izquierda)

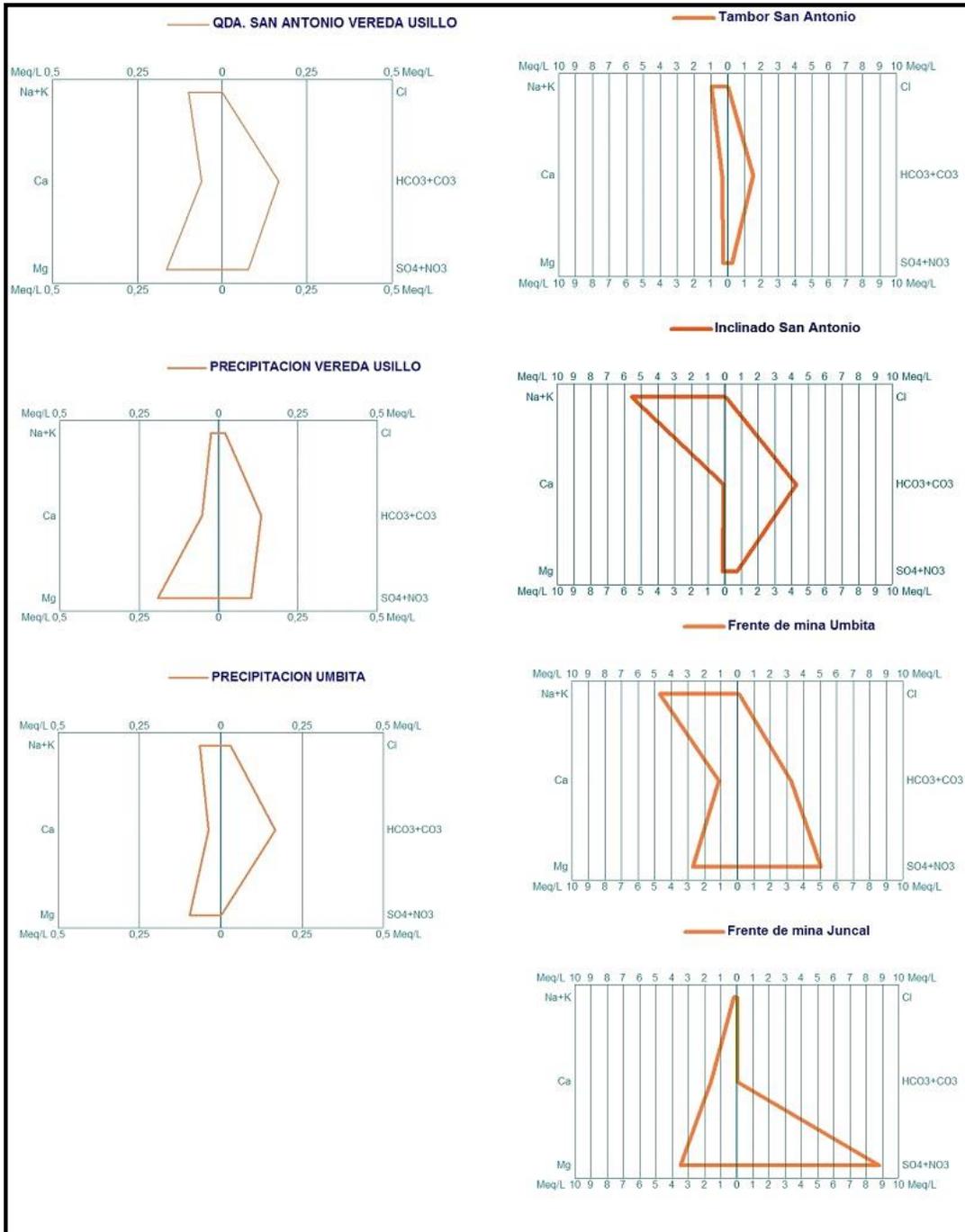
Según Freeze and Cherry (1979) las aguas producidas con metano asociado al carbón son ricas en bicarbonato, que es un producto directo de la disolución del carbonato por acción de agua de recarga oxigenada y por la reducción del sulfato en los procesos de fermentación del metano. Por lo tanto, en general en cuencas con esta composición podría existir la generación de gas biogénico, así mismo se observa en este tipo de aguas una disminución en el ion calcio y potasio. Por otra parte, Wayne and Van Voast (2003), afirman que en aguas con altos contenidos de sulfato las concentraciones de gas metano de procedencia biogénico son mínimas. La mayoría de las aguas de recarga encuentran y disuelven sulfato a lo largo de las líneas de flujo; en zonas donde son comunes los sulfuros. Como sucede en carbones de las cuencas de Montana, Dakota del Norte y Alberta, (Wayne and Van Voast, 2003) en estas las concentraciones de sulfato disuelto resultan de la aclimatación y oxidación de la pirita y la marcasita. Existen zonas en el mundo en donde, aunque en general las aguas son bicarbonatadas, en áreas específicas el sulfato es predominante por lo cual no hay evidencia de gas biogénico.

