



**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA AFECTACIÓN DE LA
RECARGA EN LA ACUMULACIÓN DE GAS METANO ASOCIADO AL
CARBÓN (CBM), CASO SINCLINAL DE UMBITA (BOYACÁ, COLOMBIA)**

**YESSICA ELIANA ARAQUE SANABRIA
YESSICA ANDREA MENESES MEDINA**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA "UPTC"
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA
SOGAMOSO BOYACA
2015**

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA AFECTACIÓN DE LA
RECARGA EN LA ACUMULACIÓN DE GAS METANO ASOCIADO AL
CARBÓN (CBM), CASO SINCLINAL DE UMBITA (BOYACÁ, COLOMBIA)**

**YESSICA ELIANA ARAQUE SANABRIA
YESSICA ANDREA MENESES MEDINA**

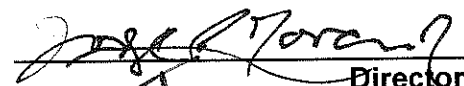
**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:
Ingeniero Geólogo**

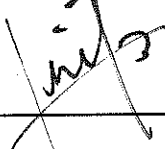
Modalidad Trabajo de Investigación

**Director
JORGE ELIECER MARIÑO MARTINEZ
Ingeniero Geólogo Msc. Ph D.**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA “UPTC”
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA
SOGAMOSO BOYACA
2015**

NOTA DE ACEPTACIÓN


Director


Jurado


Jurado

Dedicatoria

Dedico este libro a Dios por darme tantas bendiciones, por hacerme una persona fuerte y permitirme culminar esta etapa de mi vida rodeada de gente maravillosa de la cual he aprendido cosas importantes para mi formación personal.

A mi madre, Beatriz Sanabria M, por ser el motor de mi vida, por darme su amor, su apoyo incondicional, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, por sus consejos y sus sacrificios para hacer de mí una mejor persona. Mamita, las palabras no me alcanzan para darte las gracias por tu infinito cariño, por tu paciencia, por cuidar de mí, por enseñarme con ternura las cosas buenas de la vida, por aceptar mis errores y ayudármelos a corregir de la manera más amorosa, con por guiarme con paciencia para hacer de mí una mejor persona y por ser mi modelo a seguir y mi principal motivación para estar aquí, como me dijiste un día, este logro es principalmente de las dos.

A mis hermanos, María Alejandra y Arley por estar siempre conmigo, por compartir mis triunfos, por sus consejos y apoyo incondicional, porque a pesar de las adversidades siempre ví una luz en ellos para seguir adelante. Gorda, gracias por tu cariño, tu amistad, tu paciencia e incondicionalidad, soy muy afortunada al tener la mejor hermana del mundo. A mis abuelos por su infinita sabiduría, por sus cuidados y esos consejos que solo se adquieren con la experiencia. A Jaime Garzón por su incondicionalidad, por compartir conmigo buenas y malas experiencias y por su aporte en mi formación personal, por su cariño y paciencia. A Wilmar Montaña, por su apoyo, por ser mi confidente y por estar siempre conmigo, estoy segura de que Dios te mando a mi vida en el momento indicado para ayudarme a ser una mejor persona y profesional.

Yessica Eliana Araque Sanabria

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por ser mi guía, quien me acompaña y bendice día a día, ya que gracias a él hoy me es posible culminar esta etapa, donde estuve rodeada por personas extraordinarias de quienes siempre tendré grandes recuerdos.

A mis padres Edilamar Medina y Cristóbal Meneses, quienes son los forjadores de mi vida y me ofrecen su amor incondicional, mamá tú que has estado cada día acompañándome brindándome fuerza en los momentos desalentadores, que me orientas y proteges desde que era una bebe; papí tu que me has enseñado que en la vida todo es posible, que solo tenemos que luchar y hacer una realidad cada sueño anhelado. Solo ustedes son quienes me brindan la fuerza suficiente para continuar trabajando por mejorar en cada aspecto, gracias por la paciencia y confianza que me han brindado, por todos los sacrificios que han hecho por verme crecer como persona. Y por favor recuerden este gran logro en verdad es de ustedes!

A mis hermosas hermanas Laura y Geraldine, quienes son mi inspiración para mejorar cada día, quienes con su ternura y felicidad me enseñan lo valioso del vivir, el mejor regalo ha sido tener hermanas con las que puedo contar, con quienes comparto felicidad, tristeza, triunfos... Que a pesar de su corta edad me brindan valiosos consejos que me permiten crecer como persona. Lola tú maravilloso ser me enseña a mejorar cada día, Geral, tú me enseñas que la disciplina es fundamental para cumplir objetivos. A mamá Sílvia, porque con su gran experiencia y consejos me he enriquecido como ser; a Henry Sánchez quien ha sido mi apoyo incondicional en el desarrollo profesional y personal, quien me escucha y comprende, pero no solo eso, sino que me regala fortaleza y cariño en momentos tormentosos y con quien he aprendido a superar grandes obstáculos

Yessica Andrea Meneses Medina

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios por darnos la oportunidad de conocernos y poder realizar este proyecto.

A nuestros padres y hermanos, por ser guías y apoyo incondicional en nuestra formación personal y por ende en la realización de nuestro proyecto de grado; son nuestra mayor inspiración para lograr nuestros objetivos.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por encaminarnos en nuestra futura profesión, para así desempeñar un buen papel como profesionales.

Al Ingeniero Jorge Eliecer Mariño Martínez por su apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto, por orientarnos mediante sus conocimientos, por su constante motivación en la investigación y su capacidad de enseñar la disciplina del aprendizaje constante.

A Alberto Ángel Botero, por su colaboración y consejos en cuanto al desarrollo de adquisición de datos e información.

A la Ingeniera Inés Vergara por su orientación y aporte de conocimientos en la realización de este proyecto.

A nuestros profesores por darnos las herramientas y aporte de conocimientos para nuestro crecimiento intelectual y profesional.

A Henry y Wilmar por su constante apoyo, motivación, ánimo y consejos a lo largo de nuestra etapa de formación y desarrollo de nuestro proyecto de grado.

A nuestros amigos y compañeros de universidad por hacer parte de nuestra formación. A Alejandra López y Karen Arias por su amistad incondicional, consejos y experiencias vividas durante nuestra etapa universitaria.

CONTENIDO

	Pag
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
1. OBJETIVOS.....	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
2. METODOLOGIA	4
3. GENERALIDADES	5
3.1 LOCALIZACION GEOGRÁFICA	5
3.2 ASPECTOS GEOGRAFICOS Y GEOMORFOLOGICOS	5
3.3 VIAS DE ACCESO	6
3.4 CLIMA Y VEGETACIÓN.....	6
4. GEOLOGIA	7
4.1 ESTRATIGRAFIA.....	7
4.1.1 Unidades del Cretácico.....	7
4.1.2 Unidades del Paleógeno.....	13
4.1.3 UNIDAD INCONSOLIDADA DEL NEOGENO (HOLOCENO)	16
4.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL	19
4.2.1 FALLAS	19
4.2.2 ESTRUCTURAS.....	20
5. GEOMORFOLOGIA.....	26
5.1 MORFOMETRIA	26
5.1.1 Mapa de Pendientes.....	26
5.2 MORFOGENESIS	28
5.2.1 Ambiente Denudacional.....	28
5.2.2 Ambiente fluvial y lagunar.....	30
5.2.3 Ambiente Estructural	31
5.3 MORFODINÁMICA	33

5.3.1	Procesos Endógenos.....	33
5.3.2	Procesos Exógenos.....	33
6.	DEFINICION DEL ESTADO DEL ARTE	35
6.1	EL CARBÓN COMO GENERADOR DE CBM.....	35
6.2	RANGO DEL CARBÓN.....	37
6.2.1	Tipo de carbón.....	37
6.3	PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO Y DE LA COBERTERA DE LA CUENCA	37
6.4	GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	38
6.5	ALMACENAMIENTO DE GAS METANO EN LOS YACIMIENTOS DE CARBÓN.....	38
6.6	HIDROGEOLOGIA RELACIONADA A YACIMIENTOS DE GAS METANO ASOCIADO AL CARBON.....	40
7.	DESCRIPCIÓN LOCAL DE LA FORMACIÓN GUADUAS.....	43
7.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES DE LA ZONA DE ESTUDIO ...	43
7.2	ANÁLISIS CONTENIDOS DE GAS METANO ASOCIADO AL CARBÓN (CBM) CASO SINCLINAL DE ÛMBITA.....	50
8.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	52
8.1	HIDROGRAFÍA	52
8.1.1	Cuenca hidrográfica.....	52
8.1.2	Parámetros morfométricos	53
8.1.3	Descripción de las subcuencas y Microcuencas hidrográficas	54
11.	HIDROLOGIA	58
8.2	SISTEMAS HIDROLOGICOS	59
8.2.1	Sistemas Lenticos.....	59
8.2.2	Sistemas Loticos.....	59
8.3	BALANCE HIDRICO	59
8.3.1	Caracterización Hidrometereológica.....	62
8.3.2	Escorrentía (Q)	74
8.3.3	Análisis Balance Hídrico	80
9.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	83
9.1	ACUÍFERO.....	83

9.1.1	Acuíferos Confinados	83
9.1.2	Acuíferos Libres.....	83
9.1.3	Acuíferos Semiconfinados	84
9.2	ACUITARDO Y/O ACUICIERRE	84
9.3	ACUÍFUGO	84
9.4	UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	84
9.4.1	Acuíferos	84
9.4.2	Acuitardos y/o acuicierres.....	85
9.5	ZONAS DE RECARGA.....	87
9.5.1	Inventario de puntos de agua	87
10.	HIDROGEOQUÌMICA	94
10.1	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS QUÍMICOS.....	96
10.1.1	Balace iónico	96
10.1.2	Relaciones Interparamétricas	97
10.2	PARÁMETROS FÍSICOS	98
10.2.1	Conductividad Eléctrica	98
10.2.2	Potencial de Hidrogeno (ph)	98
10.2.3	Dureza	99
10.2.4	Alcalinidad	99
10.3	COMPOSICIÓN QUÍMICA	100
10.3.1	Descripción Según diagrama de Piper.	103
10.3.2	Descripción según diagrama de Stiff.	103
11.	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	109
12.	DISCUSIÓN	112
13.	CONCLUSIONES	116
14.	RECOMEDACIONES	118
	BIBLIOGRAFIA	119

LISTA DE IMÁGENES

	Pag.
Imagen 1. Localización geográfica área de estudio.....	5
Imagen 2. Vías de acceso área de estudio.....	6
Imagen 3. Columna Estratigráfica área de estudio.....	17
Imagen 4. Mapa geológico de la zona de estudio.....	20
Imagen 5. Perfiles A-A' y B-B' al Oeste de la zona de estudio.....	22
Imagen 6. Perfiles C-C' y D-D' hacia el centro de la zona de estudio.....	23
Imagen 7: Perfil E-E' al Este de la zona de estudio.....	24
Imagen 8: Rango de pendientes de la Zona de Estudio.....	26
Imagen 9. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio.....	33
Imagen 10. Mapa geológico formación Guaduas.....	45
Imagen 11. Columna estratigráfica formación Guaduas.....	46
Imagen 12. Perfil geológico formación Guaduas sector Úmbita.....	46
Imagen 13. Perfil geológico formación Guaduas sector Chinavita.....	46
Imagen 14. Mapa hidrográfico.....	54
Imagen 15. Cuencas y Subcuencas de la zona de estudio.....	55
Imagen 16. Estaciones meteorológicas IDEAM.....	58
Imagen 17. Mapa de Isoyetas.....	66
Imagen 18. Mapa de Isotermas.....	67
Imagen 19. Mapa de humedad relativa.....	68
Imagen 20. Mapa de evaporación.....	69
Imagen 21. Mapa de evapotranspiración.....	70
Imagen 22. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.....	75
Imagen 23. Balance hídrico.....	79
Imagen 24. Zonas de recarga.....	86

	Pag.
Imagen 25. Mapa hidrogeológico.....	87
Imagen 26. Perfiles Hidrogeológicos, Perfil A-A' y Perfil B-B'.....	88
Imagen 27. Perfiles Hidrogeológicos, Perfil C-C' y Perfil D-D'.....	89
Imagen 28. Perfiles Hidrogeológicos, Perfil E-E'.....	90
Imagen 29. Puntos de muestreo de agua formación Guaduas y Socha Inferior, veredas Usillo (Chinavita) y Juncal (Ùmbita).....	92
Imagen 30. Polígonos de Stiff.....	105
Imagen 31. Modelo hidrogeológico conceptual, perfil.....	110
Imagen 32. Modelo conceptual de la dirección de la recarga, sobre mantos de carbón sector Ùmbita.....	111
Imagen 33. Modelo conceptual de la dirección de la recarga, sobre mantos de carbón sector Chinavita.....	111

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pag.
Fotografía 1: Panorámica de la Formación Une, se observa una morfología escarpada características de esta formación.....	8
Fotografía 2: Afloramiento Formación Chipaque, muestra intercalaciones de arcillolitas gris oscuro altamente meteorizadas con areniscas cuarzosas de grano fino.....	8
Fotografía 3: Afloramiento Formación Dura, se observan bancos de areniscas cuarzosas de grano fino de color amarillo pardo, debido a la meteorización.....	9
Fotografía 4: Afloramiento Formación Plaeners, se observan arcillolitas color grisáceo poco carbonosas, altamente meteorizadas y fracturadas.....	10
Fotografía 5: Afloramiento Formación Tierna, Bancos de cuarzoarenitas color gris muy claro a amarillento por la meteorización.....	10
Fotografía 6: Afloramiento Guaduas, se observan mantos de carbón poco erosionados.....	11
Fotografía 7: Areniscas Guía Formación Guaduas.....	12
Fotografía 8: Morfología formación Socha Superior, se evidencian zonas de escarpe.....	13
Fotografía 9: Afloramiento Formación Socha Inferior, Arcillolitas moteadas color purpura altamente meteorizadas.....	14
Fotografía 10: Muestra formación Socha Inferior, Arcillolita micácea, abigarrada color purpura altamente meteorizadas, friable.....	14
Fotografía 11: Cantera Formación Picacho, se observan bancos de areniscas cuarzosas blancas de textura media a muy gruesa.....	15
Fotografía 12: Areniscas cuarzosas de grano grueso.....	15
Fotografía 13: Cantera abandonada ubicada dentro de la formación concentración, se observa en la base areniscas de grano fino, en la parte de arriba arcillolitas color purpura.....	16

Fotografía 14: Lomerío poco disectado de carácter denudacional debido a que se presentan en formaciones con composición arcillosa y depósitos cuaternarios.....	29
Fotografía 15: Cauce Aluvial generado por el Rio Garagoa.....	30
Fotografía 16: Ladera estructural ubicado en el municipio de Òmbita sobre la formación Socha Inferior.....	31
Fotografía 17: Formación guaduas levemente plana limitada por ladera estructural de la formación Socha Superior y ladera de contrapendiente de Labor Tierna.....	32
Fotografía 18. Recipientes muestras de agua superficial de los municipios de Òmbita y Chinavita.....	94

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Clasificación de pendientes según Van Zuidman	25
Tabla 2. Resultados de CBM (Gas total) pozo Chinavita 1.....	47
Tabla 3. Resultados de CBM (Gas total) pozo Úmbita 1.....	48
Tabla 4. Resultados de CBM (Gas total) frentes de mina.....	48
Tabla 5. Parámetros morfométricos de subcuenca y microcuencas presentes en el área de estudio.....	52
Tabla 6. Parámetros morfométricos de subcuenca y microcuencas presentes en el área de estudio.....	52
Tabla 7. Estaciones meteorológicas IDEAM.....	57
Tabla 8. Precipitación media método de Isoyetas.....	60
Tabla 9. Precipitación media método de polígonos de Thiessen.....	61
Tabla 10. Parámetros de ETP estación Vivero.....	63
Tabla 11. Parámetros de ETP estación Rondón.....	64
Tabla 12. Parámetros de ETP estación Sutatenza.....	64
Tabla 13. Parámetros de ETP estación Villa Luisa.....	64
Tabla 14. Parámetros de ETP estación silos.....	65
Tabla 15. Evapotranspiración media según método de polígonos de Thiessen...65	65
Tabla 16. Valores de CN para suelos.....	71
Tabla 17. Clasificación de suelos según clase Hidrológica.....	72
Tabla 18. Determinación NC.....	73
Tabla 19. Valores de Escorrentía.....	74
Tabla 20. Caudales Rio Garagoa.....	76
Tabla 21. Balance Hídrico.....	77
Tabla 22. Recarga por acuíferos.....	78
Tabla 23. Clasificación de unidades hidrogeológicas según litología.....	83

	Pag.
Tabla 24. Muestras de mantos de carbón.....	95
Tabla 25. Balance iónico muestras de agua mantos de carbón.....	96
Tabla 26. Balance iónico muestras de agua superficial.....	96
Tabla 27. Relaciones interparamétricas muestras de mantos de carbón.....	97
Tabla 28. Relaciones interparamétricas muestras de Superficie.....	97
Tabla 29. Localización y parámetros físicos muestras de agua.....	99
Tabla 30. Sólidos totales encontrados en las muestras de agua.....	99
Tabla 31. Composición química de muestras de agua.....	100
Tabla 32. Conversiones valores iónicos muestras de agua.....	101
Tabla 33. Contenidos iónicos en los sectores Chinavita – Úmbita.....	108
Tabla 34. Descripción de características para la acumulación de CBM, en diferentes cuencas del mundo.....	115

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Proceso de carbonificación de la materia orgánica.....	35
Figura 2. Esquema de Adsorción y Absorción del gas.....	38
Figura 3. Fracturas en el carbón.....	38
Figura 4. Dependencia del rango del contenido en gas con el aumento de la presión.....	41
Figura 5. Diagrama de distribución hidrográfica en la zona.....	49
Figura 6. Sección de una cuenca con flujos subterráneos y generación de gas biogenico secundario. Entrampamiento convencional e hidrodinámico.....	113
Figura 7. Sección hidrogeológica de la zona de Liulin, Cuenca Ordos, que muestra la dirección del flujo de aguas subterráneas y la clasificación de zonas de recarga.....	114

LISTA DE GRAFICOS

	Pag.
Grafico 1. Valores de precipitación media mensual multianual.....	60
Grafico 2. Escorrentía superficial.....	74
Grafico 3. Caudales Rio Garagoa.....	76
Grafico 4. Balance hídrico.....	78
Grafico 5. Tipos de captación de Agua.....	85
Grafico 6. Tipo de punto de agua ubicados en las formaciones geológicas presentes.....	85
Grafico 7. Diagramas de Piper.....	102
Grafico 8. Diagramas de Stiff.....	104
Grafico 9. Diagrama de Schöeller Berkaloff.....	106

ANEXOS

Anexo 1. Mapa Geológico

Anexo 2. Mapa Hidrogeológico

Anexo 3. Mapa geológico formación Guaduas

Anexo 4. Mapa Topográfico

Anexo 5. Mapa de pendientes

Anexo 6. Mapa Geomorfológico

Anexo 7. Mapa de Hidrográfico

Anexo 8. Mapa cobertura del suelo

Anexo 9. Mapa Balance hídrico

Anexo 10. Modelo hidrogeológico conceptual

Anexo 11. Inventario puntos de agua

Anexo 12. Datos tomados en campo

RESUMEN

El área de estudio se encuentra localizada en los municipios de Umbita y Chinavita, específicamente en las veredas de las Juntas, Sisa, Usillo, Juncal y Montejo, sobre el flanco este del sinclinal de Umbita, La totalidad del área de Estudio es de 62,05 Km². Geológicamente el área está comprendida por rocas sedimentarias del cretácico, terciario (Paleógeno) y cuaternario. Las formaciones geológicas encontradas son: Formación Une, Formación Chipaque, Grupo Guadalupe (Subdividido en Formación Dura, Formación Plaeners, Formación Labor y Tierna), Formación Guaduas, Formación Socha inferior, Formación Socha Superior, Formación Picacho, Formación Concentración y depósitos coluviales. Estructuralmente se encuentra fallas inversas como la de Volador, Uvero y Rio Garagoa. Para la interpretación de las rocas a profundidad se realizaron perfiles geológicos a partir de datos estructurales que permiten la visualización y comportamiento de la estructura y formaciones. Mediante el análisis Hidrográfico se determinó los parámetros morfométricos de cada una de las Microcuencas y subcuencas presentes en el área de estudio. Para el análisis Hidrológico se tomaron en cuenta principalmente dos factores: Sistemas Hidrológicos y el Balance Hídrico; en relación a los aspectos hidrogeológicos se tuvo en cuenta la composición litológica, espesor, características de porosidad y permeabilidad. La formación Guaduas regionalmente se comporta como acuitardo, sin embargo al analizarla localmente se presenta como acuífero debido a los trece mantos de carbón, capas de arenisca y fallas locales que generan porosidad secundaria. Para la relación del flujo de agua con las acumulaciones de CBM, se analizaron los datos de medición de Gas Asociado al Carbón (CBM), obtenidos por el Servicio Geológico Colombiano y la UPTC, en las perforaciones direccionadas con recuperación de núcleo denominadas Pozo Umbita 1 - Pozo Chinavita 1 y en frentes de mina, lo que indicó que los mayores contenidos de gas se encuentran en el área del pozo Chinavita, donde también se genera el mayor aporte de infiltración de agua meteórica. Para caracterizar el agua de superficie y la infiltrada sobre mantos de carbón se implementó el análisis Hidrogeoquímico de siete muestras de agua, tres en superficie y cuatro sobre los mantos de carbón.

Palabras clave: CBM (Coalbed methane), hidrogeología, recarga, hidrogeoquímica, evaporación, precipitación, infiltración.

INTRODUCCIÓN

El gas metano asociado a capas de carbón (CBM) se halla casi en todas las formaciones geológicas en que se encuentre carbón, y dado a que necesita un tratamiento especial puede llegar a considerarse como un recurso peligroso en la industria minera, sin embargo este gas con el tratamiento adecuado permitiría el suministro de energía suficiente para suplir algunas necesidades de hoy en día. Colombia siendo un productor potencial de carbón, hace que el gas asociado a este recurso tenga gran proyección, y debido a que en el país se están desarrollando diferentes investigaciones que permitan establecer las acumulaciones y posibles producciones de CBM presente en áreas con estructuras geológicas de sinclinales, transformará la perspectiva de este hidrocarburo continuo en la minería.

Para llegar al aprovechamiento de este recurso no convencional se debe desarrollar una serie de metodologías e implementar tecnologías que permitan el conocimiento total del estado y evolución del gas, es por esto que los avances hidrogeológicos han demostrado que la concentración de agua en estas zonas interfiere en la acumulación de Gas metano en capas de carbón, por lo que es de gran importancia realizar indagaciones que permitan identificar las características tanto del comportamiento geológico como hidrológico para asociar la infiltración de agua con el comportamiento del gas en el área.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un modelo Hidrogeológico conceptual para relacionar la afectación de la recarga con las acumulaciones de Gas metano asociado al carbón.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recopilar Información geológica, Hidrológica que permita caracterizar el área de trabajo, así mismo revisar estudios realizados en otras partes acerca del comportamiento Hidrodinámico en las acumulaciones de Gas metano asociado al carbón.
- Elaboración de mapa geológico y geomorfológico a escala 1:25000, para delimitar unidades estratigráficas y estructuras presentes en la zona.
- Definir parámetros Hidrológicos y generar el mapa hidrográfico del área de estudio.
- Modelar mapas de isoyetas, isotermas, humedad relativa, evaporación y evapotranspiración potencial, cobertura vegetal con el fin de obtener el balance hídrico.
- Analizar fisicoquímicamente muestras de agua de superficie y muestras de agua asociada a los mantos de carbón.
- Diseñar el modelo Hidrogeológico conceptual.
- Relacionar las acumulaciones de Gas metano asociado al carbón con el modelo hidrogeológico conceptual.
- Desarrollar un modelo de concentración de CBM debido a la recarga hidrogeológica.

2. METODOLOGIA

La metodología del trabajo se estructura en las siguientes etapas:

Etapa 1: Recopilación de Información de la Biblioteca de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bases de datos Geológicas, Corporaciones y entidades como el Servicio Geológico, IDEAM, IGAC, Corpochivor, y publicaciones suministradas por el director del proyecto. Con su posterior clasificación y análisis referente a temas de hidrogeología, hidrodinámica, geología, geomorfología y acumulaciones de CBM.

Etapa 2: Trabajo de campo, que permita tener una descripción detallada de la zona de estudio, realizar el reconocimiento de las Unidades estratigráficas presentes, así como estructuras que puedan influir en la afectación de la recarga, además elaborar un mapa geológico escala 1: 25000 del área.

Etapa 3: Procesamiento de la información:

- Digitalización de mapa Geológico de campo y realización de perfiles a escala 1:25000.
- Descripción de unidades Geomorfológicas
- Análisis de información meteorológica para desarrollar el balance Hídrico.
- Caracterización hidrogeológica de las unidades con el fin de elaborar el mapa Hidrogeológico a escala 1: 25000.

Etapa 4: Obtención del modelo Hidrogeológico conceptual

Etapa 5: Asociación con los contenidos de Gas obtenidos del proyecto, para el desarrollo del modelo conceptual de acumulación de CBM a partir de la recarga hidrogeológica.

Etapa 6: Análisis y resultados

3. GENERALIDADES

3.1 LOCALIZACION GEOGRÁFICA

La zona de estudio se encuentra a 53 kilómetros de la ciudad de Tunja en el departamento de Boyacá, específicamente comprende una parte del flanco oriental del sinclinal de Umbita, entre los municipios de Chinavita y Umbita, cubriendo un área de 63.83 Km². El municipio de Tibaná se encuentra a 15 Kilómetros del área de estudio.

Los vértices de la poligonal presentan las siguientes coordenadas planas con origen Bogotá: Vértice NW (X = 1.068.191 m. N; Y = 1.069.329 m. E), Vértice NE (X = 1.078.611 m. E; Y = 1.074.133 m. N), Vértice SW (Y = 1.064.100 m. N; X = 1.071.271 m. E) y Vértice SE (X = 1.081.565 m. E; Y = 1.070.120 m. N). La zona de estudio está ubicada en la parte NE de la plancha 210 de Guateque a escala 1:100.000 generada por el Servicio Geológico Colombiano

Imagen 1. Localización geográfica área de estudio.



Fuente. Google Earth, Colombia, Boyaca

3.2 ASPECTOS GEOGRAFICOS Y GEOMORFOLOGICOS

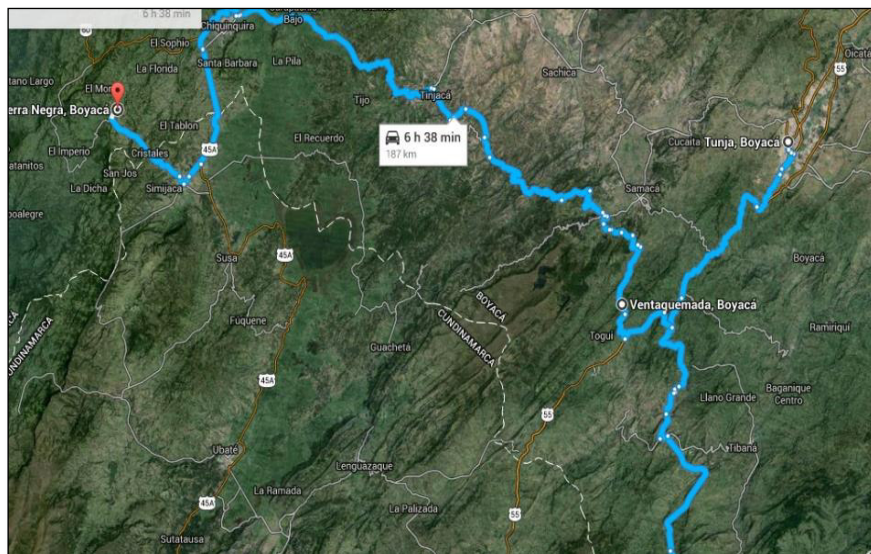
La poligonal de estudio se ubica en un sitio montañoso de piedemonte caracterizado por relieve moderado a fuerte con drenaje subparalelo y

subdendrítico. Es característica de la zona los valles profundos característicos de la Formación Guaduas, con laderas muy empinadas de las Formaciones Socha Inferior y Arenisca Tierna.¹

3.3 VIAS DE ACCESO

A la zona de estudio se puede Ingresar por las siguientes carreteras: La vía Sogamoso- Duitama Tunja y tomar el desvío hacia el municipio de Soracá, pasando por Boyacá, Jenesano y Tibaná, Vía concesión Bogotá-Tunja hasta Tierra negra y desviar a Jenesano, Tibaná, Chinavita o desde Ventaquemada dirigirse a Turmequé y Umbita. Se encuentra una vía alterna Bogotá – Villa Pinzón – Umbita. Además de las vías principales existen carreteras secundarias y carreteables en su mayoría destapadas aunque en buen estado, por donde se puede ingresar al área.

Imagen 2. Vías de acceso área de estudio



Fuente. Google Earth, Colombia, Boyacá

3.4 CLIMA Y VEGETACIÓN

Los municipios en los que se encuentra el área de estudio tienen temperaturas entre 16°C y 18°C, con alturas que oscilan entre 1600 m.s.n.m. a 3000 m.s.n.m. el clima corresponde a Frio húmedo, según clasificación sistemática IDEAM. Existe vegetación de páramos, bosque húmedo montano, pre montano, especies introducidas como eucaliptos y pinos, especies nativas, medicinales, especies con valor artesanal y especies comestibles (aves nativas).

¹ Esquema de Ordenamiento Territorial, Factores abióticos, Umbita, Chinavita Boyacá.

4. GEOLOGIA

Para la elaboración de la geología del área estudio se tomó como referencia la Plancha 210 Guateque (Ingeominas 2010) a escala 1:100.000; además se utilizó la Metodología de Descripción de Rocas Modificada de R. Compton 1985, en la que se tienen en cuenta parámetros como espesor de la unidad, composición, friabilidad, dureza, fósiles, porosidad, forma de la estratificación y estructuras entre otros. Para definir el grado de meteorización de las rocas se tomó como base la terminología de la Sociedad Geológica de Londres, 1990.

4.1 ESTRATIGRAFIA

En el flanco este del sinclinal de Úmbita, dentro del área de estudio se encuentra una secuencia sedimentaria desde el cretáceo medio superior hasta el neógeno. (Ver **Imagen 3** Columna Estratigráfica, **ANEXO 1** Mapa Geológico.)

4.1.1 Unidades del Cretácico

La sedimentación en el periodo Cretácico es producto del ingreso del mar a la región, durante el Berriasiano. Donde se depositaron coetáneamente arenitas y conglomerados en un sector y en otro lugar rocas de textura fina tanto siliciclásticas como calcáreas (arcillolitas, lodolitas, limolitas o calizas), en diferentes ambientes y condiciones de acumulación.²

4.1.1.1 Formación Une (K1K2u) Albiano medio – Cenomaniano

Esta unidad constituida por bancos gruesos, medianos y delgados de cuarzoarenitas de color gris oscuro a medio (meteorizada a tonos gris claro o amarillentos) con textura muy fina y fina, moderadamente a bien calibradas, maduras, con cemento silíceo, micáceas; la forma de las capas es tabular y lenticular, frecuentemente con estratificación interna inclinada en artesa (sugiriendo migración lateral de canales); se intercalan con las arenitas capas gruesas y delgadas de arcillolita gris oscuro o negro, algo limosa, laminada internamente o maciza.

² Terraza R. Moreno G. Buitrago J. Pérez A. Montoya D. Geología de la Plancha 210 Guateque. Bogotá D.C. 2010.

4.1.1.2 Formación Chipaque (K2cp) Cenomaniano Tardío - Santoniano

Los afloramientos de la Formación Chipaque son de carácter arcilloso casi siempre están cubiertos por suelos residuales o coluviones. Los pocos afloramientos están conformados por Arcillolita gris oscuro, laminadas, meteorizadas, con intercalaciones tabulares de arenitas de cuarzo, de textura fina, maduras, con cemento silíceo, generalmente con bioturbación en la base de las capas, con espesor delgado hasta grueso.

Fotografía 1: Panorámica de la Formación Une, se observa una morfología escarpada características de esta formación. Vía que conduce de Tibana a Chinavita coordenadas, **N:** 1'067.248 **E:** 1'076.457 **Z:** 1780 m



Fuente: Autores

4.1.1.3 Grupo Guadalupe (K2g) Campaniano – Maastrichtiano

El Grupo Guadalupe está conformado de base a techo por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca de Labor y Arenisca Tierna, el Grupo Guadalupe se compone litológicamente de la siguiente manera:

Fotografía 2: Afloramiento Formación Chipaque, muestra intercalaciones de arcillolitas gris oscuro altamente meteorizadas con areniscas cuarzosas de grano fino. Por la vía que conduce de Tibana a Chinavita coordenadas, **N:** 1'068.534 **E:** 1'075.900 **Z:** 1865 m



Fuente: Autores

Arenisca Dura.

Cuarzoarenitas de color naranja grisáceo, naranja amarillento o marrón amarillento por meteorización, textura muy fina a fina, maduras, micáceas y glauconíticas (al techo especialmente), en capas con estratificación delgada hasta muy gruesa, plana paralela (continua o discontinua) y laminación interna delgada-mediana, ligeramente ondulosa paralela discontinua o aspecto macizo; se intercalan porcelanitas color gris parduzco y negro oliva, con intercalaciones de chert y ocasionalmete capas medianas a gruesas de fosforitas. En la parte baja y techo aparecen conjuntos de limolitas de cuarzo.

Plaeners.

Se compone de arcillolitas de color gris medio y claro, meteorizadas, carbonosas en las cuales se intercalan cuarzoarenitas finas, tormentitas con fragmentos de bivalvos, lodolitas y porcelanitas.³

³ Ibid.,p.11

Fotografía 3: Afloramiento Formación Dura, se observan bancos de areniscas cuarzosas de grano fino de color amarillo pardo, debido a la meteorización. Por la vía que conduce de Tibana a Chinavita coordenadas, **N:** 1'068.329 **E:** 1'076.275 **Z:** 1856 m



Fuente: Autores

Fotografía 4: Afloramiento Formación Plaeners, se observan arcillolitas color grisáceo carbonosas, altamente meteorizadas y fracturadas. En la zona se presentan inversiones. Foto por la vía que comunica las veredas Las Juntas y Montejo. Coordenadas, **N:** 1'069.118 **E:** 1'075.942 **Z:** 1920 m



Fuente: Autores

Arenisca Labor y Tierna.

Limolitas de cuarzo suprayacidas por una secuencia de arenitas cuarzosas, de textura fina a muy fina con estratificación gruesa, en capas cuneiformes, con presencia de bioturbación, micáceas, glauconíticas, generalmente friables y completamente meteorizadas. Arcillolitas con niveles de arenitas en su base y techo (intervalo que separa la Arenisca de labor de la Arenisca Tierna) finamente se encuentran cuarzoarenitas de color gris claro o amarillento con estratificación delgada ondulosa paralela discontinua, glauconíticas, friables, que corresponden a la base de la Arenisca Tierna.

Fotografía 5: Afloramiento Formación Tierna, Bancos de cuarzoarenitas color gris muy claro a amarillento por la meteorización. Vía que comunica los municipios de Tibana y Chinavita. Coordenadas, **N:** 1'068.755 **E:** 1'075.829 **Z:** 1883 m



Fuente: Autores

4.1.1.4 Formación Guaduas (K2E1g) Maastrichtiano Tardío – Paleoceno Temprano

Está formada principalmente por una sucesión lutítica con intercalaciones de areniscas y capas de carbón; dos de las intercalaciones de arenisca destacan particularmente y constituyen dos buenos niveles-guía. Estas areniscas se han denominado Guía, la inferior y Lajosa, la superior. Dentro del Guaduas se sitúa el límite Cretáceo-Terciario. Los afloramientos de esta formación por lo general se encuentran cubiertos por coluviones o muy meteorizados. Por la carretera Chinavita-Sisa aparecen arenitas de cuarzo, de textura media, submaduras, friables, en secuencias de canal. Las arcillolitas son de coloración gris pero generalmente se encuentran meteorizadas por lo cual toman coloración marrón

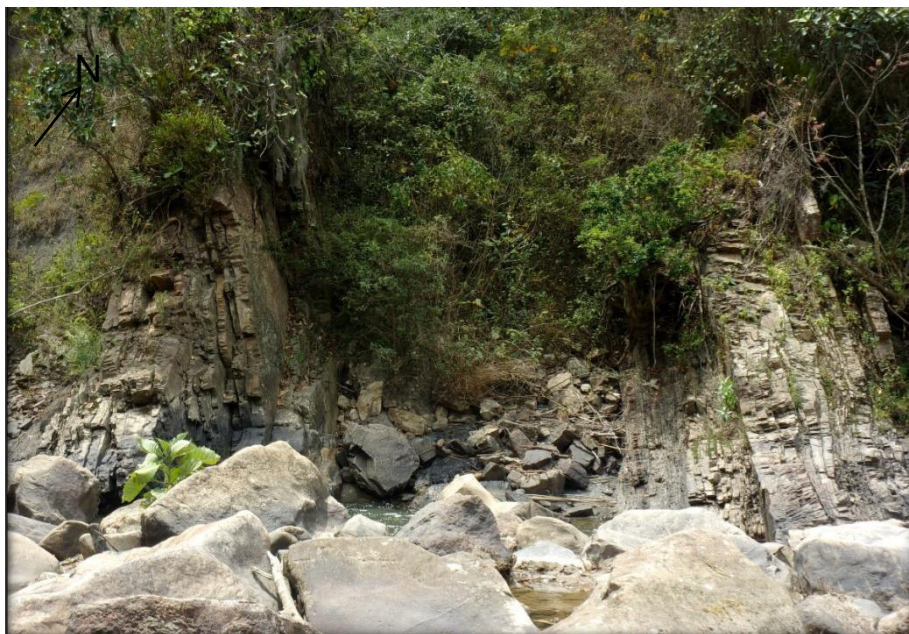
pálido, naranja o amarillenta; se presentan en capas de diferente espesor sin laminación interna o con laminación heterolítica ondulosa y lenticular.

Fotografía 6: Afloramiento Guaduas, se observan mantos de carbón poco erosionados. Fotografía en el río Garagoa, puente la carbonera, Vereda Sisa, Chinavita. Coordenadas, **N:** 1'069.506 **E:** 1'075.480 **Z:** 1825 m



Fuente: Autores

Fotografía 7: Areniscas Guía Formación Guaduas, Fotografía en el río Garagoa, puente la carbonera, Vereda Sisa, Chinavita. Coordenadas, **N:** 1'069.435 **E:** 1'075.550 **Z:** 1837 m



Fuente: Autores

4.1.2 Unidades del Paleógeno

4.1.2.1 Formación Socha Inferior (E_{1si}) Paaleoceno Tardío

La formación Socha Inferior aflora sobre los flancos del sinclinal de Úmbita. Por su constitución litológica predominantemente arenosa y por su posición estratigráfica entre unidades arcillosas (suprayaciendo a la Formación Guaduas e infrayaciendo a la Formación Socha Superior) genera en el relieve escarpes o filos topográficos como la cuchilla Juncal. Está constituida por arenitas cuarzosas de color marrón rojizo pálido y naranja amarillento oscuro, de textura fina hasta conglomerática, submaduras, friables, completamente meteorizadas en conjuntos de capas muy gruesas (hasta de 4 m de espesor) con estratificación curvada paralela discontinua e internamente con estratificación inclinada.

4.1.2.2 Formación Socha Superior (E_{1ss}) Eoceno Temprano

Está constituida por una sucesión principalmente de arcillolitas con intercalaciones menores de lodolitas, limolitas cuarzosas y arenitas. Las arcillolitas y lodolitas son de color gris, abigarradas (diferentes colores de gris, rojo y púrpura) o grises con moteado rojizo o violeta, generalmente de aspecto macizo (sin laminación interna), micáceas, meteorizadas y plásticas. Las arenitas son de color marrón pálido, naranja muy pálido o verde amarillento oscuro, de textura muy fina hasta media, inmaduras, cuarzosas, algo líticas (1-5%), internamente laminadas o con estratificación inclinada de corriente, en capas o conjuntos de capas gruesas hasta muy gruesas (0,2-5 m), generalmente meteorizadas y friables.⁴

4.1.2.3 Formación Picacho (E_{2P}) Eoceno Medio

Los afloramientos de la formación están compuestos por capas muy gruesas de cuarzoarenitas de color blanco o gris claro, textura media hasta conglomerática, friables, inmaduras o submaduras, algo líticas (1-2%) y feldespáticas (1-5%), con estratificación interna inclinada decimétrica. Son comunes lechos de guijos redondeados de cuarzo lechoso e intercalaciones de lodolitas abigarradas micáceas. Por el alto grado de meteorización de las arenitas que destruye el material cementante que une los granos, muchos niveles de la Formación Picacho han sido aprovechados como canteras de arena como las que se observan por la vía Sisa-Úmbita.

⁴ Ibid., p.11

Fotografía 8: Morfología formación Socha Superior, se evidencian zonas de escarpe Fotografía tomada en la vía que comunica La vereda Sisa Medio con la vía que va al municipio de Pachavita, sector las Minas, coordenadas **N:** 1'067.758 **E:** 1'074.327 **Z:** 2278 m



Fuente: Autores

Fotografía 9: Afloramiento Formación Socha Inferior, Arcillolitas moteadas color púrpura, meteorizadas. Vía que comunica el municipio de Tibana con Chinavita, sector Puente Sisa, coordenadas **N:** 1'070.186 **E:** 1'074.276 **Z:** 1914 m



Fuente: Autores

Fotografía 10: Muestra formación Socha Inferior, Arcillolita micácea, abigarrada color púrpura, friable. Fotografía en la vía que comunica el municipio de Tibana con Chinavita, sector Puente Sisa coordenadas **N:** 1'070.186 **E:** 1'074.276 **Z:** 1914 m



Fuente: Autores

Fotografía 11: Cantera Formación Picacho, se observan bancos de areniscas cuarzosas blancas de textura media a muy gruesa. Vía que comunica el municipio de Umbita con Puente Sisa, **N:** 1'068.755 **E:** 1'069.541 **Z:** 2345 m



Fuente: Autores

Fotografía 12: Areniscas cuarzosas de grano grueso. Fotografía tomada por la vía que comunica el municipio de Umbita con Puente Sisa, **N:** 1'068.755 **E:** 1'069.541 **Z:** 2345 m



Fuente: Autores

4.1.2.4 Formación Concentración (E2E3co) Eoceno Medio – Oligoceno Medio

La formación concentración aflora en el núcleo del sinclinal de Úmbita, donde por su composición lodosa origina relieve relativamente suave. La formación está conformada por unas sucesiones de arcillolitas y lodolitas abigarradas (rojas, grises y púrpura), macizas, micáceas, con capas muy gruesas de conglomerado arenoso, algunas de las cuales se explotan para materiales de construcción por su carácter friable. Presenta un espesor en el eje del sinclinal de 1500 metros.

4.1.3 UNIDAD INCONSOLIDADA DEL NEOGENO (HOLOCENO)

Esta unidad corresponde a depósitos sedimentarios recientes, acumulados posiblemente en el Holoceno (parte superior del sistema Neógeno) y que se encuentra cubriendo discordantemente a las rocas cretácicas.⁵

⁵ Ibid.,p.11

Fotografía 13: Cantera abandonada ubicada dentro de la formación concentración, se observa en la base areniscas de grano fino, en la parte de arriba arcillolitas color purpura. Fotografía orientada hacia el NW en la vía que comunica el municipio de Tibana con Puente Sisa. **N:** 1'071.150 **E:** 1'074.250 **Z:** 1940 m



Fuente: Autores

4.1.3.1 Coluviones o depósitos de pendiente (Qco)

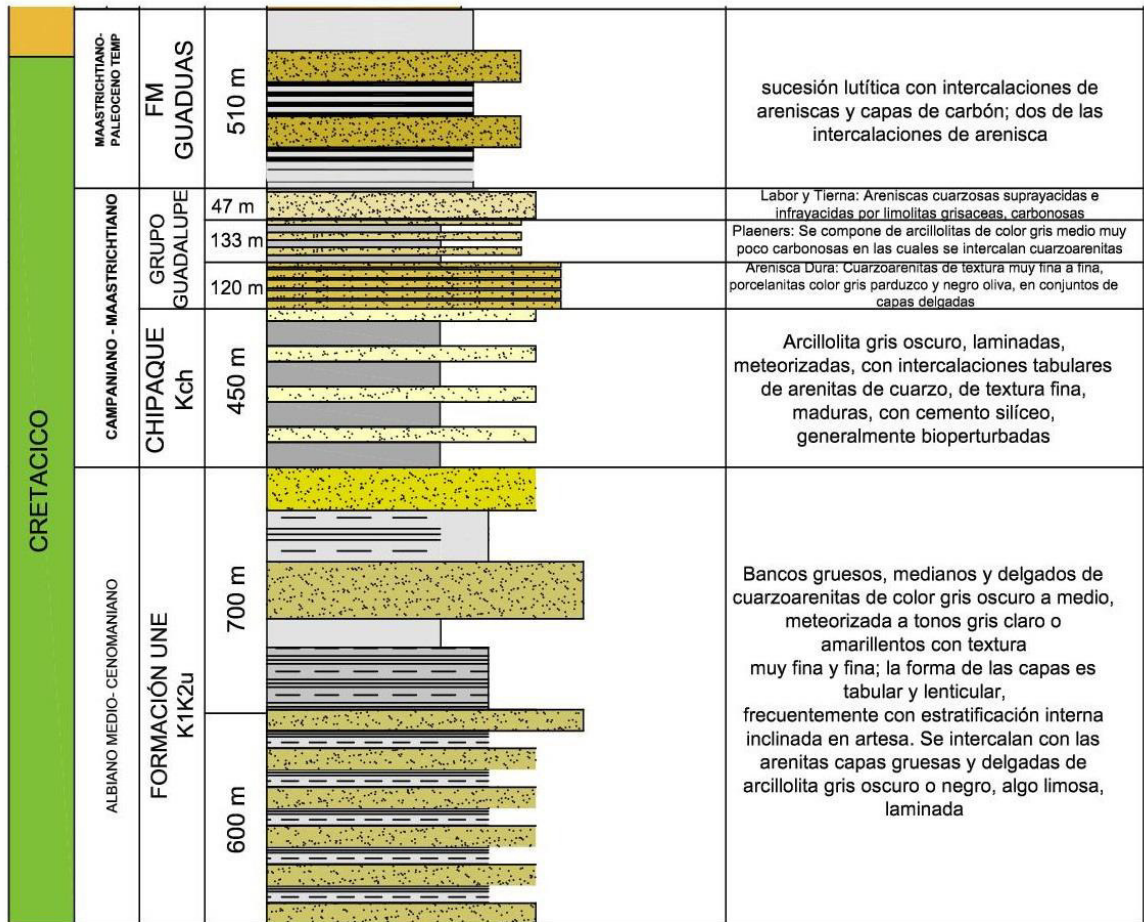
Estos depósitos presentan textura muy heterogénea desde cantos angulosos a sub angulosos grandes hasta partículas tamaño arcilla que se acumulan sobre el valle de quebradas, rellanos topográficos o sobre la base de escarpes debido a procesos de remoción en masa (deslizamientos, desprendimientos de roca o suelo), posiblemente con la participación también de avenidas o flujos torrenciales provenientes de las cabeceras de estos drenajes.