Teniendo en cuenta estos criterios se hace un análisis comparativo entre los resultados encontrados de la parte Noreste (Sector Chinavita) y Suroeste (Sector Úmbita) del área de estudio, debido a que en el primer sector se encontraron aguas con composición bicarbonatada, mientras que en el segundo son aguas sulfatadas. A los valores altos de CBM encontrados en los pozos Chinavita 1 y la composición bicarbonatada de las aguas podría suponer un origen biogénico de dichos gases. Sin embargo, es necesario profundizar en la investigación para que esta hipótesis sea verificada.

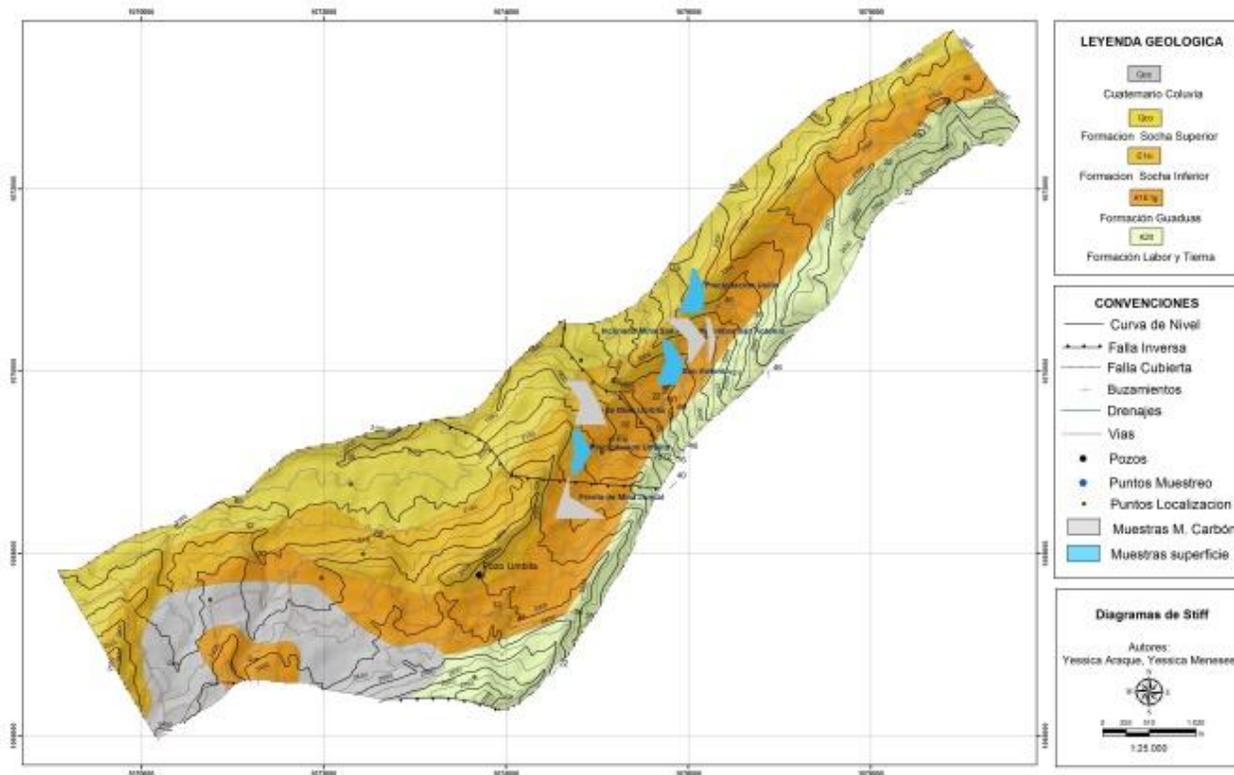
En la parte Noreste de la zona (Chinavita) se observa la predominancia del anión bicarbonato en las muestras, mientras que los contenidos de sulfato, magnesio y calcio son considerablemente bajos; cabe resaltar que esta zona tiene los mayores contenidos de metano según estudios del Servicio Geológico Colombiano ya que a una profundidad de 411,92 m presentan valores de CBM de 308,07 pie<sup>3</sup>/t (Mariño, 2014; SGC, 2014). En la parte Suroeste de la zona de estudio, sector de Úmbita, se encontró agua con composición predominantemente



sulfatada, así mismo aumentan los contenidos de calcio y magnesio, en este sector los contenidos de gas son inferiores, siendo el mayor contenido de metano  $60,85 \text{ pie}^3/\text{t}$ . a una profundidad de 189,40 m. Aunque en el sector suroeste los resultados coinciden con lo propuesto por Wayne and Van Voast (2003) es posible que el alto contenido de sulfato sea producto del estancamiento prolongado del agua en las minas. Según lo plasmado por otros autores (Li *et al.* 2015), dentro de una misma cuenca existen comportamientos hidrogeológicos diferentes. Aunque los datos arrojados en los análisis químicos son similares a los tomados en otras cuencas, es necesario realizar más estudios en cuanto a hidrogeoquímica, régimen de presiones y fracturas en los carbones.



**FIGURA 6.** Representación de Diagramas de Stiff para Muestras de Superficie (izquierda) y Muestras de mantos de carbón (derecha).



**FIGURA 7.** Localización de los diagramas de Stiff según la ubicación de las muestras de agua de superficie y de los frentes de mina.

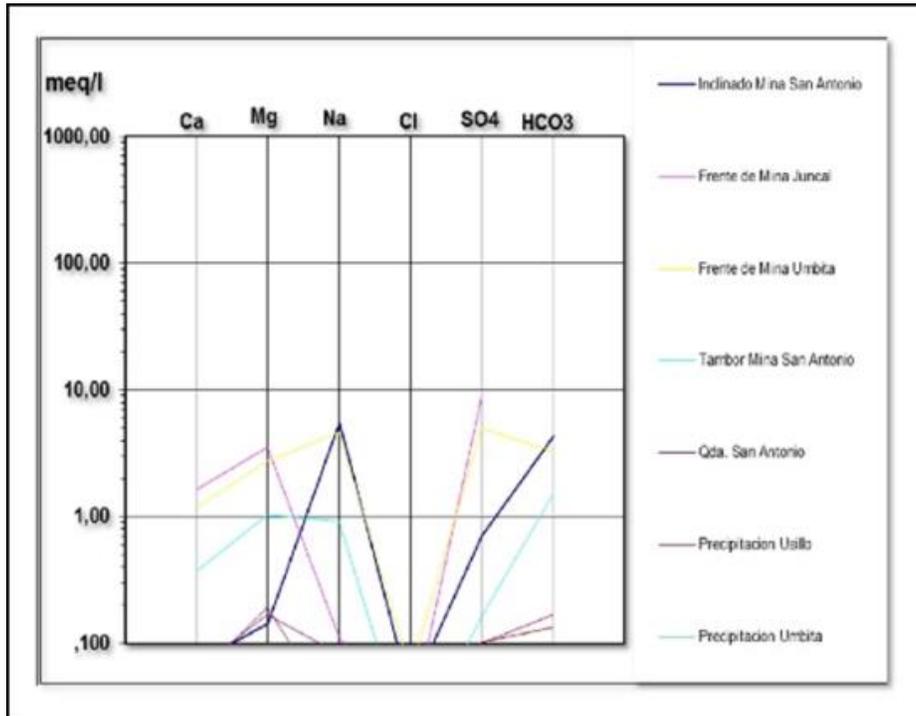
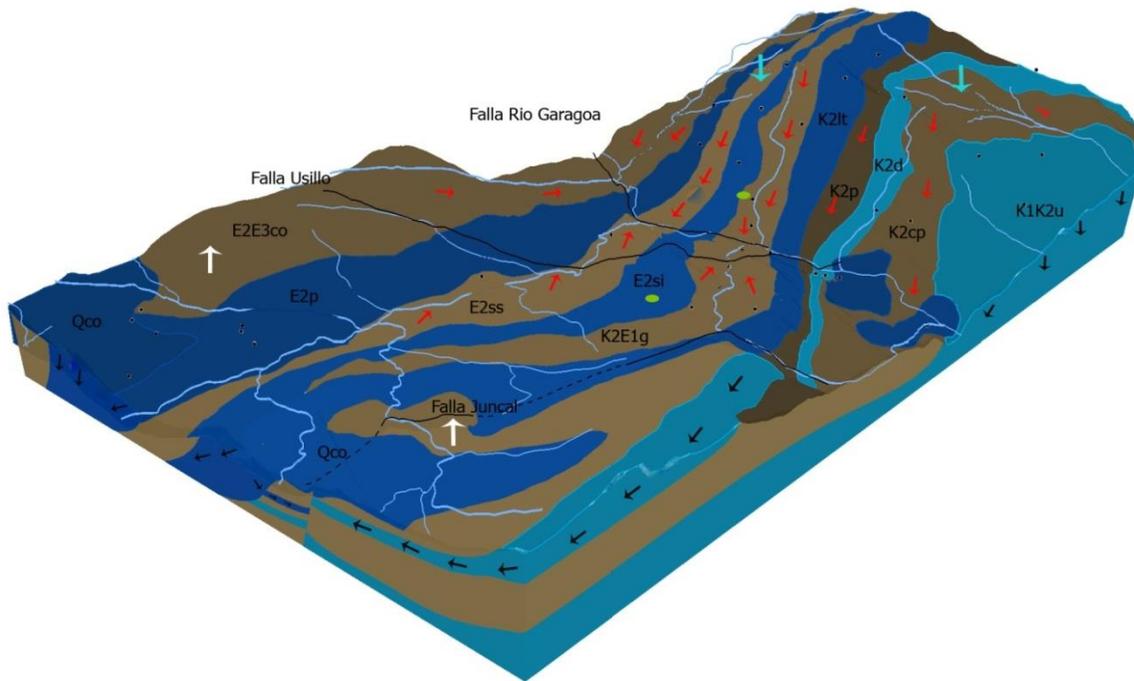