Imagen 3. Columna Estratigráfica área de estudio.

ERA	PER	FORM	ESP	TAMAÑO DE GRANO							DESCRIPCION
				ARC	L	AMF	AF	AM	AG	AMG	
NEOGENO	HOLO CENO	q. COLUVIAL									textura muy heterogénea desde cantos muy grandes hasta partículas tamaño arcilla
PALEOGENO	EOCENO MEDIO - OLIGOCENO MEDIO	FORMACIÓN CONCENTRACION E2E3co	650 m								Arcillolitas amarillas y grises, con varios bancos de areniscas de grano medio a grueso y lechos de arcilla de grano fino
			400 m								Arcillolitas grises, grises verdosas, meteorizadas a amarillo, con lechos delgados de areniscas arcillosas color verdoso y algunos bancos de arenisca de grano medio
	EOCENO MEDIO	PICACHO E2p	400 m								capas muy gruesas de cuarzoarenitas de color blanco o gris claro, textura media hasta conglomerática, friables, inmaduras o submaduras
	EOCENO TEMPRANO	SOCHA SUPERIOR E1ss	260 m								Arcillolitas con intercalaciones menores de lodolitas, limolitas cuarzosas y arenitas.
	TARDIO	SOCHA INFERIOR E2si	200 m								Areniscas cuarzosas de color marrón rojizo pálido y naranja amarillento oscuro, de textura muy fina hasta conglomerática, arcillolitas grises con moteado rojizo
MAASTRICHTIANO-PALEOCENO TEMP	FM	GUADUAS	510 m								Sucesión lutítica con intercalaciones de areniscas y capas de carbón; dos de las intercalaciones de arenisca

Fuente: Autores

Imagen 3. Continuación Columna Estratigráfica área de estudio.



Fuente: Autores



4.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

4.2.1 FALLAS

En el área de estudio se encuentra una serie de fallas que afectan directamente a la formación Guaduas, razón por la cual dicha formación presenta replegamiento y alto Fracturamiento.

4.2.1.1 Falla del Río Garagoa

Falla de rumbo de tipo dextral, presenta un trazo que va de Sur a Norte, con una extensión de aproximadamente 7 km, atravesando así parte del flanco oriental y occidental del sinclinal de Úmbita.

4.2.1.2 Falla el Uvero

Falla de rumbo de tipo sinistral de aproximadamente 6 Km de extensión, con un desplazamiento aproximado de 140 m, presenta un trazo que va de Oeste a Este, en el flanco este del sinclinal de Úmbita.

4.2.1.3 Falla el Volador

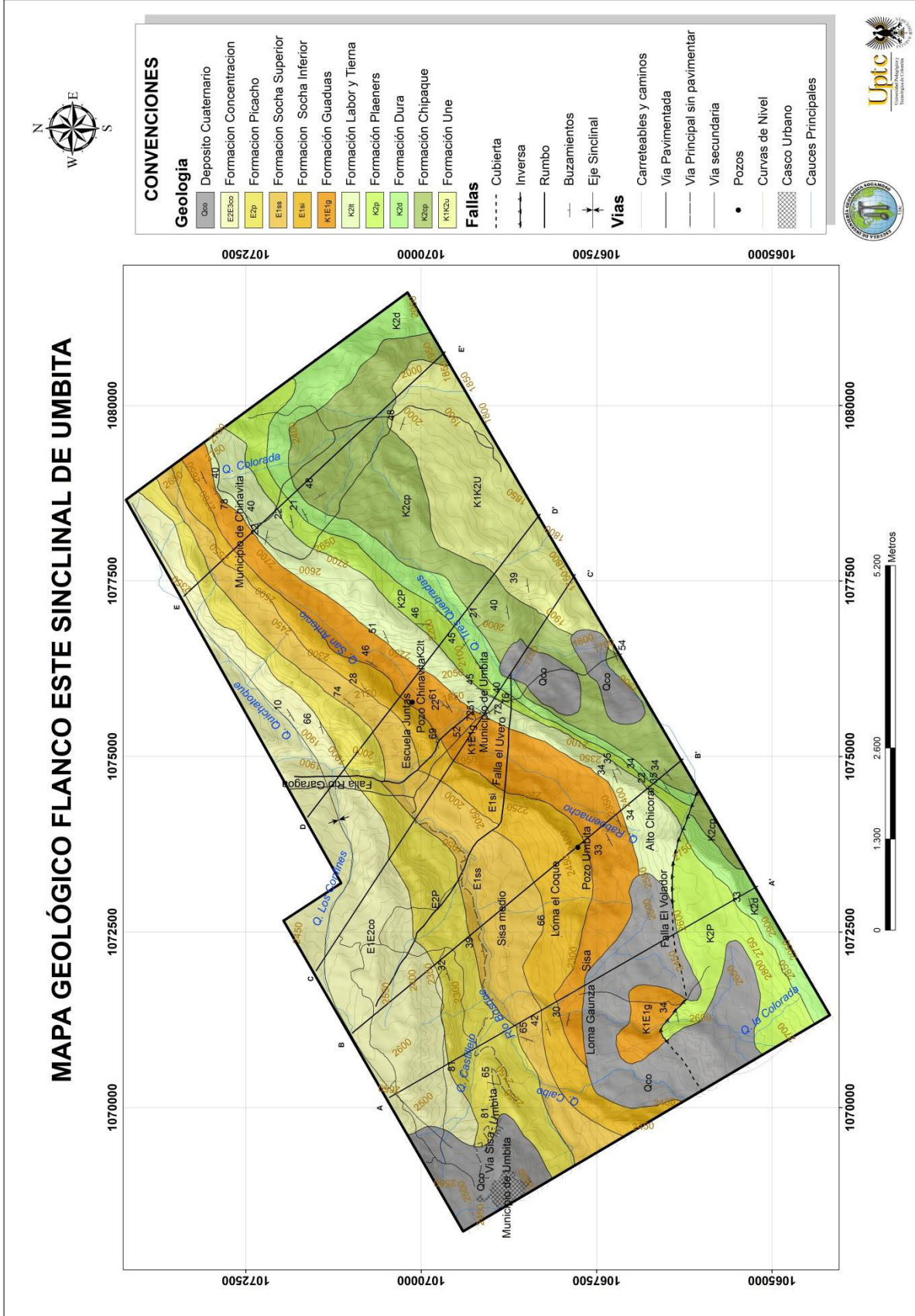
Falla de tipo inverso, aproximadamente de 7 km que pone en contacto rocas de la formación Guaduas con rocas de la formación Plaeners.

4.2.2 ESTRUCTURAS

4.2.2.1 Sinclinal de Úmbita

Esta estructura tiene una extensión superior a los 36 km y una amplitud de unos 10 km; fue cartografiado por Ulloa *etal.* (1975) su nombre se debe al municipio de Úmbita sitio por el cual pasa la estructura. Este sinclinal presenta dirección general N40° a 45°E pero el trazo de su eje es sinuoso por lo cual en algunos sectores toma orientación E-W. Es un pliegue suave, subvertical, con inmersión débil al noreste en cuyo núcleo aparecen rocas de la Formación Concentración. La estructura presenta complicaciones estructurales debido a replegamientos internos, especialmente de Úmbita hacia el SW, y por tener fallado sus flancos.

Imagen 4: Mapa Geológico de la Zona de Estudio

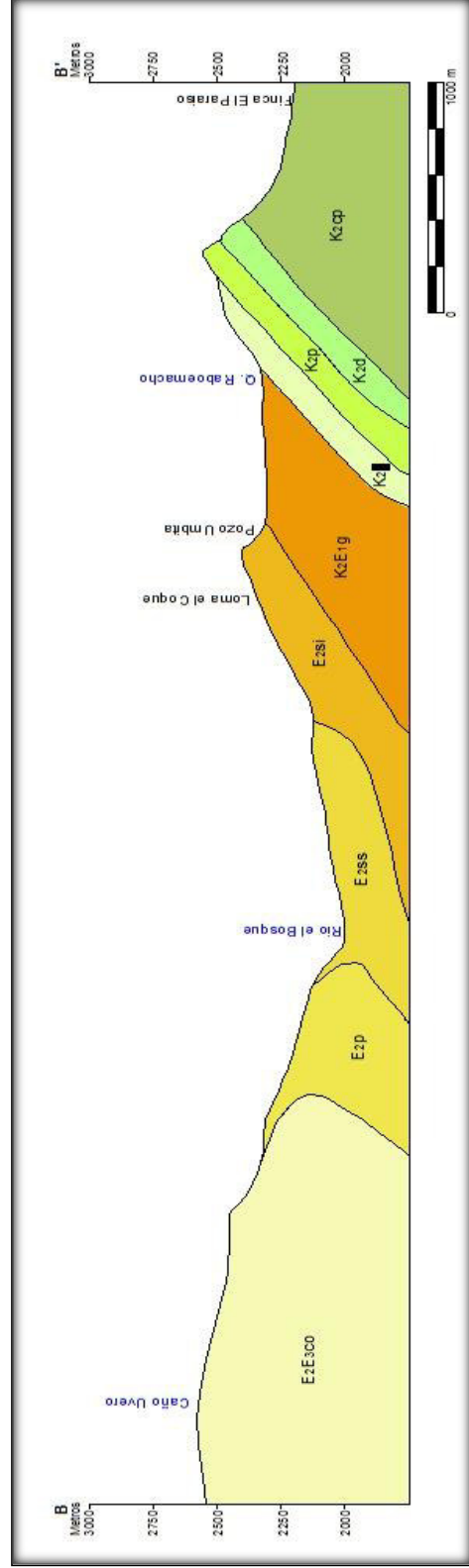
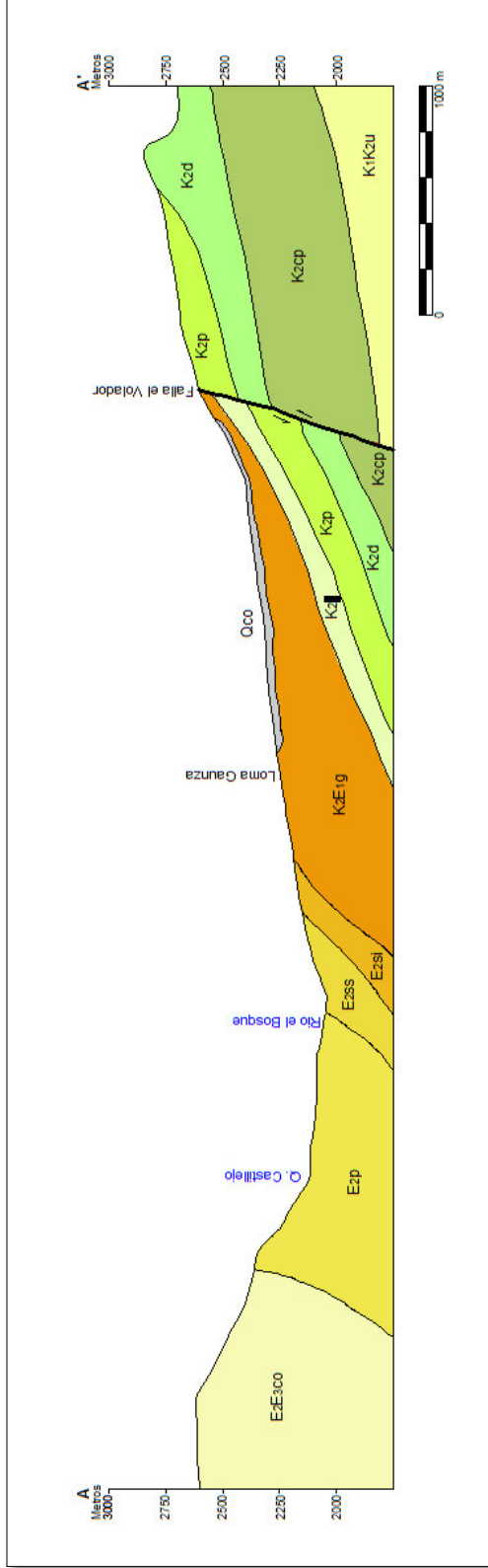


Fuente: Autores

Para efectos del comportamiento de las rocas se trazaron cinco perfiles en la zona de estudio para mostrar una secuencia de lo que sucede en las formaciones.

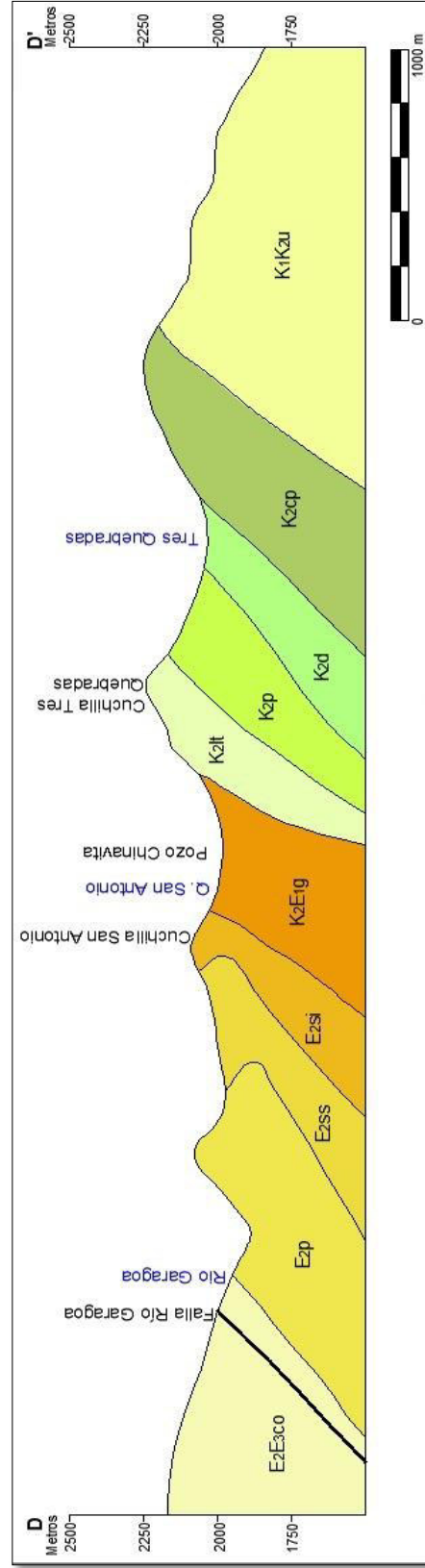
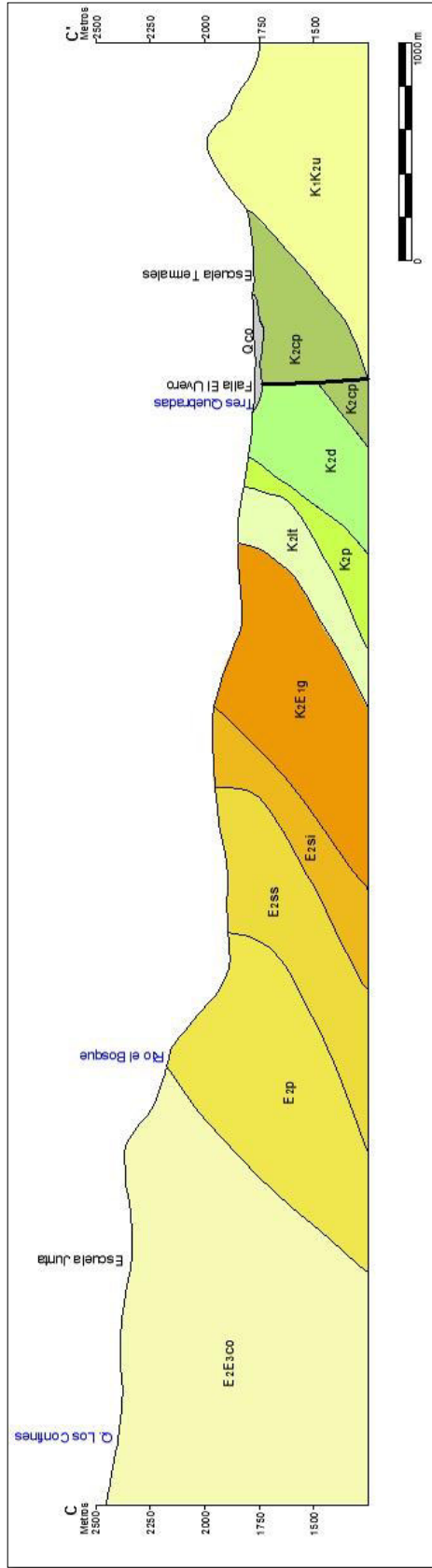
Los perfiles tienen una orientación NW- SE y dos de estos, los correspondientes a la nomenclatura B-B' y D-D' cortan perpendicularmente las perforaciones direccionadas con extracción de núcleo para estudios de Gas metano asociado al carbón realizadas por el servicio Geológico colombiano.

Imagen 5: Perfiles A-A' y B-B' al Oeste de la zona de estudio



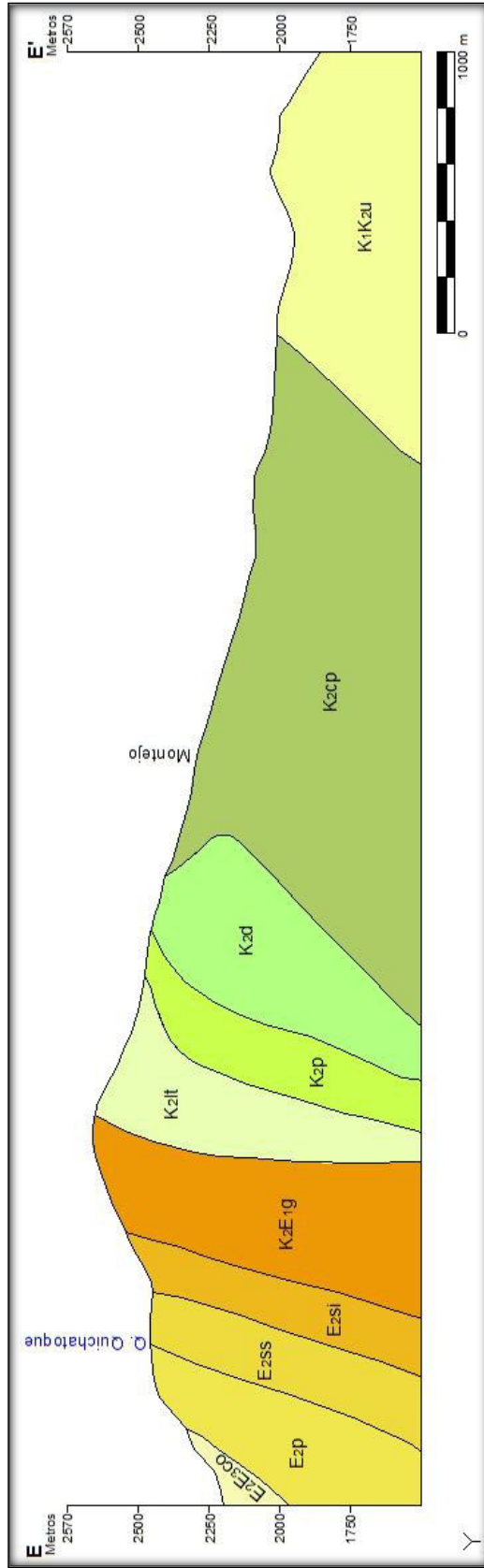
Fuente: Autores

Imagen 6: Perfiles C-C' y D-D' hacia el centro de la zona de estudio



Fuente: Autores

Imagen 7: Perfil E-E' al Este de la zona de estudio



Fuente: Autores

5. GEOMORFOLOGIA

La geomorfología se define como la ciencia de las formas terrestres, en su estudio describe las formas del terreno y los procesos que condujeron a su formación; además investiga las interacciones de dichas formas y los procesos de su distribución espacial.⁶ Para el análisis geomorfológico se realizó una adaptación de la Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos escala 1:100.000, la cual es realizada por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2013, dicha metodología abarca los parámetros de morfometría, morfogénesis, morfodinámica (Ver Imagen 9, Anexo 6)

5.1 MORFOMETRIA

Trata de aspectos cuantitativos en términos de pendientes así como la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales.

5.1.1 Mapa de Pendientes

Para la realización de este mapa se utilizó el modelo digital de elevaciones (DEM), el cual se clasificó mediante el software Arcgis 9.3 basado en la clasificación del grado de pendiente de Van Zuidam (Ver Tabla 1).

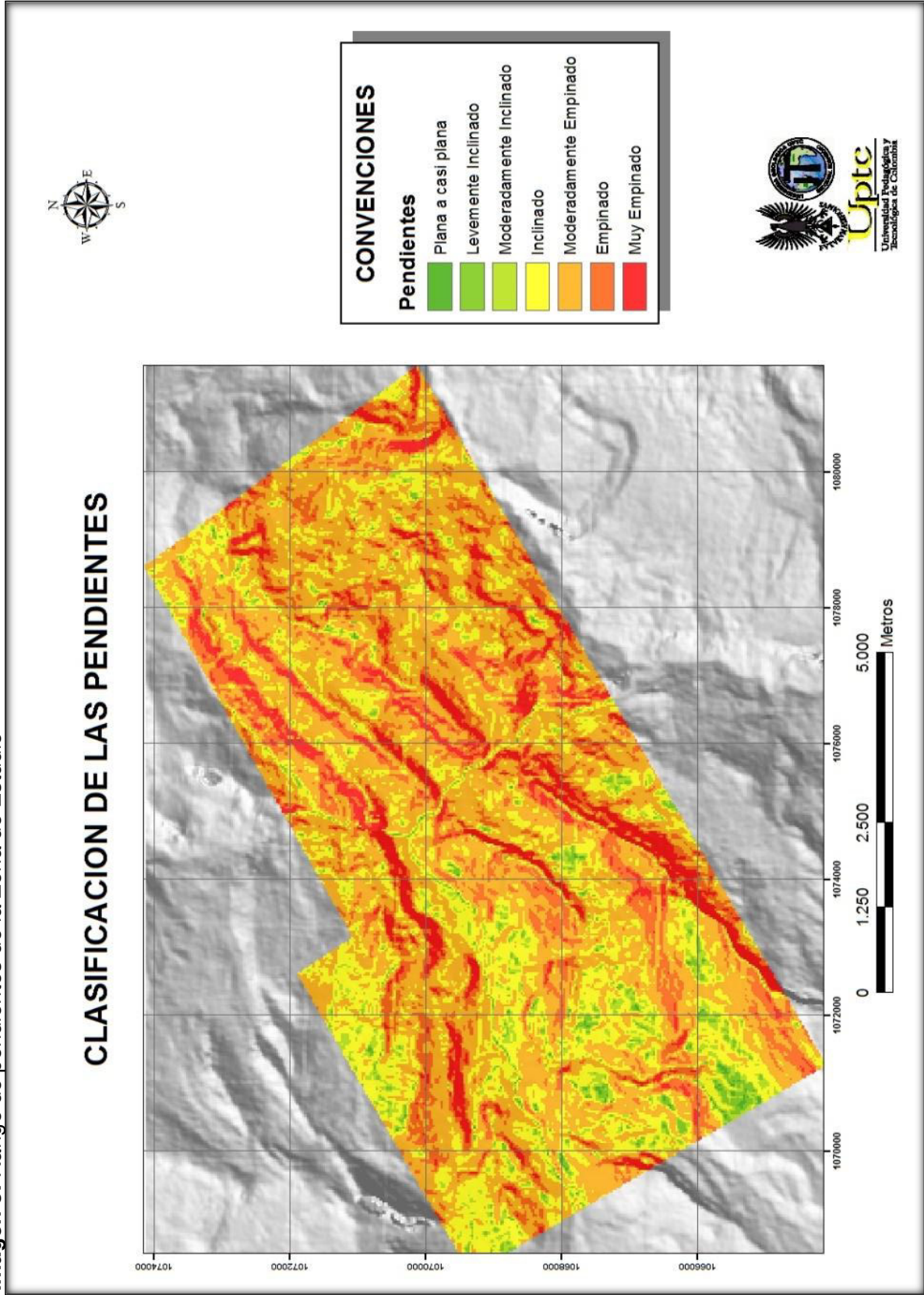
Tabla 1: Clasificación Pendientes Según Van Zuidam

INCLINACION DE LA PENDIENTE (°)	INCLINACION DE LA PENDIENTE (%)	CLASIFICACION
0 - 1.72	0 – 3	Plana a casi plana
1.72 - 4.1	3 – 7	Levemente Inclinado
4.1 - 6.8	7 – 12	Moderadamente Inclinado
6.8 - 14.1	12 – 25	Inclinado
14.1 - 26.5	25 – 50	Moderadamente Empinado
26.5 – 35	50 – 70	Empinado
>35	>70	Muy Empinado

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

⁶ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000, Bogotá D. C. Agosto de 2013

Imagen 8: Rango de pendientes de la Zona de Estudio



Fuente: Autores

Según el mapa de pendientes se puede observar que las formaciones Une, Dura, Tierna, Socha Superior Y Picacho presentan un pendiente en un rango de Empinado (50° - 70°) y muy empinado ($>70^{\circ}$), por lo que sus afloramientos son rocas arenosas competentes sometidas a procesos denudacionales fuertes. Al contrario las formaciones Chipaque, Plaeners, Guaduas, Socha Inferior y concertación están en un rango de pendiente entre moderadamente inclinado (3° - 7°) hasta Inclinado (12° - 25°). Los depósitos cuaternarios corresponden a pendientes planas a casi plana (0° - 3°).