FIGURA 8. Diagrama de Schöeller-Berkaloff

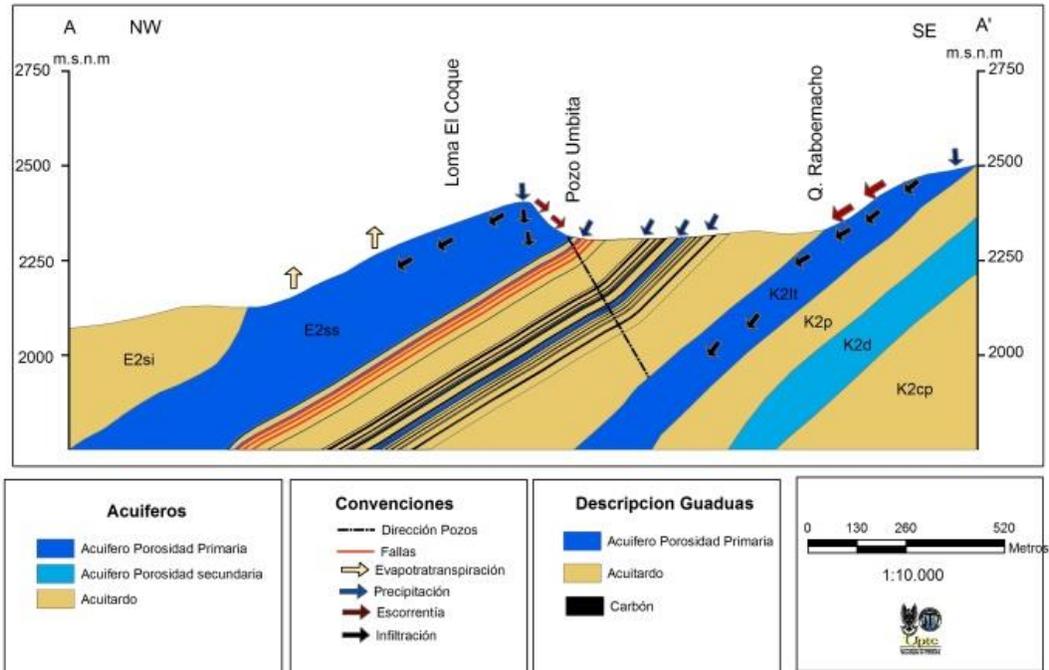
### Modelo Hidrogeológico Conceptual

En el modelo de la Figuras 4 y 9 se observa que las áreas de mayor precipitación están ubicadas en el municipio de Chinavita, hacia el costado NE del área de estudio, donde se presentan los niveles más bajos de evapotranspiración, logrando obtener así un mayor grado de escorrentía e infiltración, hacia el SW en el municipio de Úmbita se logra identificar una área con mayor número de acuíferos libres, esto porque se encuentran los depósitos cuaternarios que por su composición y estructura presentan un mayor grado de infiltración. Además, debido a que el área de estudio se encuentra sobre el flanco este del sinclinal de Úmbita permite que la infiltración se genere en sentido de la inclinación de las capas, y ya que se presentan formaciones con textura arenocilosa que tienen una permeabilidad mayor y se pueden alimentar los acuíferos de las formaciones Picacho, Socha Inferior, incluso el de la formación Dura. Con el desarrollo de los modelos de la Formación Guaduas mediante perfiles, se puede interpretar como el agua puede infiltrarse en la formación Guaduas, sobrepasar sus capas permeables y llegar hasta los mantos de carbón que debido a su alto fracturamiento tienen la capacidad de transportar y acumular grandes cantidades de agua (Figura 9-11). La recarga se presenta entre mayo y noviembre con la mayor intensidad en agosto. En los acuíferos se calculó una recarga de 5.057.588 m<sup>3</sup>/año y en las partes altas de 1.826.497 m<sup>3</sup>/año, para un total de 12.161.800 m<sup>3</sup>/año. Se sospecha, que dicha recarga ha permitido una concentración hidrodinámica del CBM por efecto de la sobrepresurización de ciertas zonas con presiones hidrostáticas mayores a las normales. Esa hidrodinámica, posiblemente generó gas biogénico por acción de las bacterias introducidas por la recarga (Kaiser *et al.*, 1994). Esto es algo que está por confirmarse con estudios isotópicos.



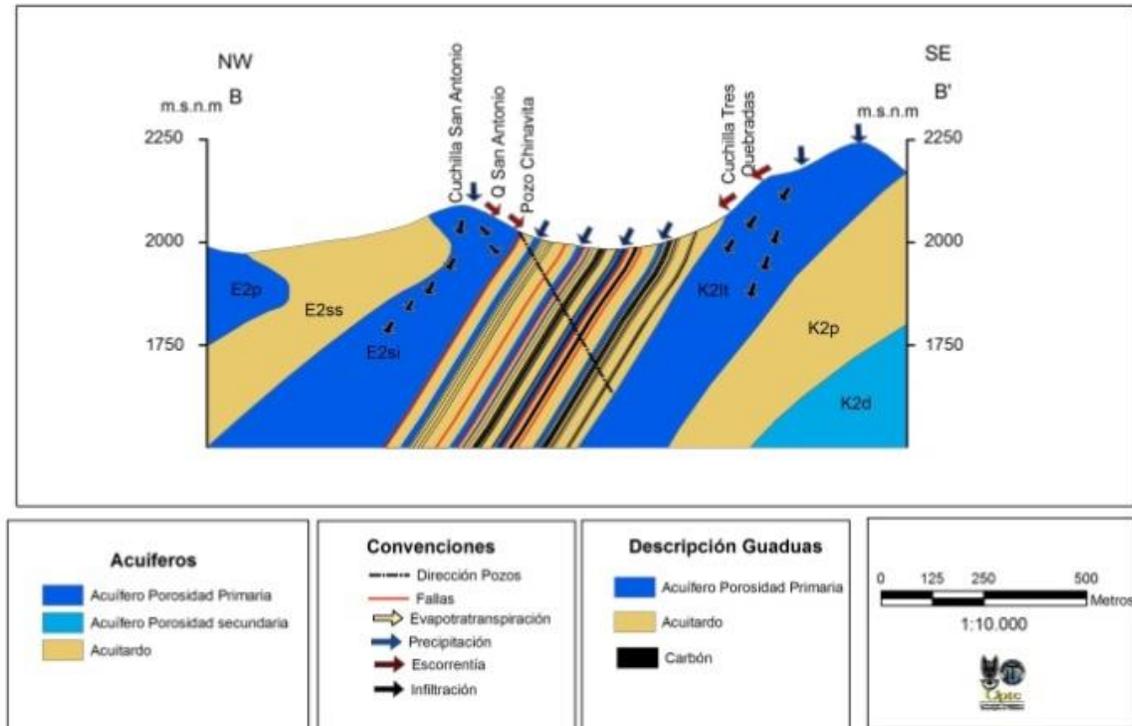
**FIGURA 9.** Modelo Hidrogeológico Conceptual Regional, en este se evidencia el comportamiento hidrogeológico regional de cada una de las formaciones geológicas, donde la Formación Guaduas (K2E1g) se caracteriza como Acuitardo.