5.2 MORFOGENESIS

La morfogénesis corresponde al origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo), que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones e intensidades, y durante intervalos de tiempos geológicos, modelando el terreno. La información morfogenética es representada en forma de unidades geomorfológicas; los parámetros de evaluación morfométrica permiten caracterizar una geoforma en su orden espacial individual y en su entorno, la morfogénesis junto a la morfocronología, recopila, explica y sintetiza la evolución geológica del relieve actual.⁷

5.2.1 Ambiente Denudacional

Incluye las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas por la acumulación de sedimentos.⁸

Altiplano (Da): Superficie plana con pendiente suavemente inclinada a muy inclinada, limitada por vertientes de pendiente inclinadas a muy escarpadas. Su origen es relacionado a partir de levantamientos tectónicos y por la acción conjunta de procesos denudacionales, erosión intensa y fluvial regional. Presenta una parte superior plana algunas a veces con morfología colinada a alomada y sus vertientes, con una longitud larga a extremadamente larga, generalmente

⁷ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000, Bogotá D. C. Agosto de 2013

⁸ Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos, Anexo A, glosario de unidades y subunidades geomorfológicas.

afectadas por procesos denudacionales acentuados por procesos de erosión y acumulación.

Escarpe de erosión mayor (Deem): Ladera abrupta o a desplome de altura variable que puede formarse por distintas causas: tectónicas, por la abrasión (erosión fluvial y marina), por procesos gravitacionales, glaciales, tectógenos. Eventualmente de longitud corta a larga, de forma cóncava, convexa y recta, con pendiente escarpada a muy escarpada.

Escarpe de erosión menor (Deeme): Ladera abrupta o a desplome de longitud corta a larga, de forma cóncavo convexa y eventualmente recta, con pendiente escarpada a muy escarpada, originado por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje.

Ladera erosiva – Dle: Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas, surcos y solifluxión, sobre materiales de suelo o roca. Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o una estructura.

Lomeríos poco disectados (Dlpd): Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con cimas planas amplias y eventualmente redondeadas, de laderas muy cortas a cortas, de forma rectas, y eventualmente cóncavas y convexas, con pendientes inclinadas a muy abruptas, e índice de relieve muy bajo a bajo. En estos lomeríos los procesos de incisión son muy leves y generalmente estas unidades se encuentran en áreas centrales de altiplanos o alejados de los frentes erosivos. Son frecuentes procesos erosivos y reptación y eventualmente movimientos en masa tipo deslizamiento rotacional.

Lomeríos disectados (Dldi): Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con cimas redondeadas y amplias, de laderas cortas a moderadamente largas de forma rectas, cóncavas y convexas, con pendientes muy inclinadas a muy abruptas, con índice de relieve bajo. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por la moderada disección, generando valles en U con fondo redondeado a plano. Se presentan movimientos en masa tipo deslizamiento rotacional con superficie de falla poco profundos.

Fotografía 14: Lomerío poco disectado de carácter denudacional debido a que se presentan en formaciones con composición arcillosa y depósitos cuaternarios, dicha geoforma se encuentra en el municipio de Umbita, vereda de Sisa medio. **N:** 1067197 **E:** 1074086 **Z:** 2363



Fuente: Autores

9.2.2 Ambiente fluvial y lagunar

Incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca.⁹

Cauce aluvial (Fca): Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas. Estos cauces cuando recorren grandes distancias pueden formar lagunas y rápidos. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo.

⁹ Ibid.,p.33

Dependiendo la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trezados, divergentes y otras unidades asociadas¹⁰

Fotografía 15: Rio Garagoa que genera esta geoforma a lo largo de su recorrido en los municipios de Chinavita y Umbita. Fotografía tomada desde el puente la carbonera
N: 1069506 **E:** 1075480 **Z:** 1825



Fuente: Autores

5.2.3 Ambiente Estructural

Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades.

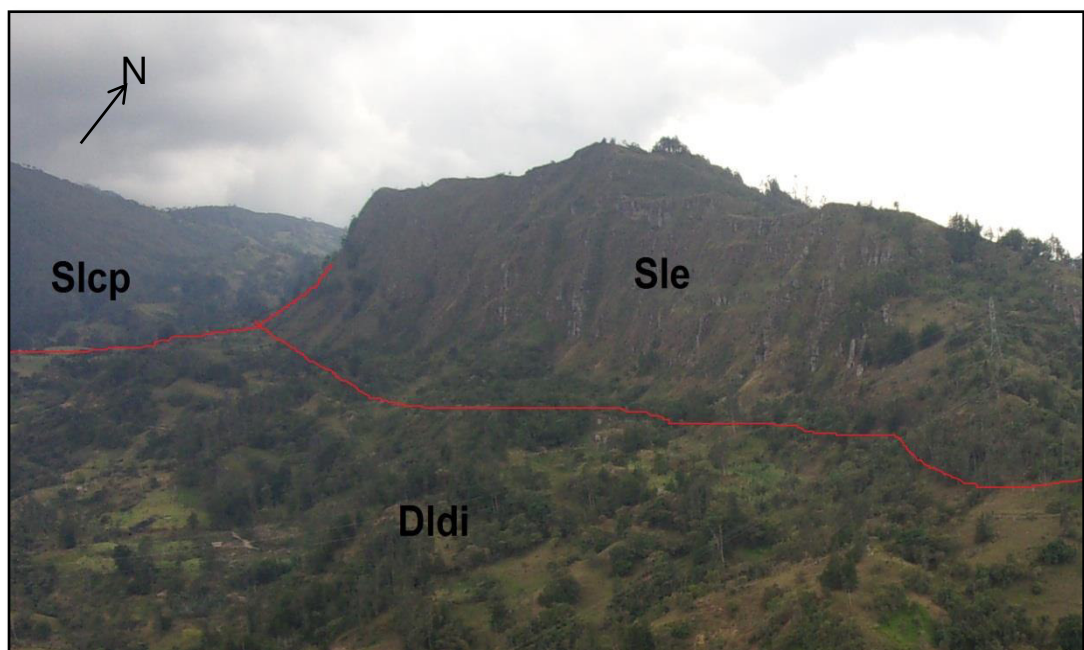
Ladera contrapendiente (Slcp): Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros)

¹⁰ Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos, Anexo A, glosario de unidades y subunidades geomorfológicas.

dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente inclinadas a muy escarpadas. En esta geoforma no está asociada a ninguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, monoclinal, entre otros).

Ladera estructural (Sle): Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) a favor de la pendiente del terreno. De longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente inclinadas a escarpadas. En esta geoforma no está asociada a ninguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, monoclinal, entre otros).¹¹

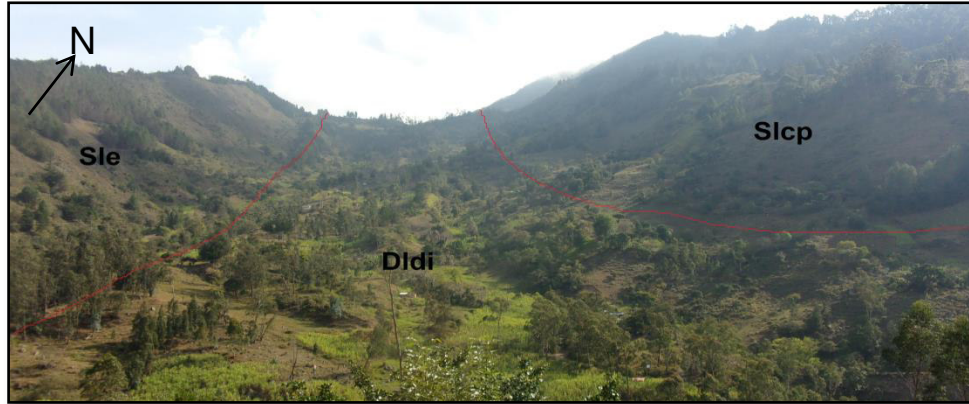
Fotografía 16: Ladera estructural ubicado en el municipio de Umbita sobre la formación Socha Inferior que presenta areniscas muy competentes, seguido de lomerío disectado.
N: 1070340 **E:** 1076151 **Z:** 2200



Fuente: Autores

¹¹ Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos, Anexo A, glosario de unidades y subunidades geomorfológicas.

Fotografía 17: Municipio de Chinavita veredas Usillo y Juncal. Se observa la formación guaduas levemente plana limitada por ladera estructural de la formación Socha Superior y ladera de contrapendiente de Labor Tierna. **N:** 1069618 **E:** 1075702 **Z:** 1860



Fuente: Autores

5.3 MORFODINÁMICA

Los procesos morfodinámica corresponden a una serie de acciones sucesivas, simultaneas y sinérgicas a través de los cuales los agentes morfogenético principalmente los externos son capaces de modelar la superficie terrestre. Los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la erosión de la roca, el transporte de los materiales removidos y sedimentación de dichos detritos. En consecuencia los procesos morfodinámicos dependen de una serie de factores externos e internos.¹²

5.3.1 Procesos Endógenos

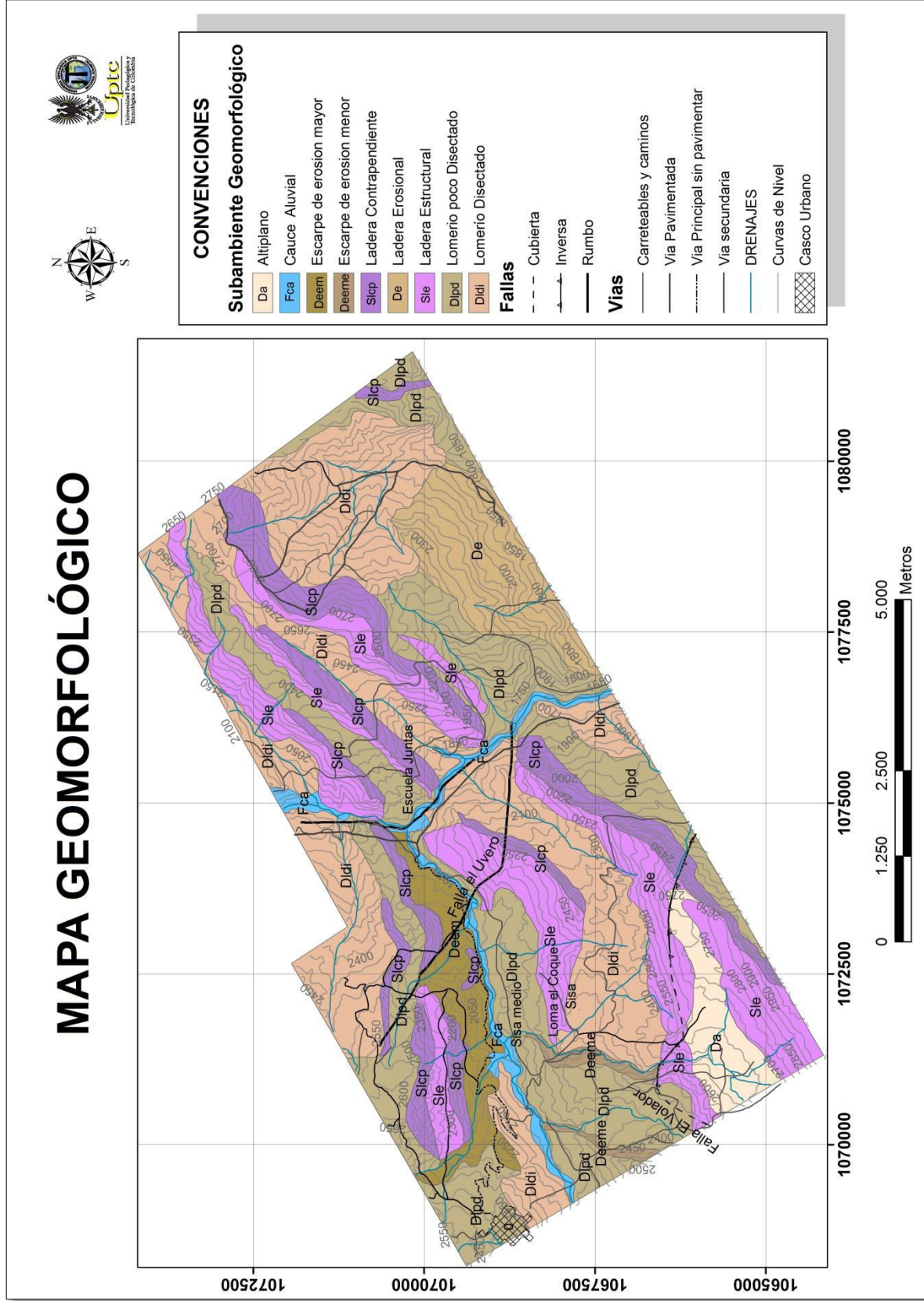
Están relacionados con los movimientos tectónicos, procesos orogénicos de la región, entre los que interviene la distensión, compresión, plegamiento y fallamiento del relieve natural que modifican la geomorfología, en el área de estudio evidencias de esto son el sinclinal de Umbita, las fallas inversas y de cabalgamiento que generan escarpes.

5.3.2 Procesos Exógenos

Son los procesos denudativos y agradacionales debido a la acción de diferentes agentes como el agua, viento, actividad biológica y antrópica que actúan sobre la superficie. En la zona de estudio se encuentra alta actividad minera que tiene interacción en la superficie.

¹² Ibid.,p.33

Imagen 9. Mapa Geomorfológico de la Zona de Estudio



Fuente: Autores

6. DEFINICION DEL ESTADO DEL ARTE

El gas asociado al carbón, CBM (Coalbed Methane), es el término utilizado para hacer referencia a los gases producidos (en especial Metano) y acumulados en los mantos de carbón durante el proceso de maduración o carbonificación de la materia orgánica; aunque históricamente se ha considerado un riesgo para las actividades mineras, en la actualidad es una de las principales fuentes de producción de gas Natural en el mundo, es por esto que muchos países han implementado y estudiado este hidrocarburo no convencional.

Para comprender la generación del Gas Metano asociado al carbón se deben tener en cuenta diferentes factores tales como:

- Rango del Carbón
- Tipo de Composición Maceral del Carbón
- Historia de Enterramiento y cobertera de la Cuenca
- Factores Hidrogeológicos

6.1 EL CARBÓN COMO GENERADOR DE CBM

El carbón se define como un mineral orgánico el cual se forma debido a la acumulación y descomposición de la materia orgánica en ambientes lacustres, palustres o marinos de poca profundidad Rionda R, 2010; los restos vegetales son sepultados en el fondo de la cuenca para la posterior desintegración por acción de bacterias anaeróbicas.

La Carbonificación es el proceso en el cual ocurre una transformación de la Turba en Carbón y presenta principalmente dos etapas: Una primera etapa en la cual por procesos diagénéticos la materia orgánica se transforma en turba y la segunda etapa cuando por metamorfismo continúa la carbonificación por acción de la presión y la Temperatura.

Durante la diagénesis, los organismos comienzan a desintegrarse por la acción de bacterias oxidantes o aeróbicas en zonas poco profundas, a medida que ocurre un enterramiento se establece un medio con ausencia de oxígeno; es allí en donde comienza la actuación de las bacterias anaeróbicas o reductoras; en esta etapa hay producción de ácidos húmicos los cuales van acidificando en medio eliminando el oxígeno quedando la materia orgánica enriquecida en Carbono. La acumulación de sedimentos ayuda a preservar este medio para que continúe el proceso de carbonificación.

La formación del carbón se inicia con la sedimentación de la materia orgánica; que da origen a la Turba (Ver Figura 1). Para que se generen potentes mantos de carbón, es necesario que la materia orgánica se preserve en un lugar apto para que haya gran acumulación, dicho lugar se denomina turbera; así mismo es necesario que haya un ascenso del nivel del mar a la misma velocidad en que ocurre la acumulación de los restos vegetales.

Aunque la biodegradación química es la fase inicial en el proceso de carbonificación, el enterramiento y la sobrecarga en los estratos aumentan la presión y la temperatura en el subsuelo; dando origen a procesos fisicoquímicos que continúan con la carbonificación. Al liberarse el agua y los gases como el Dióxido de carbono y metano se presenta un aumento en el rango del carbón dándole una mayor madurez. Los rangos van desde Turbas, Lignito, Sub-Bituminosos, Bituminosos hasta Antracitas con mayor grado de madurez.

El gas formado en la carbonificación tiene dos medios de Generación: El biogénico y el termogénico. El gas formado por mecanismos biogénicos se caracteriza porque tiene temperaturas por debajo de los 50°C en la etapa inicial de la carbonificación, donde la materia sufre una descomposición microbial, de la que se desprende el gas (Mariño, Mojica, 2015). El gas de origen térmico se forma por arriba de los 50°C, es decir cuando la materia orgánica se encuentra a grandes profundidades con un gradiente geotérmico alto, en donde el rango del carbón también incrementa. (Mariño, Mojica, 2015)

Figura 1. Proceso de carbonificación de la materia orgánica



Fuente: <https://www.google.com.co/search?q=proceso+de+carbonificaci%>

6.2 RANGO DEL CARBÓN

Se ha demostrado que el contenido de gas en los mantos de carbón es directamente proporcional a su rango, el cual evalúa la calidad y madurez térmica de la materia orgánica. La producción de gas sucede desde la formación de las turbas hasta la formación de los carbones antracíticos. Los carbones de bajo rango tales como Lignito y sub-bituminoso contienen gas biogénico. Cuando los carbones adquieren un rango bituminoso alto en volátiles la generación de gas es de tipo termogénico. En la medida en que la maduración de los carbones aumenta, el carbón se va enriqueciendo en carbono liberando gases principalmente metano (Rice y otros, 1993).

Para determinar el rango del carbón se definen parámetros como: Carbono fijo, Reflectancia a la vitrinita (R_o), Poder Calorífico, Contenido de Ceniza, Contenido de azufre, contenido de materia volátil.

6.2.1 Tipo de carbón

Como se mencionó anteriormente los carbones se producen a partir de la acumulación de materia orgánica vegetal. En los estudios petrográficos a estos restos se les denomina macérales y se clasifican en tres grandes grupos:

- Vitrinita: constituido por restos de tejidos leñosos de tallos y raíces, es el grupo más abundante en el carbón.
- Liptinita: formado de restos de resinas, algas, ceras, cutículas de hojas.
- Inertinita: formada por restos de tejidos leñosos, hongos que han sufrido alteraciones y oxidación.

Por la composición química de los macérales es de resaltar que los carbones ricos en vitrinita y liptinita tienen un mayor potencial generador de gas metano que los que contienen mayor proporción de macérales ricos en Inertinita. Aunque la composición final depende en la mayor parte de la historia geológica que de los constituyentes originales (Thomas 2002).

6.3 PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO Y DE LA COBERTERA DE LA CUENCA

El termino profundidad de cobertera hace referencia a la profundidad actual de los sedimentos que se encuentran sobre la capa de carbón y la profundidad de enterramiento se conoce como la máxima profundidad a la que ha sido sometido el carbón durante toda su historia geológica y define la mayoría de las veces el rango del carbón, es controlada por la subsidencia, que en ultimas regula el aporte de materiales a la cuenca.

La profundidad de la cobertera es un indicador potencial del metano en el carbón, teniendo en cuenta que este potencial también depende de otros factores como la permeabilidad del carbón (Mariño, Mojica, 2015). Los parámetros como rango, poder calorífico, humedad, materia volátil, la reflectancia a la vitrinita son alterados por los incrementos en la temperatura asociada al incremento de la profundidad de enterramiento (Rightmire, 1984).

6.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Los pliegues, fallas, la inclinación de las capas y las zonas de fractura son claves cuando se realizan estudios de CBM, ya que intervienen en la producción de gas metano y agua y son factores determinantes en la permeabilidad del carbón. En zonas en donde la inclinación de las capas es alta, el incremento de la cobertera es mayor, por lo que aumentaría el contenido del gas. Se ha demostrado que zonas con fallas en donde ocurren pequeños desplazamientos promueven la acumulación de metano ya que se desarrolla mayor permeabilidad del carbón. Las fallas de tipo normal pueden cortar las capas de interés y por tanto limitar las reservas que yacen en la zona, Las fallas de tipo inverso pueden tener un efecto contrario, ya que pueden duplicar el manto y por ende, incrementar la cantidad de carbón y gas metano (Mariño, 2015).

6.5 ALMACENAMIENTO DE GAS METANO EN LOS YACIMIENTOS DE CARBÓN

El gas metano asociado al carbón puede almacenarse de diferentes formas: (Ver Figura 2)

- Como gas disuelto en el agua
- Como gas libre dentro de las fracturas.
- Como moléculas de gas adsorbidas en el carbón.

Las altas presiones conservan el gas en la matriz del carbón en un estado de adsorción (El gas se adhiere a la superficie del poro) y absorción (El gas se adhiere a la estructura interna del carbón). El gas contenido en las moléculas del carbón representa cerca del 98% del gas acumulado en los mantos, el porcentaje restante corresponde al gas disuelto en el agua y al gas libre en fracturas. El almacenamiento del CBM depende básicamente de la porosidad y permeabilidad.