PERFIL A - A' SECTOR UMBITA



**Figura 10.** Modelo Hidrológico Conceptual de la afectación de la recarga en la acumulación de CBM Sector Úmbita

PERFIL B- B' SECTOR CHINAVITA



**Figura 11.** Modelo Hidrogeológico Conceptual de la afectación de la recarga en la acumulación de CBM Sector Chinavita. Los matos de carbón y capas de arenisca de la formación Guaduas localmente se comportan como acuíferos.

**CONCLUSIONES**

El flanco este del sinclinal de Úmbita se encuentra en la cordillera oriental sobre una secuencia de rocas del cretáceo hasta el cuaternario, donde han sido afectadas por esfuerzos compresionales que ocasionaron el sinclinal y fallas de tipo inversa, que generan características favorables para la creación de acuíferos como los depósitos cuaternarios, las formaciones Picacho, Socha Inferior, Labor y Tierna; acuíferos de porosidad secundaria como Dura, Une y los carbones de la formación Guaduas.

Con la realización de diferentes perfiles geológicos e hidrogeológicos se determinó que, aunque se presentan volcamientos, hacia profundidad prevalece la inclinación de la estructura mayor (Sinclinal), permitiendo el flujo de las infiltraciones en sentido a la inclinación de las capas, alimentado así los acuíferos asociados a los mantos de carbón de la formación Guaduas.

Según la caracterización hidrometeorológica se determinó que hacia el municipio de Úmbita se presenta un menor grado de precipitación y mayor grado de evapotranspiración generando valores más bajos de humedad, contrario a lo que sucede hacia la parte NE del área de estudio en el municipio de Chinavita, además con el análisis de los

226

mapas hidrometeorológicos se observa una relación en el límite de cambio de valores que topográficamente corresponde a la ubicación del río Garagoa. En el área de estudio se presentan valores de precipitación anual entre 1447 y 1083 mm.

Se evidencia en el área de estudio que la recarga presenta una curva unimodal cuyo inicio se presenta en el mes de mayo, su pico más alto en el mes de agosto y finaliza en el mes de noviembre. Dicha infiltración presenta un volumen de  $\approx 2$  millones de  $m^3$ /año y en los acuíferos de  $\approx 5$  millones de  $m^3$ /año.

Los carbones presentes en el área se generaron por procesos de acumulación y enterramiento de sedimentos dentro de la etapa de catagénesis, así mismos fueron catalogados como bituminosos altos en volátiles C y Sub-bituminoso B, los cuales tienen la capacidad de generar  $CH_4$  de origen biogénico y termogénico, algunos de los contenidos de gas se consideran altos debido a la concentración hidrodinámica causada por la recarga, y al posible efecto de generación biogénico de gas metano por acción de las bacterias que acompañan la recarga.

Según los diagramas de Stiff se observan comportamientos similares en los contenidos iónicos de las muestras de precipitación con las muestras de la quebrada San Antonio y la Mina del usillo. Para el diagrama de Schöeller-Berkaloff los mayores contenidos iónicos en aguas superficiales corresponden a  $HCO_3$ , y para las muestras de mantos de carbón de Chinavita (Mina San Antonio), existe aumento de los iones  $HCO_3$ ,  $SO_4$ , Na hacia profundidad (Inclinado), mientras que los iones Mg y Ca disminuyen.

En el pozo de Chinavita se presentaron uno de los mayores contenidos de CBM tomados en el altiplano Cundiboyacense, siendo alrededor de 300 pies<sup>3</sup>/ton a una profundidad de 540 m. La zona coincide con los mayores valores de precipitación y recarga del área de estudio, a su vez la formación Guaduas se encuentra altamente fracturada debido a la acción regional de la falla del río Garagoa y a la presencia de fallas locales; así mismo se encuentra una mayor coincidencia en cuanto a la hidrogeoquímica, porque las cuatro muestras tomadas presentan altos contenidos de  $HCO_3$ .

Relacionando con los estudios que se han realizado a nivel mundial, se puede concluir que la zona de estudio presenta similitud con las grandes cuencas productoras de CBM en cuanto a condiciones, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas. En el sinclinal de Úmbita se requiere estudios detallados sobre condiciones como presión, origen del gas y flujo de la recarga utilizando isotopos; así como condiciones de formación de la cuenca y por ende generación del gas metano, para confirmar mejor la concentración hidrogeológica del CBM en los mantos de carbón.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente financiada por los autores, por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y por la UPTC como parte del convenio de investigación 014 de 2014. Parte de la información fue compartida del proyecto de investigación sobre el modelo hidrogeológico de Casanare de la convocatoria 710-2015 (contrato 005 de 2016) COLCIENCIAS-UPTC.

## Referencias Bibliograficas

Bachu, S. and Michael, K. (2003). Possible controls of hydrogeological and stress regimes on the producibility of coalbedmethane in Upper Cretaceous-Tertiary strata of the Alberta basin, Canada: AAPG Bulletin, v. 87, no. 11, p. 1729–1754.

[https://www.google.com.co/search?q=Bachu,+S.,+and+Michael,+K.+\(2003\).+Possible+controls+of+hydrogeological+and+stress+regimes+on+the+producibility+of+coalbed+methane+in+Upper+Cretaceous-Tertiary+strata+of+the+Alberta+basin,+Canada:+AAPG+Bulletin,+v.+87,+no.+11,p.+](https://www.google.com.co/search?q=Bachu,+S.,+and+Michael,+K.+(2003).+Possible+controls+of+hydrogeological+and+stress+regimes+on+the+producibility+of+coalbed+methane+in+Upper+Cretaceous-Tertiary+strata+of+the+Alberta+basin,+Canada:+AAPG+Bulletin,+v.+87,+no.+11,p.+)

Florez R. (2004): Total Petroleum System and Assessment of Coalbed Gas in the powder River Basin Province, Wyoming and Montana. U.S.Geological Survey Digital Data Series DDS-69-C.

[https://www.google.com.co/search?q=Florez+R.+\(2004\)%3A+Total+Petroleum+System+and+Assessment+of+Coalbed+Gas+in+the+powder+River+Basin+Province%2C+Wyoming+and+Montana.+U.S.Geological+Survey+Digital+Data+Series+DDS-69-](https://www.google.com.co/search?q=Florez+R.+(2004)%3A+Total+Petroleum+System+and+Assessment+of+Coalbed+Gas+in+the+powder+River+Basin+Province%2C+Wyoming+and+Montana.+U.S.Geological+Survey+Digital+Data+Series+DDS-69-)

Freeze, R. A., and Cherry J. (1979). Groundwater: 7th edition, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 604.

Kaiser W. Ambrose W. (1992). Hydrology and Production of Coalbed Methane in Western United States Intermontane Basins, AAPG Bulletin, Vol. 76, No. 8 (August).

Rojas Reyes NR, Quitian Chila GR, Saldarriaga Agudelo W (2017) Caracterización Magneto-reológica de un Fluido a Base de Desechos Mineros. Ciencia en Desarrollo. 8(2): 61-67

Kaiser, W., Hamilton, D. Scott, A., Tyler, R. and Finley, R. (1994). Geological and hydrological controls on the producibility of coalbed methane: Journal of the Geological Society.