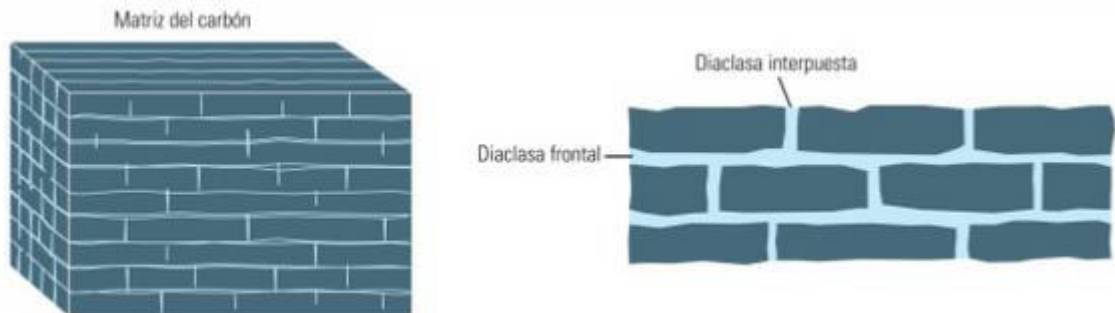
Figura 2. Esquema de Adsorción y Absorción del gas



Fuente: Ochoa, Vargas 2011

Las fracturas en el carbón (Ver Figura 3) son llamadas Cleat, son el resultado de la contracción de la materia orgánica y se producen perpendicular a la estratificación. Un conjunto de fracturas se denomina juego de Cleat y pueden ser de dos tipos: los Face Cleat que representan las fracturas frontales, son los más desarrollados; los butt Cleat son menos desarrollados y se forman perpendicular a los Face cleats.

Figura 3. Fracturas en el carbón



Fuente: Adaptado de Al- Jubori et. al, 2009

El carbón se caracteriza por tener una doble porosidad natural, la matriz o porosidad primaria y los macroporos o porosidad secundaria. La matriz es representada por Cleat que van espaciados por diámetros entre 5-10 Amstrong. Los macroporos son representados por los sistemas de fracturas naturales Face Cleat y los Cleat butt. La porosidad en la masa del carbón está en los microporos, pero la red de fractura proporciona la permeabilidad para que fluyan los fluidos (Gash, 1991). La mayoría del metano es almacenado por adsorción física y no en los espacios intergranulares de la matriz como el caso de areniscas. La matriz del carbón proporciona una gran porosidad para almacenar CBM, aunque también depende del rango del carbón, la temperatura y la presión.

La permeabilidad está directamente relacionada con las fracturas naturales Cleat y su orientación es controlada por las estructuras tectónicas. Para que el flujo se produzca, la permeabilidad debe estar por encima de 1 milidarcy. Medir esta propiedad es sumamente complicado debido a que las muestras de corazón sacadas en los carbones no resisten ensayos convencionales. Las pruebas de pozo son los procedimientos más indicados para medir la permeabilidad.

6.6 HIDROGEOLOGIA RELACIONADA A YACIMIENTOS DE GAS METANO ASOCIADO AL CARBON.

Aunque en los yacimientos no convencionales se habla de factores hidrológicos, se hace referencia básicamente para realizar un control del agua a la hora de realizar las perforaciones para extraer el gas metano debido a que se debe reducir la presión e iniciar el flujo del gas. Recientes estudios 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 (Scott y Kaiser 1996).

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. Cuando las condiciones de permeabilidad son adecuadas; las fracturas en el carbón se saturan, como consecuencia del confinamiento la presión puede subir por encima de la presión hidrostática por lo que el yacimiento entraría en condiciones de sobrepresión. En un yacimiento de CBM la hidrodinámica provoca adsorción del gas en la superficie del carbón, manteniendo presión en él.

Para los estudios hidrogeológicos se deben tener en cuenta aspectos de vital importancia como permeabilidad, presión, dirección de flujo, Hidrogeoquímica, recarga y temperatura.

Permeabilidad: se define como una medida de la capacidad de la roca para conducir un fluido bajo un gradiente hidráulico, con el fin de incluir las características del fluido se utilizan términos como permeabilidad intrínseca o conductividad hidráulica. La unidad de medida para la permeabilidad es el Milidarcy ($9.89 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) y está relacionada con la cantidad de fracturas que contiene la matriz del carbón dando valores entre 1 y 60 Milidarcys. En 1993 estudios realizados por Gash y otros en la cuenca de San Juan, Colorado encontraron que para carbones sometidos a 6,895 Mpa de presión, la permeabilidad paralela a los planos en dirección de los Face Cleat era entre 0,6-1,7 Milidarcys y para los butt Cleat entre 0,3 y 1 Milidarcy. Como la permeabilidad en las capas de carbón depende de las fracturas se deben tener en cuenta diferentes factores:

- La fracturación se relaciona con la presión de confinamiento, si esta es reducida habrá cierre de fracturas por lo que se reducirá la permeabilidad.
- La permeabilidad es mayor en los Face Cleat o fracturas frontales por lo que su comportamiento es anisótropo.
- Si hay presencia de mineralizaciones en las fracturas, se puede reducir la permeabilidad
- La permeabilidad disminuye con la profundidad debido al incremento de los sedimentos acumulados.
- Al liberarse la presión de confinamiento a la que está sometida el yacimiento, se aumenta la cantidad de fracturas por lo que hay un aumento de la permeabilidad.

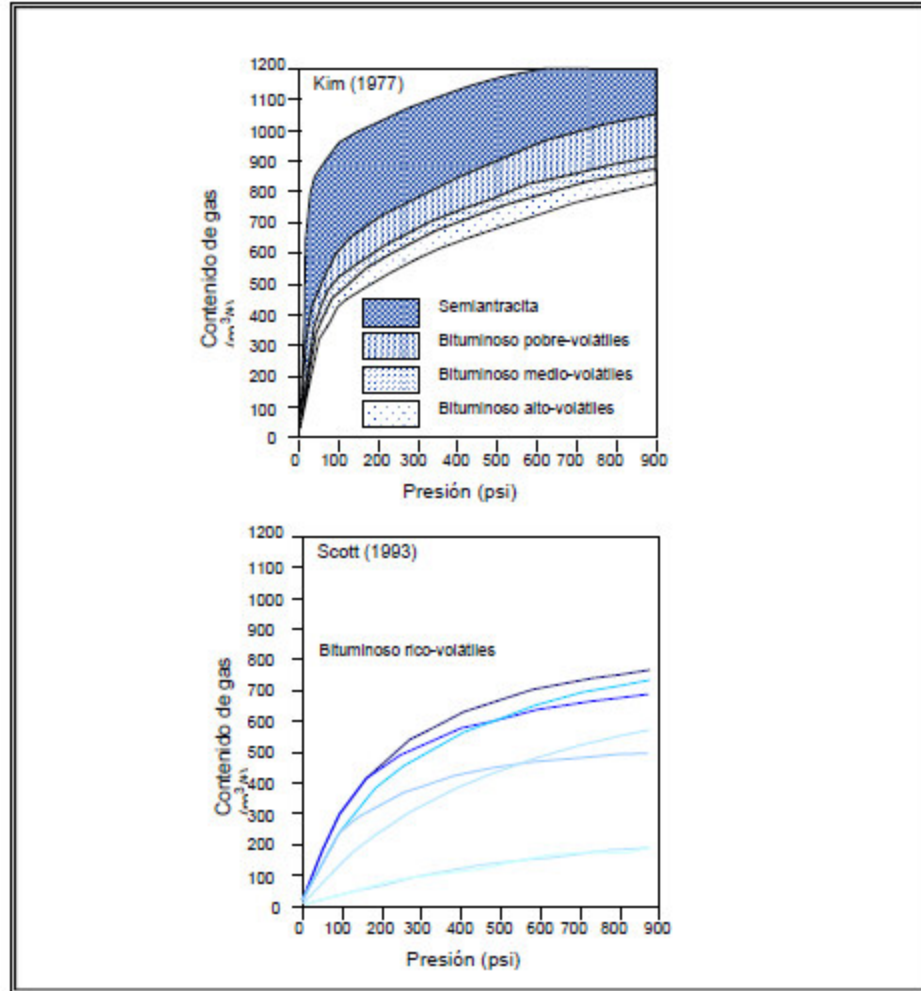
Presión: se define como la fuerza por unidad de área que actúa sobre una superficie siendo su unidad más común el Psi. La presión puede ser hidrostática (cuando es provocada por fluidos en los espacios porosos de la roca) o litostática (cuando la presión es provocada por la roca).

Es importante determinar el comportamiento del régimen de presiones en la cuenca, este puede ser subpresurizado, normal o sobrepresurizado, se dice que el régimen de presiones es normal cuando estas son iguales a la hidrostática. Los campos con grandes producciones están asociados a condiciones de sobrepresurización artesiana por recarga meteórica donde se puede producir un flujo vertical hacia arriba que ayuda no solamente en el aumento de la presión sino también en la concentración del metano (Ver Figura 4). Esa óptima condición es la que da lugar a un “fairway” o zona donde las condiciones óptimas se presentan de manera concordante y como resultado los contenidos de CBM son altos¹³.

Hidrogeoquímica: A partir de análisis de iones de agua se pueden caracterizar el funcionamiento de acuíferos, además ayudan a identificar zonas de recarga y descarga así como conocer posibles zonas de formación de gas biogénico. El contenido de los elementos en el agua depende de factores como presión, temperatura, el contacto e interacción roca agua. Por ejemplo, Los mapas de contenido en cloro se usan con el fin de trazar la dirección de flujo, porque los iones de cloro no participan en las interacciones roca- agua o en las reacciones oxido-reductoras. La cantidad de sólidos disueltos aumenta con el tiempo de permanencia en la roca. La relación entre el contenido de cloro en las aguas y la presencia de aguas meteóricas demuestra que las aguas poco cloradas son aguas jóvenes que tienen alguna relación con las aguas meteóricas de recarga.

¹³ Mariño Jorge, Mojica Lucila, Aspectos metodológicos de los Yacimientos de CBM, Gas asociado al Carbon, Geología, contenido, Reservas, minería y posibilidades en Colombia, Editorial UPTC, 2015

Figura 4. Dependencia del rango del contenido en gas con el aumento de la presión.



Fuente Fuente: Varios autores (1991). Coalbed Methane of Western North America. Rocky Mountain Association of Geologists. Gas Research Institute.

Potencial y dirección de flujo: A partir de este punto se determinan las características hidráulicas de los acuíferos. La carga hidráulica representa la altura a la que el agua podría elevarse en un piezómetro abierto en determinado punto. La carga hidráulica permite dibujar redes de flujo, determinar áreas de recarga y descarga y la dirección predominante en las aguas.

7. DESCRIPCIÓN LOCAL DE LA FORMACIÓN GUADUAS

7.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el año 2014 el Servicio Geológico Colombiano (SGC), realizo estudios de Gas metano asociado al Carbón en el área del sinclinal de Umbita, enfocándose principalmente en el flanco oriental de la estructura, sector Umbita- Chinavita. En los trabajos ejecutados en la zona se identificaron hasta 13 Mantos de carbón (M1 –M13) con espesores entre 0.4 y 3 metros intercalados principalmente con arcillolitas y esporádicas capas de areniscas de grano fino hacia la parte superior (Ver Imagen 11). El sistema de fracturas es poco definido sobresaliendo los face Cleats en el techo de la formación, sin presencia de relleno. Las fallas presentes en el sector afectan la continuidad en los mantos de carbón y adelgazamientos en los mismos. Los ángulos de inclinación de la secuencia carbonífera varían entre 8 y 85° y hacia la parte norte se presentan inversiones debido a la acción de la falla del Rio Garagoa.

Como parte de estudios en el subsuelo se realizaron dos perforaciones direccionadas con recuperación de núcleo, en donde además se corrieron registros eléctricos y de temperatura. Las profundidades perforadas son de 520 metros hacia la parte sur de la zona de estudio en el pozo denominado Umbita 1, y de 580 metros hacia la parte Norte del área, Pozo Chinavita 1. Dentro de los registros eléctricos se corrieron, Registros rayos gamma, de densidad, y resistividad. Los datos se muestran a continuación:

- **Pozo Úmbita -1**¹⁴

Los registros corridos en este pozo fueron Densidad y Gamma Ray hasta 519,0 m de profundidad y dentro de tubería, la resistividad se hizo por intervalos como: (0 – 120) m y (270 – 315), el de temperatura entre 0 – 120 m.

Registro Gamma Ray. Los intervalos del registro presenta valores que varían entre 0 y 200 unidades API, los valores promedios presentes en el registro son medios altos debido a la presencia de material tipo arcillolitas y limolitas. Las capas de carbón, presentan valores medios de radioactividad con valores entre 17 y 40 API.

¹⁴ Servicio Geológico Colombiano, SGC. Exploración Gas metano asociado al carbón, área Úmbita Rondón. Recursos Energéticos. Bogotá, Diciembre 2014.

Registro de Densidad. La escala empleada para este registro esta entre 1 a 3 g/cm³., registrándose en el caso de las capas de carbón valores entre 1,15 g/cm³ a 1,35 g/cm³, para los materiales como limolitas y areniscas se registran valores entre 1,5 g/cm³ a 2,75 g/cm³. Siendo este último valor de los más altos para las areniscas.

Registro de Temperatura. La escala de valores empleada en este registro esta entre 5 y 25°C, en el tramo que se registra entre 0 a 120,0 m, la curva obtenida permite identificar un aumento de temperatura con la profundidad, teniendo en cuenta el valor registrado en superficie de 17°C. Infortunadamente el registro solo llega hasta una profundidad de 120,0 m, sin poder registrar y correlacionar respecto a la profundidad las capas de carbón y demás litología presente en el pozo.

Resistividad. Los valores obtenidos están expresados en unidades de Ohm- m, en los tramos que se presenta el carbón no se puede correr este registro, aun así las arcillolitas carbonosas y areniscas presentan los más altos valores de resistividad en comparación con las limolitas las cuales según la escala de medición (0.2 – 100) ohm-m, presentan valores medios bajos.

- **Pozo Chinavita-1**

En este pozo no se hizo ningún tipo de registro de 428, 0 m hacia abajo ya que la ruptura de la tubería y no poder rescatarla impidió el desarrollo del mismo. Se realiza densidad hasta 408,0 m y Gamma hasta 415,0 m; la lectura de temperatura con tubería se hace de 0 a 415,0 m y sin tubería solo se hace en el tramo entre 408,0 – 420,0 m.

Registro Gamma Ray. Los intervalos del registro presentan valores que varían entre 0 y 200 unidades API, los valores promedios presentes en el registro son medios altos en razón a la predominancia de capas de limolitas y arenitas, los niveles de carbón presentan valores de radiactividad entre 23 y 40 API.

Registro de Densidad. Respecto a este registro, se toma como referencia una escala entre 1,0 a 3,0 g/cm³. La sonda indica valores entre 1,10 a 1,30 g/cm³ para las capas de carbón y valores de 2,75 a 2,90 g/cm³ para las capas de areniscas.

Registro de Temperatura. Para este registro, se empleó una escala entre 20 y 40 °C, con un valor cerca de la superficie de 21 °C; vale la pena mencionar que este registro se toma dentro de la tubería, en el tramo que va de 0 a 415,0 m, la curva obtenida permite identificar un aumento de temperatura con la profundidad, llegando a una temperatura de 32 °C a los 415,0 m.

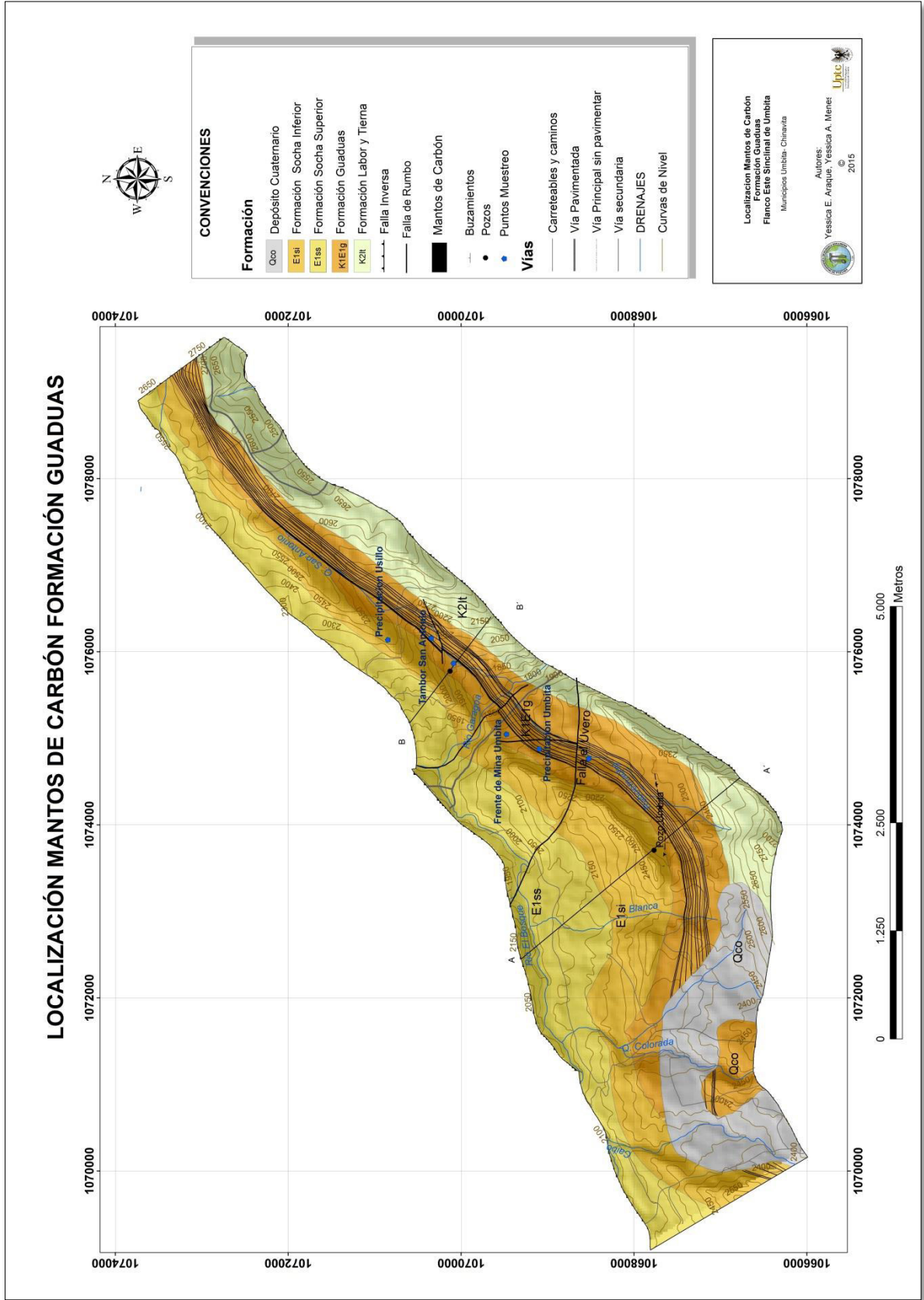
Con el fin de conocer la evolución térmica de la cuenca carbonífera del cretáceo tardío al paleoceno temprano se realizaron técnicas de Termocronología- Huellas de Fisión, Reflectancia a la Vitrinita, Isotopos estables ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) y Geocronología U/Pb. En total se obtuvieron un total de 27 muestras en las diferentes formaciones geológicas, de las cuales algunas se tomaron para determinar la incidencia de fallas geológicas en el control de la evolución térmica que pudo haber tenido la cuenca en el tiempo de exhumación de la misma y se tomaron 14 muestras para análisis de isotopos estables. De los análisis se concluyó que los carbones y el gas de la Formación Guaduas se generaron por acumulación y enterramiento de sedimentos durante la etapa de catagénesis siendo el material generador plantas arbóreas de ambientes húmedos asociados a zonas de inundación aluvial y pantanos. Los carbones de la Formación Guaduas alcanzaron su rango y madurez entre los 45 Ma y 18 Ma y se estimó que la exhumación de la cuenca sedimentaria en el sinclinal ocurrió hace al menos 6 Ma. También se concluye que la máxima paleotemperatura de las rocas de esta unidad corresponde a 110°C (SGC, 2014).

Se realizaron análisis a 30 muestras de carbón colectadas en los pozos y diferentes frentes de mina con el fin de determinar el rango del carbón; Los estudios físico- químicos arrojaron un poder calorífico entre 12500 y 14000 Btu/Lib, contenido de cenizas entre 0.75 y 1.30. Humedad de equilibrio promedio de 2.90%, Gravedad especifica verdadera entre 1.14 a 1.60 con una media de 1.30. A partir de los resultados, se obtuvo una clasificación del rango del carbón de Bituminoso alto en volátiles A, B, C según la Norma ASTM. Los datos de Reflectancia a la vitrinita (R_o) establecen valores entre 0.45 y 0.70, con lo cual se califican los carbones como Bituminoso alto en Volátiles C y Sub bituminoso C.

Se realizaron datos de medición Gas metano en los mantos de carbón en la zona, los cuales dieron como resultado contenidos de gas total libre de cenizas entre 57.64 a 308.07 pies³/ton para el Pozo Chinavita-1; para el Pozo Umbita-1 el valor es de 12.90 a 60.85 pies³/ton y para las muestras de frente de mina del sector de interés arrojó valores de 7.28 a 28.77 pies³/ton. Los mantos de carbón que mayor contenido de gas total libre de cenizas registraron corresponden a los Mantos: 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12 de la Formación Guaduas, ubicados en el flanco Oriental del Sinclinal de Ñmbita.

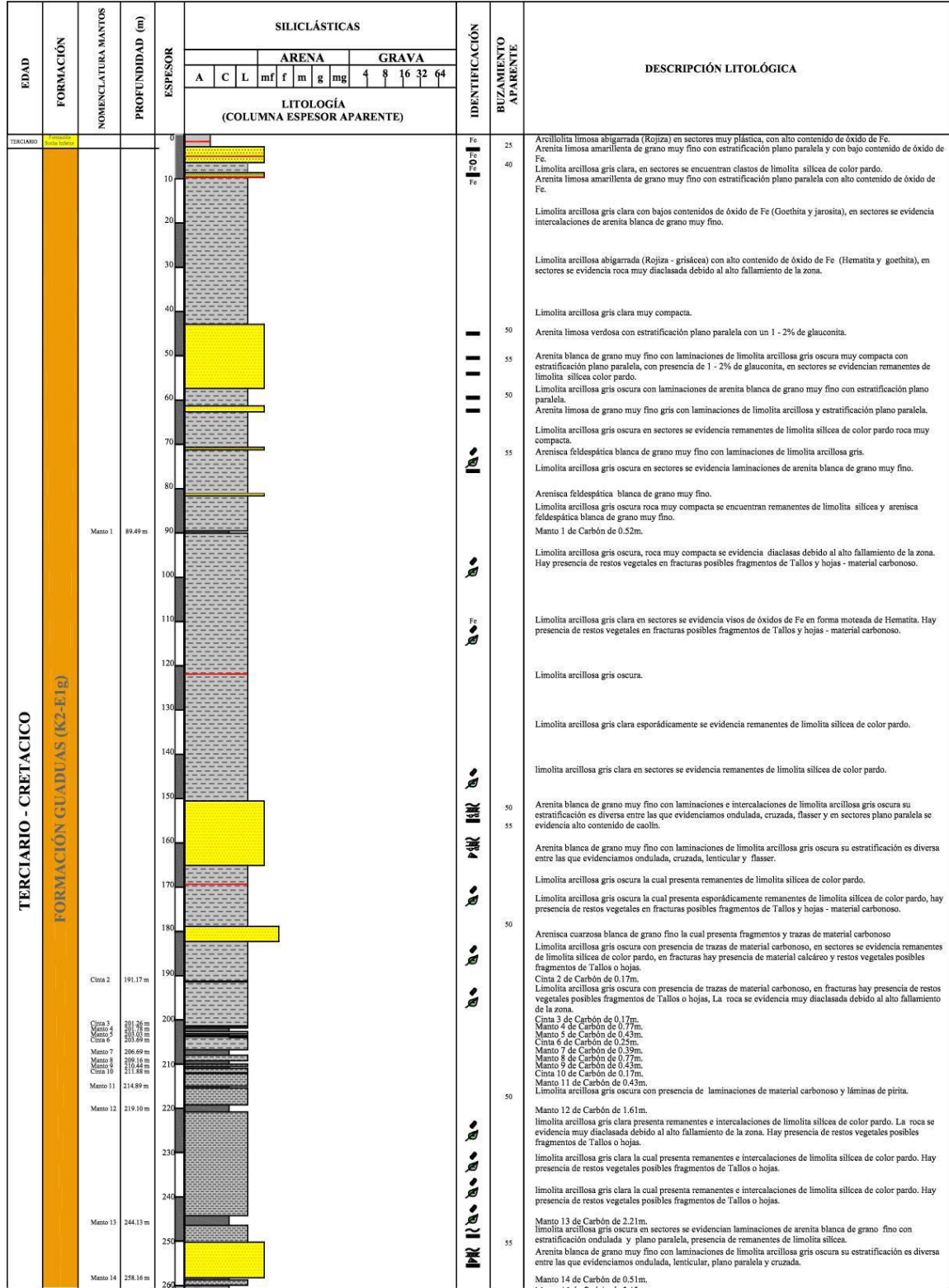
Para el entendimiento del estado estructural de las capas de carbón se realizó un mapa de la formación guaduas graficando los mantos de carbón (Ver Imagen 10) complementado con dos cortes geológicos (Ver Imagen 12 y 13), teniendo en cuenta los puntos de afloramiento superficial, subterráneo y las columnas descritas a partir de las perforaciones realizadas en cada uno de los pozos.

Imagen 10. Mapa Geológico Formación Guaduas



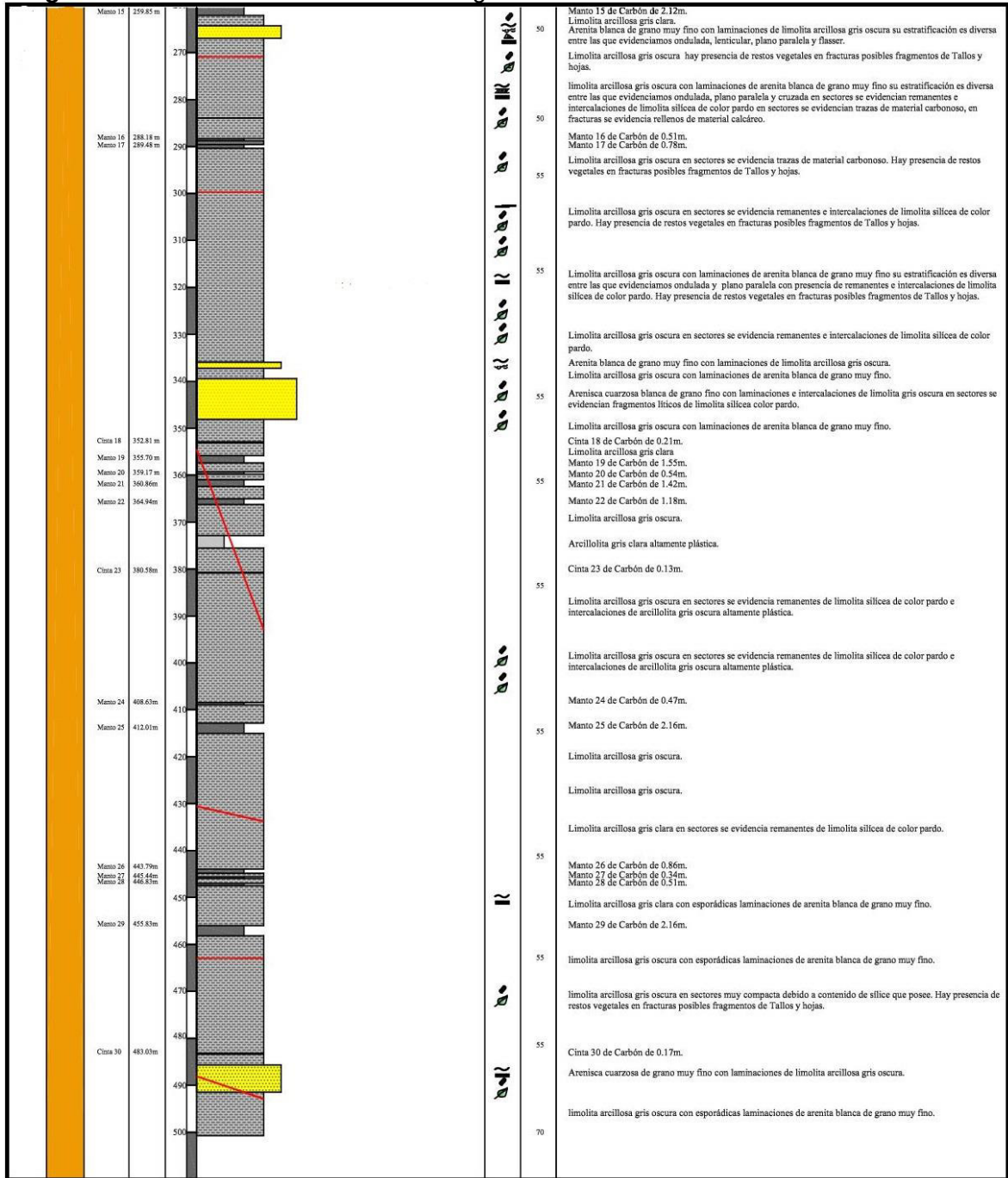
Fuente. Autores

Imagen 11. Columna Estratigráfica Formación Guaduas



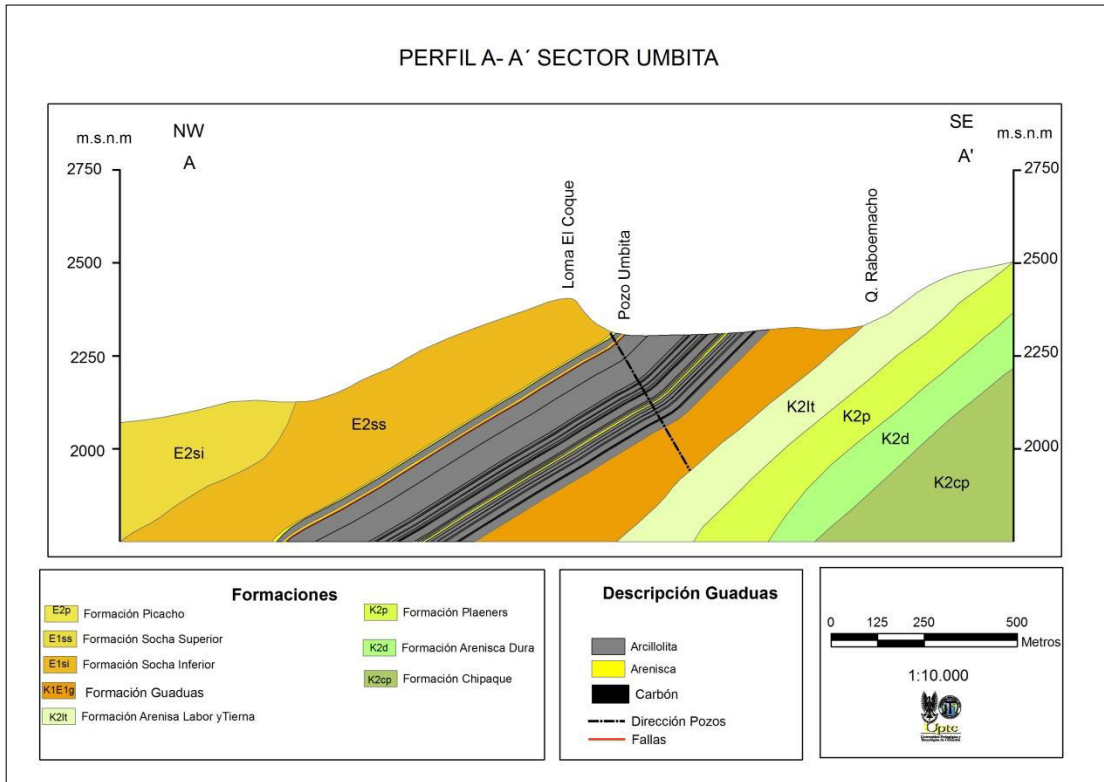
Fuente. SGC

Imagen 11. Continuación Columna Estratigráfica Formación Guaduas



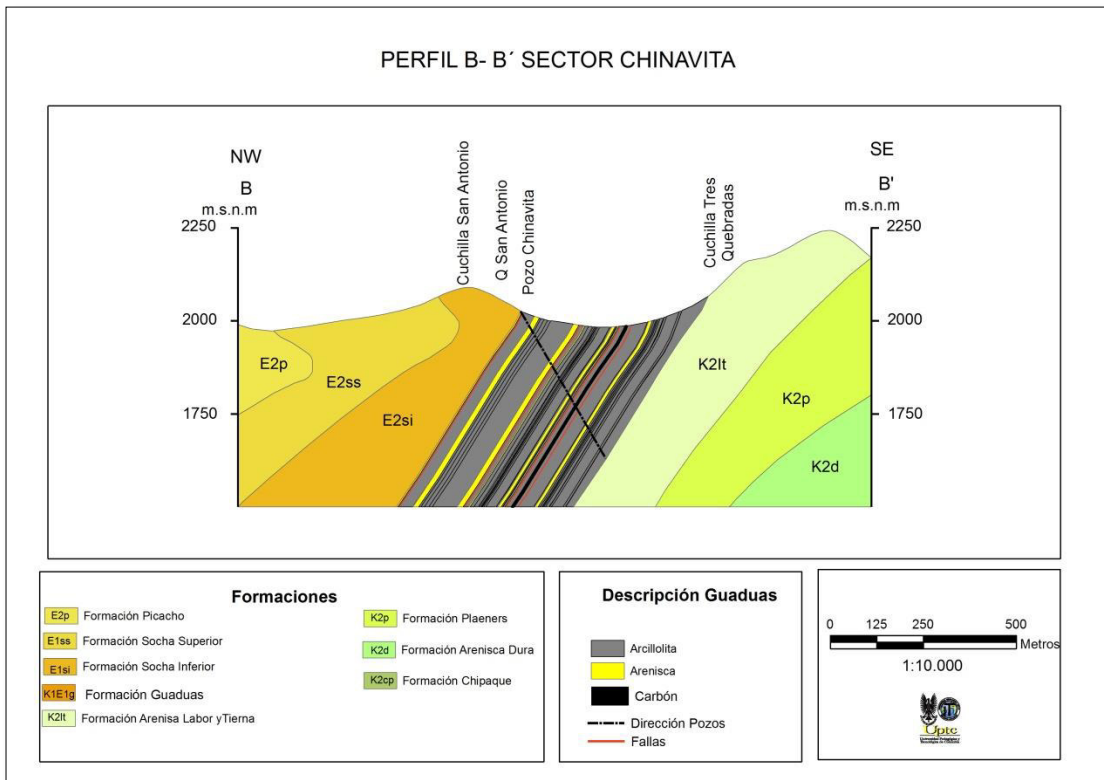
Fuente. SGC

Imagen 12. Perfil Geológico Formación Guaduas Sector Ñmbita



Fuente. Autores

Imagen 13. Perfil Geológico Formación Guaduas Sector Chinavita



Fuente. Autores

7.2 ANÁLISIS CONTENIDOS DE GAS METANO ASOCIADO AL CARBÓN (CBM) CASO SINCLINAL DE ÛMBITA

En el estudio desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano y la UPTC para la exploración de CBM, en la zona carbonífera de Boyacá sobre el área Ûmbita – Laguna de Tota, desarrollaron dos perforaciones sobre el flanco este del sinclinal de Ûmbita en los municipios de Ûmbita y Chinavita, sobre la formación Guaduas, los cuales alcanzaron profundidades de 520 m y 580 m.

Para evaluar los contenidos de CBM tomaron 32 muestras de carbón, 27 muestras de las perforaciones (10 muestras del Pozo Ûmbita 1 y 17 muestras del pozo Chinavita 1) y las demás de frentes de mina, utilizando canister de PVC y Aluminio.

Los contenidos de Gas total (Gas perdido, desorbido, residual y total libre de cenizas) pertenecientes a el pozo Chinavita 1 se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de CBM (Gas total) pozo Chinavita 1

ID de Muestra	Manto	Espesor (m)	Profundidad (m)		Material (roca)	Gas perdido (pies ³ /ton)	Gas Desorbido (pies ³ /ton)	Gas Residual (pies ³ /ton)	Gas Total (pies ³ /ton)	Gas Total Libre de Cenizas	
			Desde	Hasta						m ³ /t	pie ³ /t
PChi-1:1	Cinta	0,35	103,34		Carbón	4,03	20,31	8,46	32,8	1,63	57,64
PChi-1:2	M13	1,22	233,01	233,47	Carbón	1,25	30,67	40,79	72,71	2,56	90,49
PChi-1:3	M11	0,93	241,51	242,56	Carbón	2,75	66,28	11,09	80,12	3,01	106,34
PChi-1:4	M11	0,93	243,01	243,61	Carbón	3,01	105,4	19,24	127,65	4,8	169,34
PChi-1:5	M10	1,2	254,31	254,81	Carbón	8,06	106,04	21,37	135,47	5,32	187,84
PChi-1:6	M9	1,47	282	282,4	Carbón	2,58	74,32	17,82	94,72	3,1	109,49
PChi-1:7	M8	1,41	300,05	300,71	Carbón	5,29	115,68	11,57	132,54	4,33	152,9
PChi-1:8	M7	1	333,5	333,95	Carbón	14,42	105,37	14,23	134,02	4,23	149,32
PChi-1:9	M6	1,03	411,22	411,92	Carbón	61,02	175,58	33,71	270,31	8,73	308,07
PChi-1:10	M5	1	417,09	417,72	Carbón	-	63,08	10,45	73,55	2,5	88,36
PChi-1:11	M4	0,8	421,7	422,67	Carbón	42,51	164,37	31,59	238,47	7,69	271,33
PChi-1:12	-		475,2	475,76	Limolita	1,36	34,3	14,58	50,24	1,42	50,24
					Arcillosa						
PChi-1:13	M3	1,43	475,75	476,55	Carbón	7,24	80,24	7,35	94,83	3,15	111,19
PChi-1:14	-		512,4	513,1	Arcillolita	9,17	21,19	13,25	43,61	1,24	43,61
PChi-1:15	M2	0,8	513,13	514	Carbón	34,89	144,26	50,1	229,25	8,07	285,2
PChi-1:16	M1	1,61	526,35	527,45	Carbón	41,36	120,95	48,38	210,69	6,89	243,55
PChi-1:17	-		562,55	563,4	Arenisca	0,51	1,38	0,3	2,19	0,06	2,19

Fuente. Mariño, 2014

Con respecto a estos resultados se consideran contenidos de CBM relativamente altos ya que muestras a profundidades de 514 m alcanzan contenidos de 285,2 pie³/t. sin embargo la muestra con mayor contenido encontrada en este pozo está a una profundidad de 411,92 m con un valor de CBM de 308,07 pie³/t.

Con respecto al pozo Ûmbita 1 los contenidos de Gas total (Gas perdido, desorbido, residual y total libre de cenizas) se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de CBM (Gas total) pozo Ñmbita 1

ID de Muestra	Manto	Espesor (m)	Profundidad (m)		Material (roca)	Gas perdido (pies ³ /ton)	Gas Desorbido (pies ³ /ton)	Gas Residual (pies ³ /ton)	Gas Total (pies ³ /ton)	Gas Total Libre de Cenizas	
			Desde	Hasta						m ³ /t	pie ³ /t
PU-1:1	M13	3,65	185,25	185,65	Carb3n	1,42	18,72	16,28	36,42	1,34	47,28
PU-1:2	M12	0,5	189,15	189,4	Carb3n	1,51	18,74	18,35	38,6	1,72	60,85
PU-1:3	M11	1,3	190,65	190,95	Carb3n	0,45	34,19	12,5	47,14	1,69	57,92
PU-1:4	M10	0,35	192,1	192,45	Carb3n	3,43	23,88	13,68	40,99	1,45	51,19
PU-1:5	M9	0,85	203,1	205,5	Carb3n	0,2	3,57	9,04	12,81	0,45	15,92
PU-1:6	M8	1,15	205,32	205,72	Carb3n	0,32	4,92	5,67	10,91	0,37	12,9
PU-1:7	M6	2,7	248,45	248,75	Carb3n	2,48	15,29	14,2	31,97	1	35,14
PU-1:8	M5	0,78	259,07	259,47	Carb3n	0,36	8,88	27,89	37,16	1,15	40,52
PU-1:9	M3	0,7	287,65	288,15	Carb3n	1,61	11,94	18,27	31,82	1,66	58,76
PU-1:10	M2	0,5	322,4	322,9	Carb3n	0,4	10,27	13,32	23,99	0,96	34,06

Fuente. Mariño, 2014

En esta perforaci3n los contenidos que encontraron son bastante menores en comparaci3n con los del pozo Chinavita1, a profundidades de 288,15 m el valor de CBM es de 58,76 pie³/t. La muestra con mayor contenido est3 a 189,40 m de profundidad con un valor de 60,85 pie³/t. En los frentes de mina tomaron cinco muestras de carb3n cuyos resultados est3n descritos en la Tabla 4. Los mayores contenidos de CBM fueron encontrados en la Mina San Antonio de Usillo ubicada en cercanías al pozo Chinavita 1, con contenidos de 26,77 60,85 pie³/t. Dentro de esta mina se tomaron dos muestras de agua para sus respectivos an3lisis fisicoquímicos.

Tabla 4. Resultados de CBM (Gas total) Frentes de Mina

ID de Muestra	Manto	Espesor (m)	Ubicaci3n de la muestra	Material (roca)	Gas perdido (pies ³ /ton)	Gas Desorbido (pies ³ /ton)	Gas Residual (pies ³ /ton)	Gas Total (pies ³ /ton)	Gas Total Libre de Cenizas	
									m ³ /t	pie ³ /t
FM:01		2,2	Mina La Rosa Vereda San Jose, Tibana	Carb3n	0,37	1,5	6,74	8,61	0,3	10,57
FM:02	M7	2,7	Mina El Sol, Vereda juncal, Umbita	Carb3n	0,04	1,15	4,98	6,17	0,21	7,28
FM:03	M6	2,9	Mina Carsa BM1, Vereda Juncal, Umbita	Carb3n	0,94	3,56	10,1	14,6	0,46	16,31
FM:04	M3	2,34	Mina San Antonio, Vereda Usillo, Chinavita	Carb3n	1,87	12,48	11,65	26	0,82	28,77
FM:05	M7	1,3	Mina San Antonio, Vereda Usillo, Chinavita	Carb3n	0,57	7,85	9,52	17,94	0,55	22,01

Fuente. Mariño, 2014

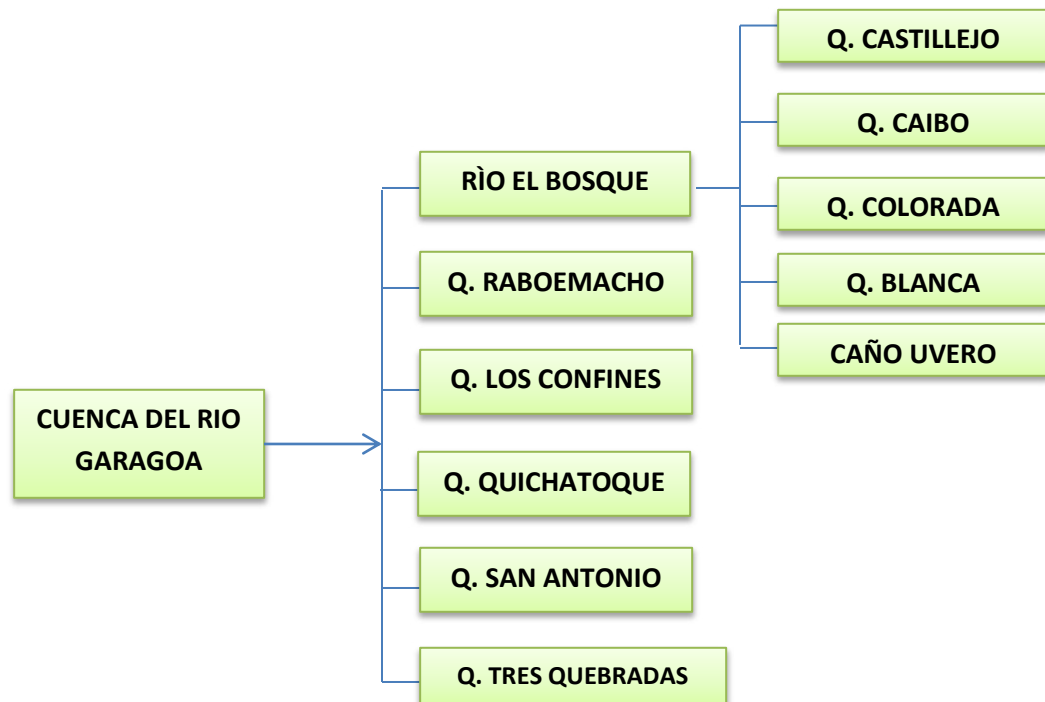
Las mayores acumulaciones de gas metano asociado al carb3n se presentan en el pozo Chinavita (Ver Tabla 2), en donde adem3s se identifica la principal zona de recarga hidrogeol3gica; as3 mismo, en esta 3rea hay presencia de numerosas fallas locales (Ver Imagen 13) las cuales pueden favorecer la infiltraci3n de agua y su intercomunicaci3n entre los diferentes mantos de carb3n.

En cuanto al sector de Ñmbita, la perforaci3n exploratoria debió ser interrumpida debido a la presencia de un acuífero con caudal de 15 l/s, factor que confirma el almacenamiento y/o circulaci3n de agua subterr3nea en estas formaciones.

8. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

8.1 HIDROGRAFÍA

Figura 5. Diagrama de distribución hidrográfica en la zona (Ver Imagen13)



Fuente. Autores

8.1.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua, puede estar dividida en subcuencas que son un área en la que su drenaje va directamente a un río principal de la cuenca; a su vez estas están subdivididas en microcuencas que son unidades más pequeñas en las que se originan quebradas y riachuelos cuyos cauces se dirigen hacia el río principal de la subcuenca.

8.1.2 Parámetros morfométricos

Estos parámetros permiten establecer la geometría de las cuencas definiendo las diferentes características que serán descritas a continuación¹⁵:

Área: Es el tamaño de la superficie de una cuenca medida en km², donde está limitada por las divisorias de aguas.

Longitud del cauce principal de la cuenca (L): Medida planimetría del cauce principal (Km).

Razón de elongación (Re): según Schum La razón de elongación se define como la razón del diámetro de un círculo (Dc) que tiene la misma área que la cuenca (A), a la longitud máxima de la cuenca (Lb); es decir, relaciona el diámetro de un círculo de área (A) igual a la de la cuenca y la longitud de la cuenca.

$$\text{Donde, } Re = 1,1284 \sqrt{A} / Lb$$

Re > 1 Cuenca Redonda

Re = 1 Cuenca Semirredonda

Re < 1 Cuenca Alargada

Factor de forma (Rf): El factor de forma según Horton expresa la relación existente entre el área de la cuenca (A), y el cuadrado de la longitud máxima o longitud axial de la misma (Lb).

$$Rf = A / L^2$$

Rf > 0,8 Cuenca Circular

Rf = 0,8 Cuenca Semicircular

Rf < 0,8 Cuenca Ovalada

Amplitud de la cuenca (W): Este factor permite conocer la escorrentía superficial y en qué grado o proporción se concentran las lluvias en un determinado punto de la cuenca.

$$\text{Donde, } W = A / L$$

W = 1 Tiempo de concentración de escorrentía muy rápido

W < 1 Tiempo de concentración de escorrentía crítico.