Li Y. Dazhen T. Hao X. Derek E. and Yanjun M. (2015). Geological and hydrological controls on water coproduced with coalbed methane in Liulin, eastern Ordos's basin, China. AAPG Bulletin, v. 99.

[https://www.google.com.co/search?q=Li+Y.+Dazhen+T.+Hao+X.+Derek+E.+and+Yanjun+M.+\(2015\).+Geological+and+hydrological+controls+on+water+coproduced+with+coalbed+methane+in+Liulin%2C+eastern+Ordos%E2%80%99s+basin%2C+China.+AAPG+Bulletin%2C+v.+99&oq=Li+Y.+Dazhen+T.+Hao+X.+Derek+E.+and+Yanjun+M.+\(2015\).+Geological+and+hydrological+controls+on+water+coproduced+with+coalbed+methane+in+Liulin%2C+eastern+Ordos%E2%80%99s+basin%2C+China.+AAPG+Bulletin%2C+v.+99&aqs=chrome..69i57.1898j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com.co/search?q=Li+Y.+Dazhen+T.+Hao+X.+Derek+E.+and+Yanjun+M.+(2015).+Geological+and+hydrological+controls+on+water+coproduced+with+coalbed+methane+in+Liulin%2C+eastern+Ordos%E2%80%99s+basin%2C+China.+AAPG+Bulletin%2C+v.+99&oq=Li+Y.+Dazhen+T.+Hao+X.+Derek+E.+and+Yanjun+M.+(2015).+Geological+and+hydrological+controls+on+water+coproduced+with+coalbed+methane+in+Liulin%2C+eastern+Ordos%E2%80%99s+basin%2C+China.+AAPG+Bulletin%2C+v.+99&aqs=chrome..69i57.1898j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8)

Mariño J. (2014) Muestreo y análisis de CBM en las perforaciones de los municipios de Úmbita y Chinavita. Contrato 014 de 2014. UPTC-SGC.

Mariño J., Castro A., Botero A., Mojica L., Granados D., Acuña C. (2015). Aspectos Geológicos de los Yacimientos de CBM, en: Gas asociado al Carbón, Geología, contenido, Reservas, minería y posibilidades en Colombia, Editorial UPTC, P.33-54.

[https://www.researchgate.net/publication/314875870\\_GAS\\_ASOCIADO\\_AL\\_CARBON\\_CBMO\\_GMAC\\_Geologia\\_contenidos\\_reservas\\_mineria\\_y\\_posibilidades\\_en\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/314875870_GAS_ASOCIADO_AL_CARBON_CBMO_GMAC_Geologia_contenidos_reservas_mineria_y_posibilidades_en_Colombia)



228

Moore, T, (2004): General introduction to coal bed methane. In “First annual Illinois Basin coalbed symposium” The Midwest PTTC Center.Evansville, Indiana. USA.

Servicio Geológico Colombiano, SGC (2014). Exploración Gas metano asociado al carbón, área Úmbita-Rondón. Recursos Energéticos. Bogotá, diciembre 2014.

<https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/DireccionTecnicaRecursosMinerales/Paginas/Exploracion-de-gas-metano-asociado-al-carbon-.aspx>

Soil Conservation Service. Soils Clasification. Washington D.C., 1972.

UPME (2015). Balance de gas natural en Colombia 2015-2023. Bogotá, Colombia.

[http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/BALANCE\\_GAS\\_NATURAL\\_FINAL.pdf](http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/BALANCE_GAS_NATURAL_FINAL.pdf)

Wayne A. Van Voast. (2003). Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane, AAPG Bulletin, v. 87.

<http://mbmg.mtech.edu/pdf/Wayne-cbmgeochem.pdf>

\*Para citar este artículo: Mariño Martínez J.E., Araque Sanabria Y.E., Meneses Medina Y.A. Hydrogeological recharge and coal-bed methane (cbm) concentration - Umbita syncline (Colombia).. Revista Bistua.2019. 17(2):207-228.

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas : Mariño Martínez J.E. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Sogamoso: [jorge.marino@uptc.edu.co](mailto:jorge.marino@uptc.edu.co)

Recibido: Septiembre 18 de 2018

Aceptado: Enero 29 de 2019