W > 1 Tiempo de concentración de escorrentía normal a lento.

¹⁵ C.H Londoño, Cuencas Hidrográficas: Bases Conceptuales- Caracterización- Planificación- Administración, Universidad del Tolima, 2001

Coeficiente de compacidad (Kc): según Gravelius El coeficiente de compacidad se obtiene al relacionar el perímetro de la cuenca (P), con el perímetro de un círculo (Pc), que tiene la misma área de la cuenca (A)

$$\text{Donde, } Kc = 0,2821 * P/\sqrt{A}$$

Kc 1 – 1,25 Compacta o redonda a oval redonda.

Kc 1,25 – 1,50 Oval redonda a oval oblonga.

Kc= 1,50 – 1,75 Oval oblonga a rectangular oblonga.

Kc > 1: Cuenca semicompacta rectángulo – oblonga

Pendiente Media del cauce Principal: La pendiente media total de las corrientes de agua, indica, también, el aspecto de la variación de algunas características físicas, químicas y biológicas de las aguas. Según el método de los valores Extremos la pendiente media del cauce principal se obtiene determinando el desnivel entre los puntos más elevado y más bajo del cauce y, luego, dividir este valor entre la longitud del mismo.

$$Pm = (\Delta H/L) * 100$$

Densidad de drenaje (Dd): según Horton es una de las propiedades fundamentales de una cuenca, que controla la eficiencia del drenaje y señala el estado erosivo; allí se relaciona la longitud de la totalidad de cauces de la cuenca con la superficie de esta última.

$$\text{Donde, } Dd = La/A$$

Dd < 1,5 km/km² : Baja

1,5 < Dd < 3,0 km/km² : Media

Dd > 3,0 km/km² : Alta

Para el área de estudio los valores encontrados preliminarmente fueron obtenidos a partir de datos suministrados por la entidad de CORPOCHIVOR, departamento de gestión ambiental. Con los que logra describir características de cada una de las subcuencas y Microcuencas presentes.¹⁶

8.1.3 Descripción de las subcuencas y Microcuencas hidrográficas

En las Tablas 5 y 6 se describen cada uno de los parámetros y características de las cuencas presentes en la zona de estudio.

¹⁶ Ibid.,p.41

Tabla 5. Parámetros morfométricos de subcuenca y microcuencas presentes en el área de estudio.

SUBCUENCA	PARAMETRO									
	AREA (Km2)	PERIMETRO (Km)	LONGITUD (Km)	RAZON DE ELONGACION	FACTOR FORMA	AMPLITUD DE LA CUENCA	COEFICIENTE DE COMPACIDAD	ALTURA MEDIA	PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL (%)	DENSIDAD DE DRENAJE
Rio el Bosque	15.597	31.065	7.061	0.631	0.313	2.209	2.119	2.019	5.028	1.413
MICROCUENCA	PARAMETRO									
	AREA (Km2)	PERIMETRO (Km)	LONGITUD (Km)	RAZON DE ELONGACION	FACTOR FORMA	AMPLITUD DE LA CUENCA	COEFICIENTE DE COMPACIDAD	ALTURA MEDIA	PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL (%)	DENSIDAD DE DRENAJE
Qda. El Caibo	2.157	6.435	2.550	0.650	0.332	0.846	1.236	2247	9.882	1.182
Qda. La Colorada	6.855	12.372	5.081	0.581	0.266	1.349	1.333	2.445	15.981	1.592
Qda. Los Confines	3.814	13.3	4.058	0.543	0.232	0.940	1.921	2225	16.081	1.061
Qda. Raboemacho	3.290	8.745	3.162	0.647	0.329	1.040	1.360	2.238	20.476	2.099
Qda. Quichatoque	6.194	11.493	5.804	0.484	0.184	1.067	1.303	2189	11.061	2.139
Qda. San Antonio	2.817	8.343	3.338	0.567	0.253	0.844	1.402	2196	23.637	1.776
Qda. Colorada	6.443	11.493	3.944	0.726	0.414	1.634	1.277	2234	21.095	1.471
Tres Quebradas	2.711	7.545	2.394	0.776	0.473	1.132	1.293	2141	31.412	1.983
Qda. Castillejo	2.550	7.346	2.891	0.623	0.305	0.882	1.298	2300	17.295	2.801
Qda. Soaquira	5.968	16.855	3.314	0.832	0.543	1.801	1.946	2196	30.59	0.555

Fuente. Autores

Tabla 6. Parámetros morfométricos de subcuenca y microcuencas presentes en el área de estudio.

SUBCUENCA	PARAMETRO							
	AREA	LONGITUD	RAZON DE ELONGACION	FACTOR FORMA	AMPLITUD DE LA CUENCA	COEFICIENTE DE COMPACIDAD	PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL	DENSIDAD DE DRENAJE
Rio el Bosque	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Normal a lenta	Semicompacta rectangular	Ligeramente Inclinado	Bajo
MICROCUENCA	PARAMETRO							
	AREA	LONGITUD	RAZON DE ELONGACION	FACTOR FORMA	AMPLITUD DE LA CUENCA	COEFICIENTE DE COMPACIDAD	PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL	DENSIDAD DE DRENAJE
Qda. El Caibo	Pequeña	Corto	Alargada	Circular	Escorrentia Normal a lenta	Semicompacta rectangular	Ligeramente Inclinado	Bajo
Qda. La Colorada	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Normal a lenta	Oval redonda a Oval Oblonga	Moderadamente Empinado	Bajo
Qda. Los Confines	Pequeña	Corto	Alargada	Circular	Escorrentia Critica	Semicompacta rectangular	Moderadamente Inclinado	Bajo
Qda. Raboemacho	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Rapida	Oval redonda a Oval Oblonga	Moderadamente Empinado	Media
Qda. Quichatoque	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Rapida	Oval redonda a Oval Oblonga	Fuertemente Inclinado	Media
Qda. San Antonio	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Critica	Oval redonda a Oval Oblonga	Moderadamente Empinado	Media
Qda. Colorada	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Normal a lenta	Oval redonda a Oval Oblonga	Moderadamente Empinado	Bajo
Tres Quebradas	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Normal a lenta	Oval redonda a Oval Oblonga	Empinado	Media
Qda. Castillejo	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Critica	Oval redonda a Oval Oblonga	Moderadamente Empinado	Media
Qda. Soaquira	Pequeña	Corto	Alargada	Ovalada	Escorrentia Normal a lenta	Semicompacta rectangular	Empinado	Bajo

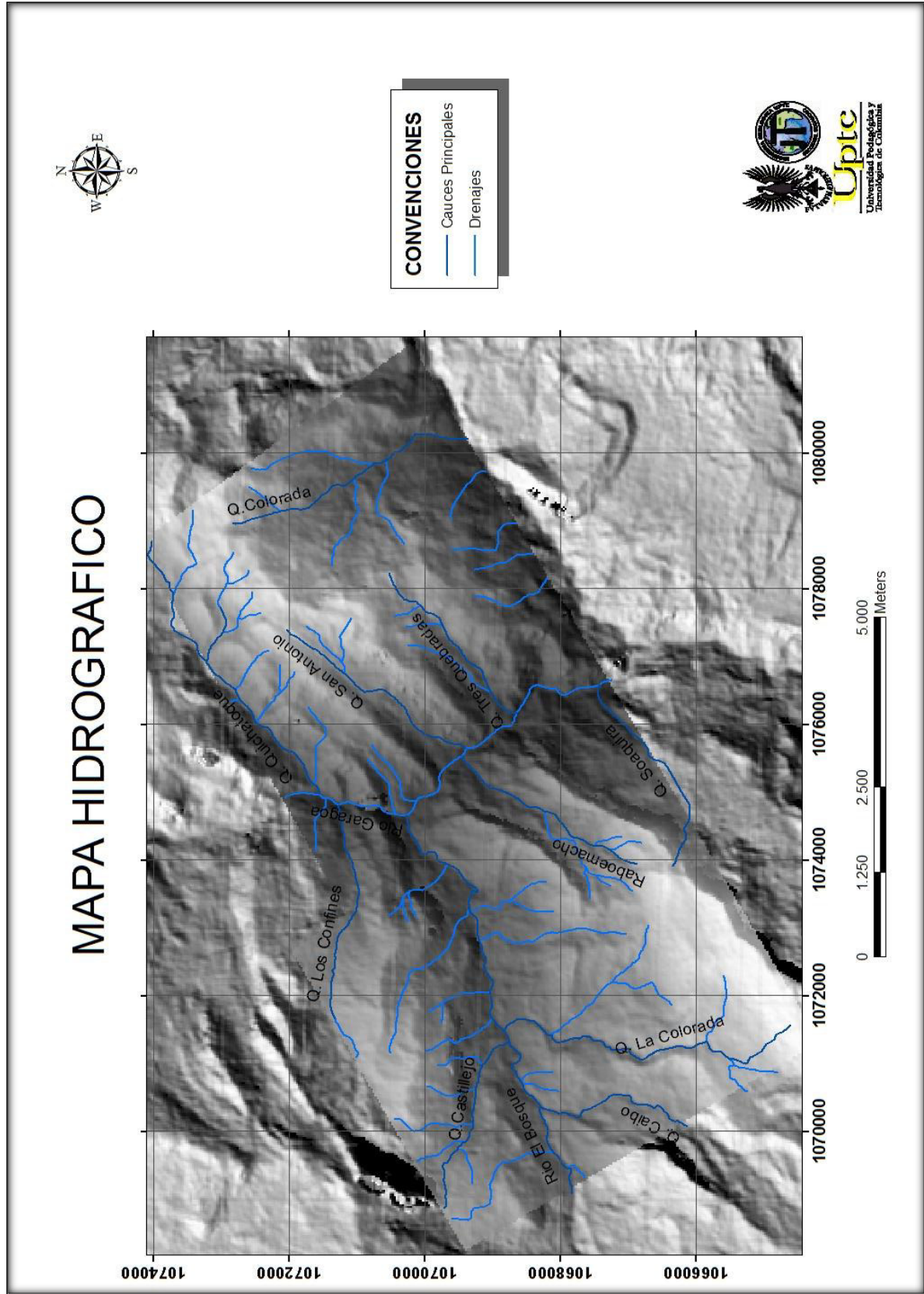
Fuente. Autores

Las microcuencas presentan área pequeña con longitud corta, razón de elongación alargada, factor forma circular y ovalada, la escorrentía que se determinó está en un intervalo de lento a rápida, pendientes moderadamente inclinado a empinado y densidad de drenaje bajo a medio.

A continuación se presenta el mapa hidrográfico, así como la delimitación de Microcuencas y subcuencas en el área de estudio (Ver Imagen 15). La Hidrografía fue adaptada del mapa topográfico escala 1:25000 del IGAC, suministrado de la base de datos de la mina San Antonio, Municipio Chinavita.

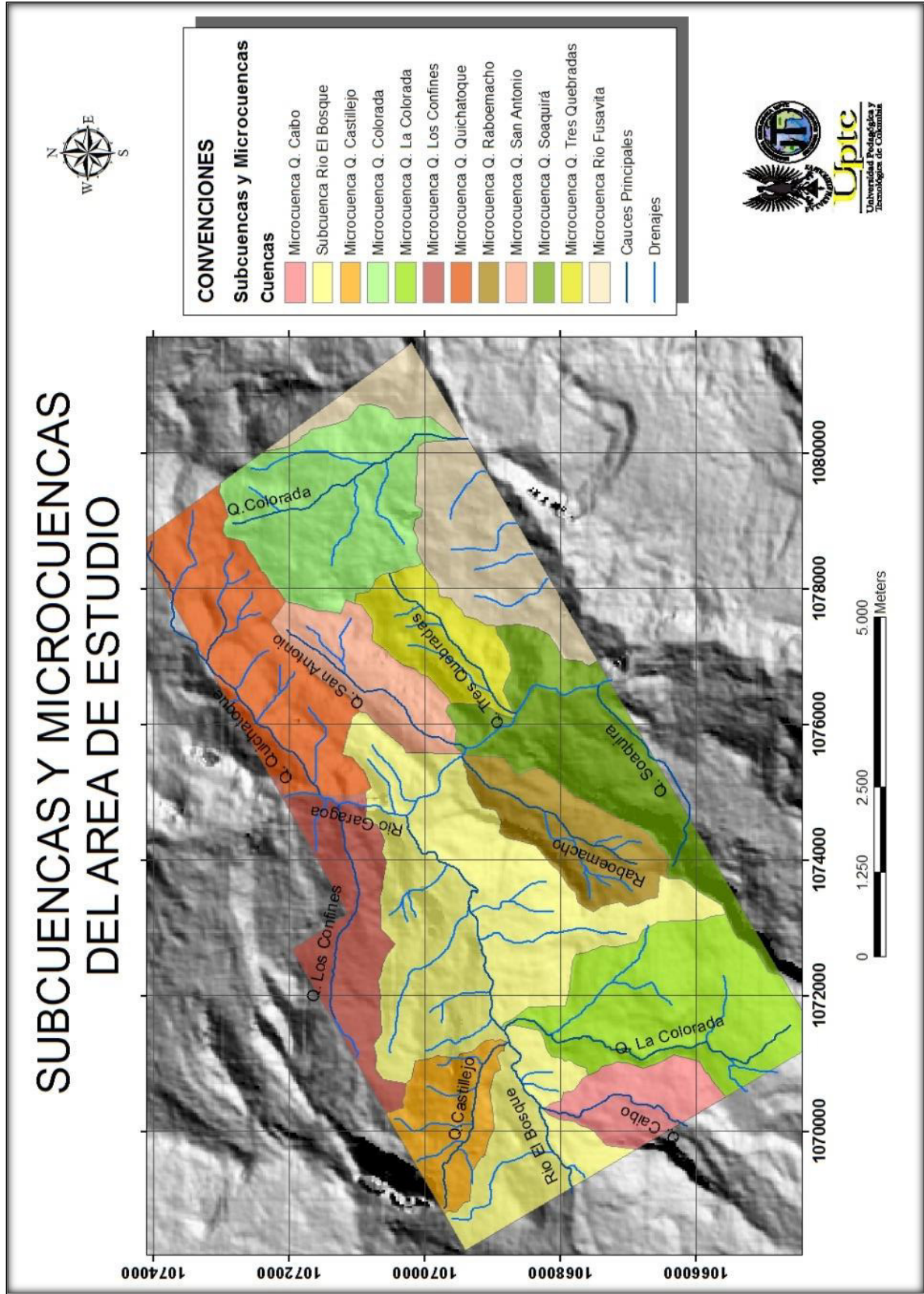
Las subcuencas y microcuencas se desarrollaron en el programa ARCGIS 9.3 con la Herramienta Arc Hydro tools, basado principalmente en los fundamentos básicos de la delimitación de cuencas hidrográficas. Se realizaron digitalizaciones apoyadas en la topografía del área y en las zonas de parteaguas.

Imagen 14. Mapa Hidrográfico



Fuente: Autores

Imagen 15. Subcuencas y Microcuencas de la zona



Fuente: Autores

8.2 SISTEMAS HIDROLOGICOS

8.2.1 Sistemas Lenticos

Dentro de la zona de estudio se identifican cuerpos lenticos como reservorios artesanales, los cuales se utilizan principalmente con fines agropecuarios. Hacia la parte Sur este de la zona de estudio se presenta un microclima debido a la cercanía del embalse la Esmeralda.

8.2.2 Sistemas Loticos

Entre los cuerpos loticos principales se destacan El rio El bosque que junto con sus afluentes desembocan en la Cuenca del Rio Garagoa. De estas microcuencas se capta agua para redes de acueducto municipal, actividades agrícolas como Riego y abrevaderos para ganado.

El Rio el Bosque en su recorrido capta agua de las quebradas la colorada, Blanca, Castillejo y drenajes importantes como el Uvero y Aguacaliente.

El Rio Garagoa nace al suroriente del municipio de Samacá en el páramo de Rabanal, inicialmente toma el nombre de Rio teatinos, por su confluencia con otros ríos y quebradas cambia el nombre al de Rio Boyacá, más adelante donde capta aguas del Rio Juyasia toma el nombre de Rio Jenesano. En donde se une con el Rio Turmequé recibe el nombre de Rio Garagoa. En la zona de estudio La cuenca del Rio Garagoa recibe aportes del Río Bosque y de quebradas importantes como Tres quebradas, San Antonio y Quichatoque.¹⁷

8.3 BALANCE HIDRICO

El conocimiento del balance hídrico es determinante para el estudio del ciclo hidrológico ya que con este es posible comparar los diferentes recursos hídricos de un sistema en un periodo de tiempo determinado. Para el desarrollo del balance hídrico se realiza una caracterización hidrometeorológica, que permite el análisis de los de parámetros meteorológicos, mediante los datos obtenidos en las estaciones meteorológicas. Para el estudio del área se tomaron doce estaciones meteorológicas, (Ver Tabla 7, Imagen 16), ubicadas en los departamentos de Boyacá (Diez) y Cundinamarca (Dos), los datos corresponden a un periodo de 21 años entre 1992 – 2013, debido a la concordancia de los datos en las estaciones para esta época.

¹⁷ Rodríguez E. Ballesteros E. Bettin M. Ángel C. Componente Hidrológico. Universidad Nacional de Colombia, Corpochivor, Corpoboyaca.

Tabla 7: Estaciones meteorológicas IDEAM

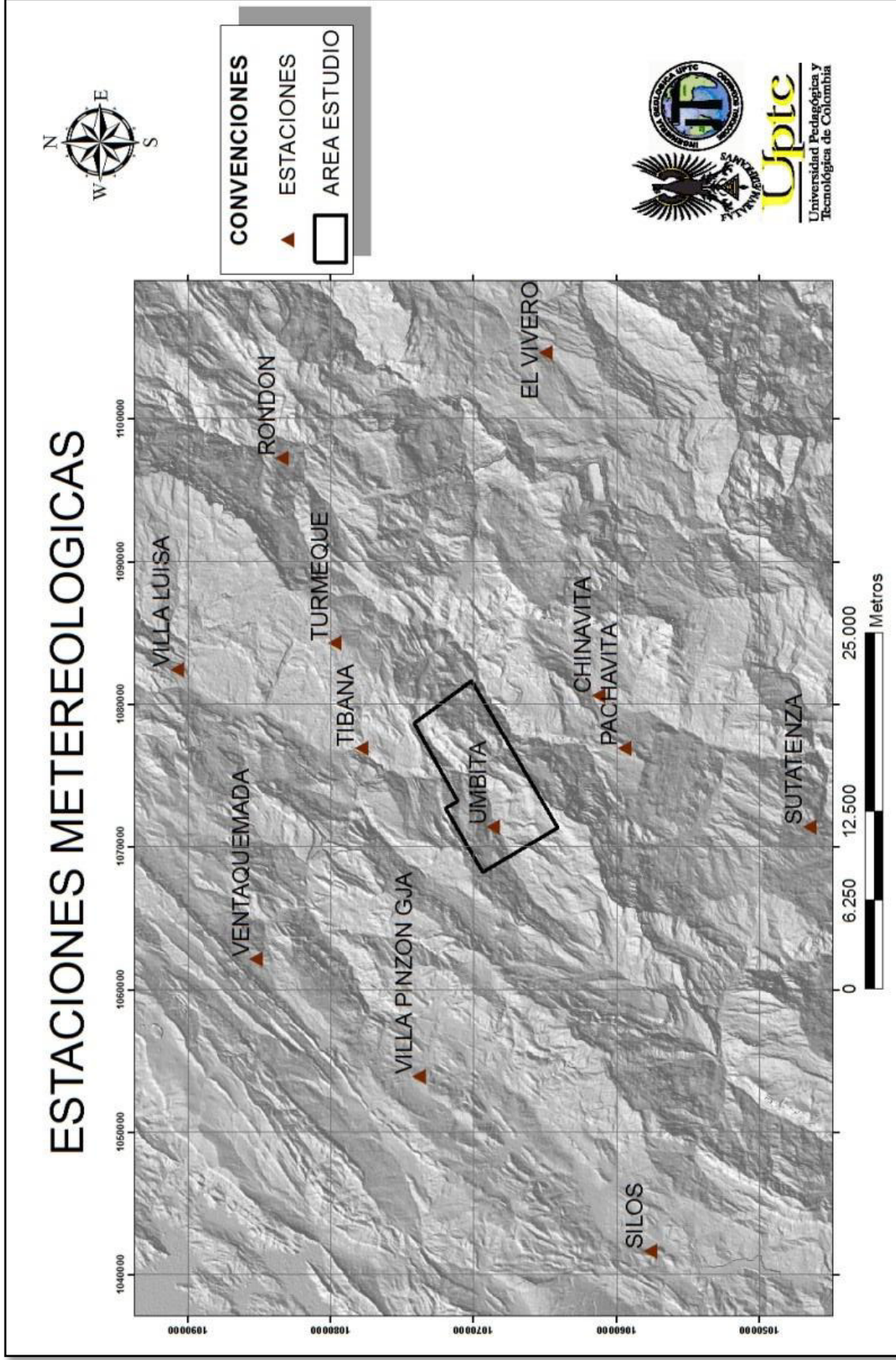
ESTACIONES METEREOLÓGICAS					
ID	CODIGO	ESTACION	CORRIENTE	MUNICIPIO	TIPO
1	35085040	EL VIVERO	LENGUPA	MIRAFLORES	CO
2	35070210	PACHAVITA	GARAGOA	PACHAVITA	PM
3	35070070	CHINAVITA	GARAGOA	CHINAVITA	PM
4	35070050	UMBITA	BOSQUE	UMBITA	PM
5	35070020	VENTAQUEMADA	TURMEQUE	VENTAQUEMADA	PM
6	35075020	SUTATENZA	GARAGOA	SUTATENZA	CP
7	35070040	TIBANA	TIBANA	TIBANA	PM
8	35070030	TURMEQUE	TURMEQUE	TURMEQUE	PM
9	35075030	VILLA LUISA	TEATINOS	RAMIRIQUI	CO
10	35085020	RONDON	MUECHE	RONDON	CO
11	21201640	VILLA PINZON GJA	BOGOTA	VILLA PINZON	PG
12	21205740	SILOS	SISGA	CHOCONTA	CO

Fuente: IDEAM, Autores

Las estaciones meteorológicas utilizadas son de tipo climatológico principal, climatológico ordinario y pluviométricas, las dos primeras permiten obtener datos de temperatura, evaporación, humedad relativa y precipitación; mientras que la última solo suministra datos de precipitación.

La siguiente imagen permite observar la ubicación de cada una de las estaciones utilizadas con respecto a la zona de estudio.

Imagen 16: Estaciones Meteorológicas IDEAM



Fuente: Autores

8.3.1 Caracterización Hidrometeorológica

La caracterización hidrometeorológica permite describir y analizar los cambios que se presentan en el clima en un intervalo de tiempo determinado, mediante los distintos parámetros climatológicos.

8.3.1.1 Precipitación

Este es uno de los parámetros de mayor trascendencia debido a que determina la entrada de mayor aportación de agua a una cuenca, junto con la cantidad y frecuencia que esta tiene, para su análisis se utilizó los datos de once estaciones meteorológicas, de las cuales los datos faltantes se obtuvieron a partir del método simplificado para zonas montañosas en donde se utiliza la siguiente fórmula de ponderación¹⁸:

$$PX = \frac{PX'}{N} \left[\frac{PA}{PA'} + \frac{PB}{PB'} + \frac{PC}{PC'} \right]$$

N: Número de estaciones pluviométricas

PX: Precipitación de la estación X durante el periodo de tiempo por completar

Donde, PX', PA', PB', PC': Promedio de precipitaciones anuales registradas en las estaciones A, B, C, y X de un periodo común.

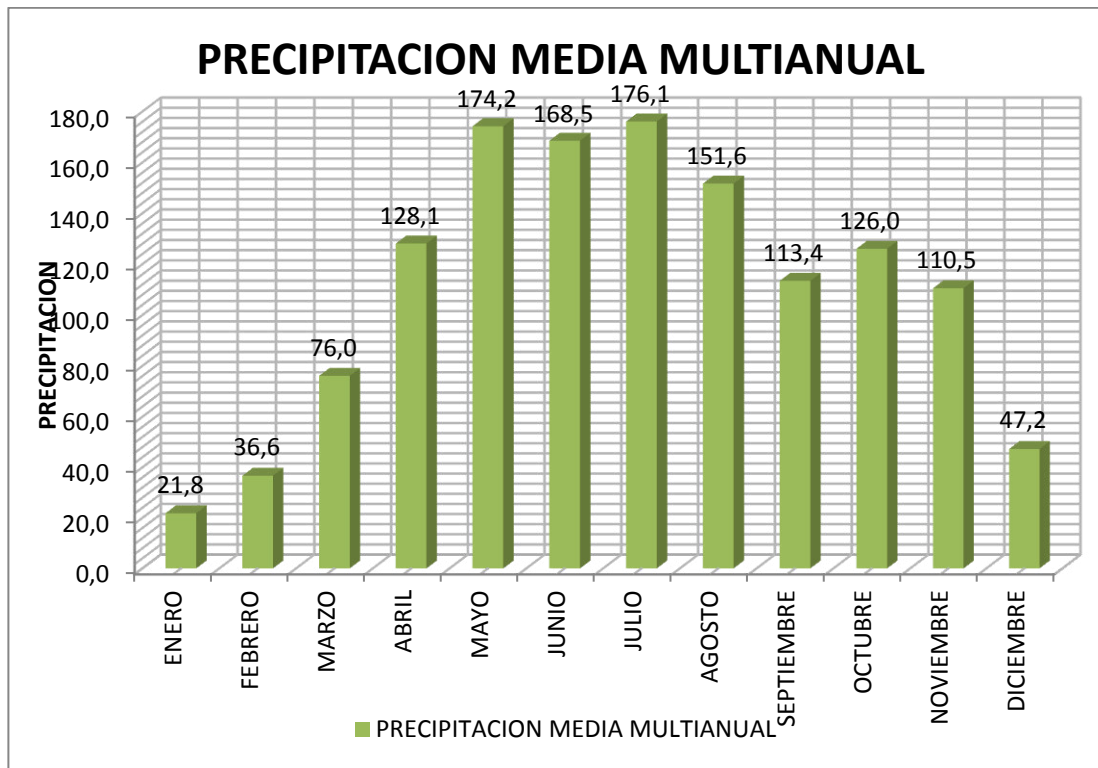
PA, PB, PC: Precipitaciones de las estaciones A, B, y C durante el periodo que falta en X.

Para obtener el mapa de Isoyetas se utilizó la precipitación media multianual, procesándola mediante el software Arcgis, con la herramienta de interpolación IDW. Según las Isoyetas encontradas se logra observar que la precipitación en el área de estudio oscila entre valores de 1083 mm y 1448 mm; donde el mayor grado de precipitación se encuentra en la parte este de la zona que corresponde a las veredas del municipio de Chinavita, el valor máximo de precipitación se encuentra en la vereda las juntas sobre la formación Socha Superior con un valor de 1275 mm, mientras que en la vereda de Sisa medio, municipio de Umbita, las precipitaciones son las más bajas con valores cercanos a los 1100 mm.

El régimen de lluvia que se presenta en el área de trabajo es bimodal muy suave, donde se demarcan dos periodos secos, el primero se encuentra finalizando el mes de diciembre hasta finales del mes de febrero, el segundo está al terminar agosto hasta los finales del mes de septiembre, sin embargo la época con mayor abundancia de precipitaciones son los meses de abril hasta agosto, seguido de octubre, noviembre. (Ver Gráfico 1)

¹⁸ A.A Sokolov, T.G Chapman, Métodos de Cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos, Instituto de Hidrología de España, 1981

Gráfico 1: Valores de precipitación media mensual multianual



Fuente: Autores

Precipitación Media

La precipitación media permite conocer el valor de este parámetro de forma general en la zona de estudio en el intervalo de tiempo que se estableció, para ello se utilizaron dos métodos, el de Isoyetas (Tabla 8) y el de Polígonos de Thiessen¹⁹ (Tabla 9). Con esto se obtuvo una precipitación media de 1267,76 mm.

Tabla 8: Precipitación Media Método de Isoyetas

PRECIPITACION MEDIA DEL AREA DE ESTUDIO					
ISOYETAS (mm)	AREA (km ²)	% AREA	PP MEDIA ENTRE ISOYETAS (mm)	PP MEDIA (mm)* AREA (km ²)	
	1100	6,52	4,2	1100	7172,33
1100	1125	20,58	13,2	1112,5	22889,69
1125	1150	20,06	12,8	1137,5	22823,82

¹⁹ G. Pineda, A. Rodríguez, Elaboración de Modelo Hidrogeológico Conceptual para la subcuenca del Río Turmequé. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2014

Tabla 8: Continuación Precipitación Media Método de Isoyetas

1150	1175	15,11	9,7	1162,5	17559,91
1175	1200	12,09	7,7	1187,5	14354,14
1200	1225	10,10	6,5	1212,5	12241,40
1225	1250	12,72	8,1	1237,5	15745,70
1250	1275	21,26	13,6	1262,5	26845,93
1275	1300	12,60	8,1	1287,5	16220,31
1300	1325	8,18	5,2	1312,5	10741,50
1325	1350	5,30	3,4	1337,5	7083,00
1350	1375	4,33	2,8	1362,5	5898,67
1375	1400	3,49	2,2	1387,5	4837,66
1400	1425	2,63	1,7	1412,5	3713,75
1425		1,44	0,9	712,5	1027,50
Total		156,40	100,0		189155,31

Fuente: Autores

$$Pm = \frac{Pm * Area}{Area}$$

$$Pm = \frac{189155,31 \text{ mm} * \text{km}^2}{156,40 \text{ km}^2}$$

$$Pm = 1209,42 \text{ mm}$$

Tabla 9: Precipitación Media Método de polígonos de Thiessen.

PRECIPITACIÓN MEDIA MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN				
ESTACION	AREA (km ²)	COEFICIENTE	PRECIPITACION (mm)	PRECIPITACION PONDERADA
UMBITA	226,856	0,070	1083,69	76,05
EL VIVERO	518,2	0,160	1705,78	273,46
RONDON	381,635	0,118	2092,12	247,00
VENTAQUEMADAA	340,627	0,105	911,73	96,08
VILLA PINZON	331,372	0,103	764	78,32
SUTATENZA	460,1	0,142	1236,14	175,95
CHINAVITA	317,233	0,098	1509,6	148,15
PACHAVITA	141,178	0,044	1423,31	62,16
VILLA LUISA	190,6	0,059	1003,21	59,15
TURMEQUE	173,274	0,054	777,54	41,68
TIBANA	151,39	0,047	1454,16	68,10
	3232,46			1326,11

Fuente: Autores

$$Pm = 1326,11 \text{ mm}$$

Para efectos del estudio de la precipitación media se tomó el cálculo del Método de las Isoyetas, debido a que su valor es el más crítico en cuanto a la pluviosidad (Ver Imagen 17).

8.3.1.2 Temperatura

La temperatura es de gran importancia debido a que esta influye en los procesos de evapotranspiración y humedad de un área. Ya que a medida que la temperatura del aire aumenta la precipitación disminuye (Ver Imagen 18).

Para el área de trabajo se presenta un intervalo de temperatura de 16,23°C a 17,23°C, correspondiente a un clima frío seco según el atlas climatológico del IDEAM. Según el mapa de isotermas obtenido con el procesamiento en Arcgis, la temperatura disminuye de la parte Sureste de la zona hacia la parte Noroeste, presentando el mayor grado de temperatura en el municipio de Chinavita, sin embargo la diferencia con respecto al área de Umbita es de 0,25°C. Igualmente se ve reflejado que la temperatura disminuye con respecto a la altitud, ya que tiene un comportamiento inverso a esta, porque depende de la capacidad que tiene el aire de retener calor, así a menor altitud las masas de aire son más densas por lo que se facilita la retención de calor, contrario a lo que sucede en zonas de mayor altitud.

8.3.1.3 Humedad Relativa

Este parámetro comprende la relación entre la presión de vapor real y la saturación, expresada en porcentaje, y tiene alta influencia en la variable de evaporación que se presente.

En la zona de estudio se definió a partir del mapa de humedad relativa valores entre 82% y 84%. Siendo la parte Noreste correspondiente al municipio de Chinavita la que presenta mayor porcentaje de humedad, y la vereda la Palma del municipio de Umbita contiene el menor porcentaje de humedad con un promedio de 82,8% (Ver Imagen 19).

8.3.1.4 Evaporación

Es el proceso por el cual el agua pasa de estado líquido a estado gaseoso, transfiriéndose a la atmósfera, se encuentra condicionada principalmente por el brillo solar y los vientos.

Al realizar la interpolación de este parámetro se logró establecer que en el área de estudio se encuentran dos zonas con diferencia de evaporación que están limitadas por el río Garagoa, hacia el municipio de Chinavita se localiza el menor grado de evaporación con un intervalo de 950 mm a 1075 mm; a diferencia de lo que sucede hacia la parte oeste del área de estudio en el municipio de Umbita donde se obtuvieron valores de 975 mm a 1025 mm (Ver Imagen 20).

8.3.1.5 Evapotranspiración

Esta variable se encuentra definida a partir de factores meteorológicos, del suelo y las plantas.

Evapotranspiración Potencial (ETP)

Es la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones existentes, cuando el suelo está abundantemente provisto de agua y cubierto con una cobertura vegetal completa. Este parámetro se calcula a partir de la temperatura media mensual multianual, mediante el método de Thornthwaite²⁰ cuya fórmula es:

$$ETP = 16 * \left(\frac{10 * T}{I}\right)^a$$

Donde, T: temperatura media mensual

I índice calórico

a: exponente empírico

$$I = \sum i \quad i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

Para el factor de corrección se usó la tabla de parámetros del método de Thornthwaite. El valor de la constante se debe debido a la ubicación del polígono en Latitud. Los Resultados obtenidos a partir de este método para cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas se presentan en las Tablas 10, 11, 12, 13 y 14.

Tabla 10: Parámetros de ETP estación El Vivero

EL VIVERO													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T°C	19,2	19,7	19,6	19,5	19	18,3	17,9	17,9	18,5	18,9	19	19	18,93
CONSTANTE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
POT	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	
i	7,67	7,95	7,93	7,82	7,54	7,15	6,92	6,88	7,23	7,46	7,57	7,57	
I	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	
a	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	
Ei (mm)	71,2	74,5	74,3	72,9	69,6	64,9	62,2	61,9	65,9	68,7	69,9	70	825,97
F.Corr	1,04	0,95	1,04	1	1,02	0,99	1,02	1,03	1	1,05	1,03	1,06	
EAj	74	70,8	77,3	72,9	71	64,3	63,5	63,7	65,9	72,1	72	74,2	841,64

Fuente: Autores

²⁰ J. Almorox, Métodos de estimación de la evapotranspiración.

Tabla 11: Parámetros de ETP estación Rondón

ESTACION RONDON													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T°C	16,32	16,49	16,32	16,14	15,88	15,31	14,94	15,11	15,64	16,01	16,19	16,21	15,85
CONSTANTE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
POT	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	
i	5,99	6,09	6	5,9	5,75	5,44	5,24	5,34	5,62	5,82	5,92	5,94	
l	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	69,05	
a	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	
Ei (mm)	62,27	63,27	62,29	61,2	59,65	56,29	54,15	55,13	58,21	60,41	61,49	61,64	716
F. Cor	1,04	0,95	1,04	1	1,02	0,99	1,02	1,03	1	1,05	1,03	1,06	
E Aj	64,76	60,11	64,78	61,2	60,84	55,73	55,23	56,79	58,21	63,43	63,34	65,33	729,75

Fuente: Autores

Tabla 12: Parámetros de ETP estación Sutatenza

ESTACION SUTATENZA													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T°C	19,19	19,28	19,23	19,04	18,76	18,23	17,76	17,87	18,51	18,98	19,2	19,25	18,75
CONSTANTE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
POT	1,514	1,51	1,514	1,51	1,51	1,51	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	1,514	
i	7,66	7,72	7,68	7,57	7,41	7,09	6,81	6,88	7,25	7,54	7,67	7,7	
l	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	88,98	
a	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	
Ei (mm)	71,62	72,28	71,88	70,53	68,54	64,8	61,57	62,34	66,74	70,1	71,72	72,03	824,13
F Cor	1,04	0,95	1,04	1	1,02	0,99	1,02	1,03	1	1,05	1,03	1,06	
E Aj	74,48	68,66	74,76	70,53	69,91	64,15	62,8	64,21	66,74	73,6	73,87	76,35	840,05

Fuente: Autores

Tabla 13: Parámetros de ETP estación Villa Luisa

ESTACION VILLA LUISA													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T°C	16,54	16,86	17,13	16,93	16,67	16,08	15,47	15,47	15,77	16,39	16,63	16,57	16,14
CONSTANTE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
POT	1,514	1,51	1,514	1,51	1,51	1,51	1,514	1,514	1,514	1,51	1,514	1,51	
i	6,12	6,3	6,45	6,34	6,19	5,86	5,53	5,53	5,69	6,03	6,17	6,14	
l	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	72,34	
a	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	
Ei (mm)	60,56	62,5	64,08	62,91	61,36	57,87	54,4	54,38	56,08	59,67	61,12	60,77	715,7
F Corregido	1,04	0,95	1,04	1	1,02	0,99	1,02	1,03	1	1,05	1,03	1,06	
E Aj	62,98	59,37	66,64	62,91	62,59	57,29	55,49	56,01	56,08	62,65	62,95	64,42	729,4

Fuente: Autores

Tabla 14: Parámetros de ETP estación Silos

ESTACION SILOS													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T°C	12,42	12,78	14,89	14,81	13,69	13,75	12,47	13,62	13,69	13,41	13,79	13,66	12,07
CONSTANTE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
POT	1,514	1,51	1,514	1,51	1,51	1,51	1,514	1,514	1,514	1,51	1,514	1,51	
i	3,97	4,14	5,22	5,17	4,59	4,62	3,99	4,56	4,6	4,46	4,64	4,58	
l	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	54,54	
a	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	
Ei (mm)	79,64	84,14	113,4	112,2	96,22	97,05	80,29	95,33	96,31	92,51	97,58	95,88	1140,6
F Corregido	1,04	0,95	1,04	1	1,02	0,99	1,02	1,03	1	1,05	1,03	1,06	
EAj	82,82	79,94	118	112,2	98,15	96,08	81,9	98,19	96,31	97,14	100,5	101,6	1162,8

Fuente: Autores

La evapotranspiración potencial para el área de estudio está entre valores de 782 mm y 876 mm, donde los valores máximos se encuentran hacia el Suroeste en el municipio de Umbita y los mínimos al Noreste de la zona en el municipio de Chinavita (Ver Imagen 21).

Evapotranspiración Media

Para el cálculo de la evapotranspiración media del área de estudio se utilizó el método de polígonos de Thiessen²¹, en el cual se utilizaron cinco estaciones meteorológicas de tipo climatológicas principales y ordinarias. (Ver Tabla 12)

La evapotranspiración media estimada para el área de estudio es de 894 mm.

Tabla 15: Evapotranspiración Media según método de polígonos de Thiessen

ESTACION	AREA (km ²)	COEFICIENTE	ETP (mm)	ETP PONDERADA
EL VIVERO	710,5	0,18	841,64	149
RONDON	522,2	0,13	729,75	95
SUTATENZA	829	0,21	840,05	174
VILLA LUISA	820,2	0,20	729,39	149
SILOS	1130	0,28	1162,82	327
Total	4012			894

Fuente: Autores

²¹ Ibid.,p.56

Imagen 17: Mapa de Isoyetas

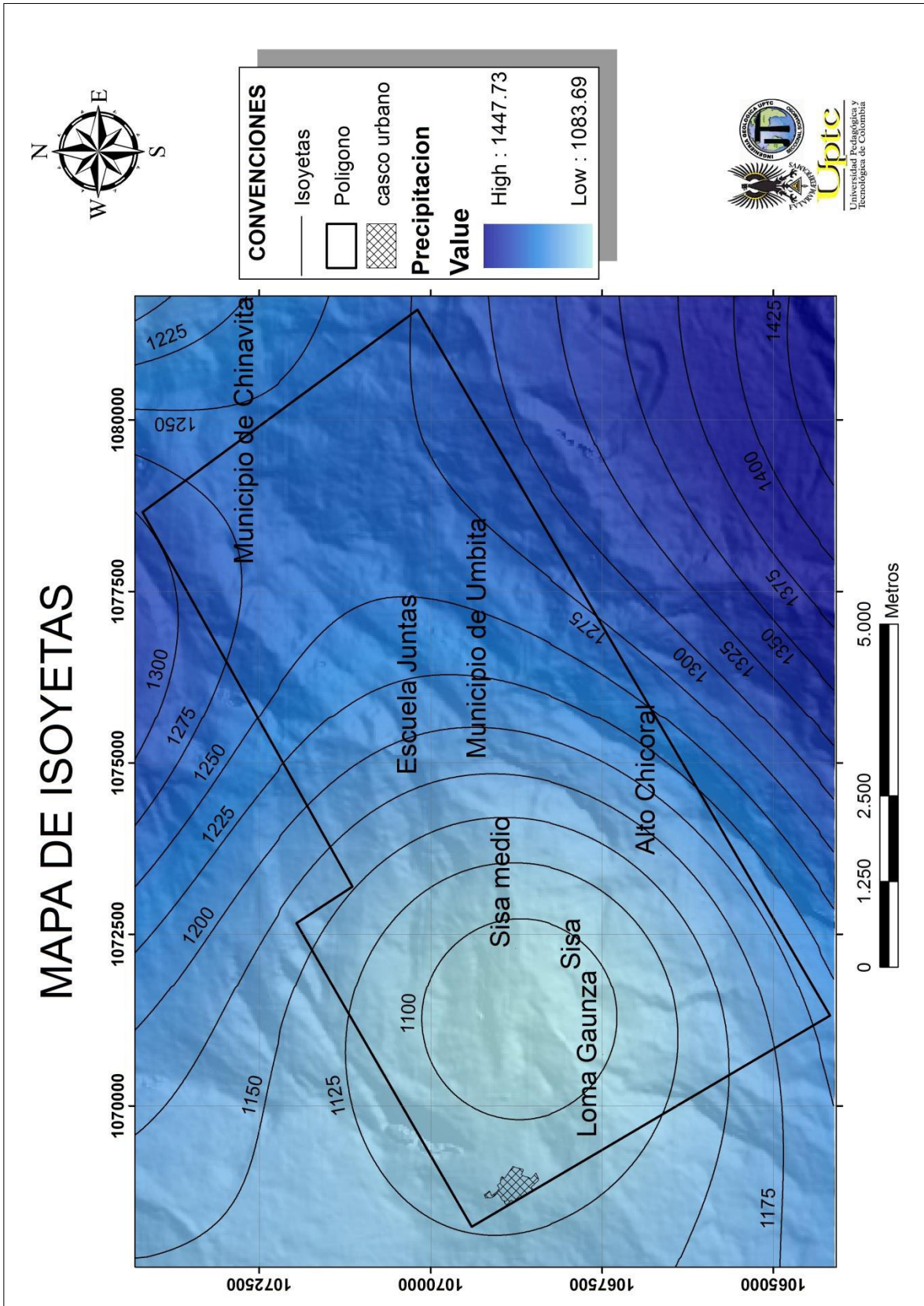
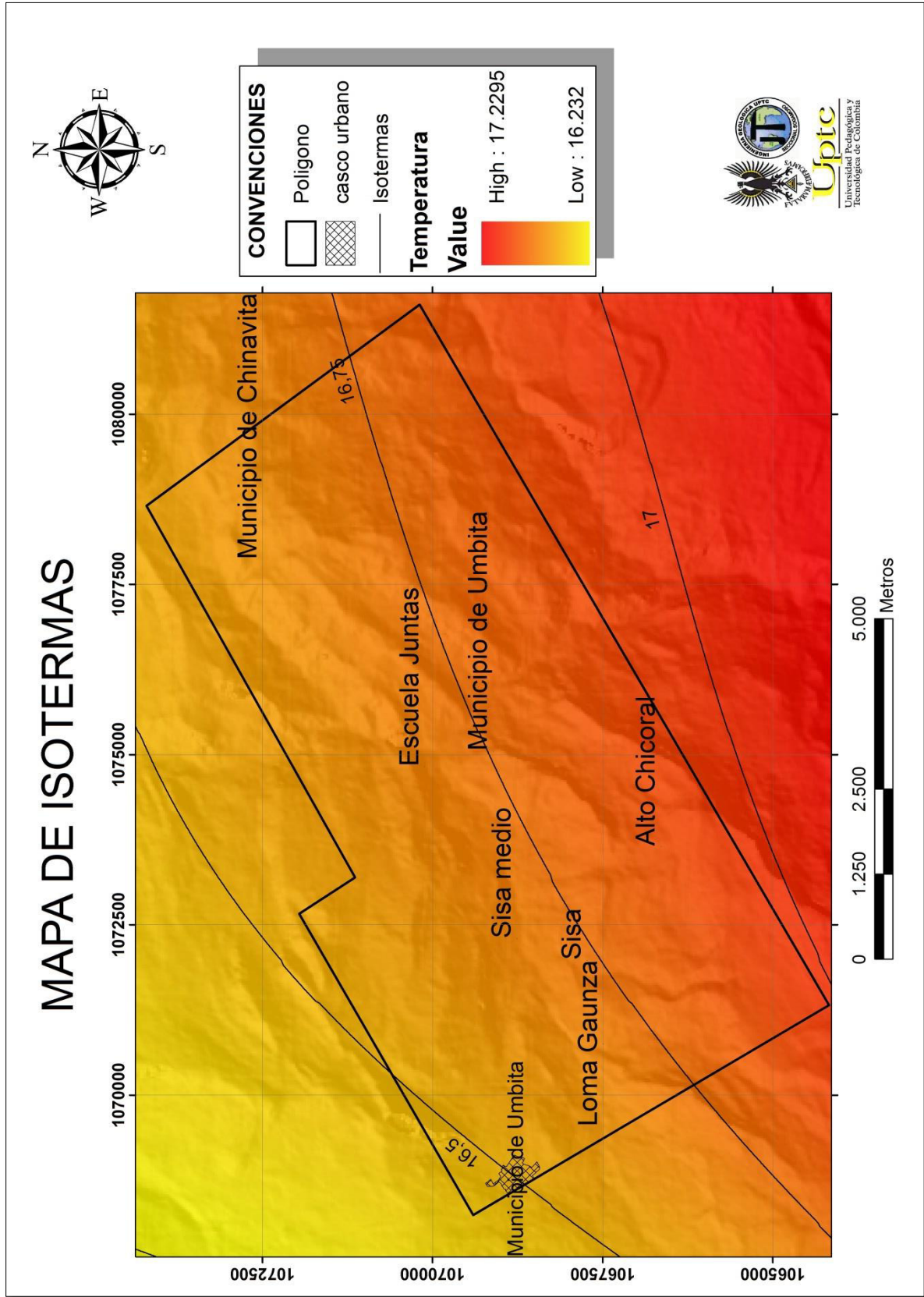
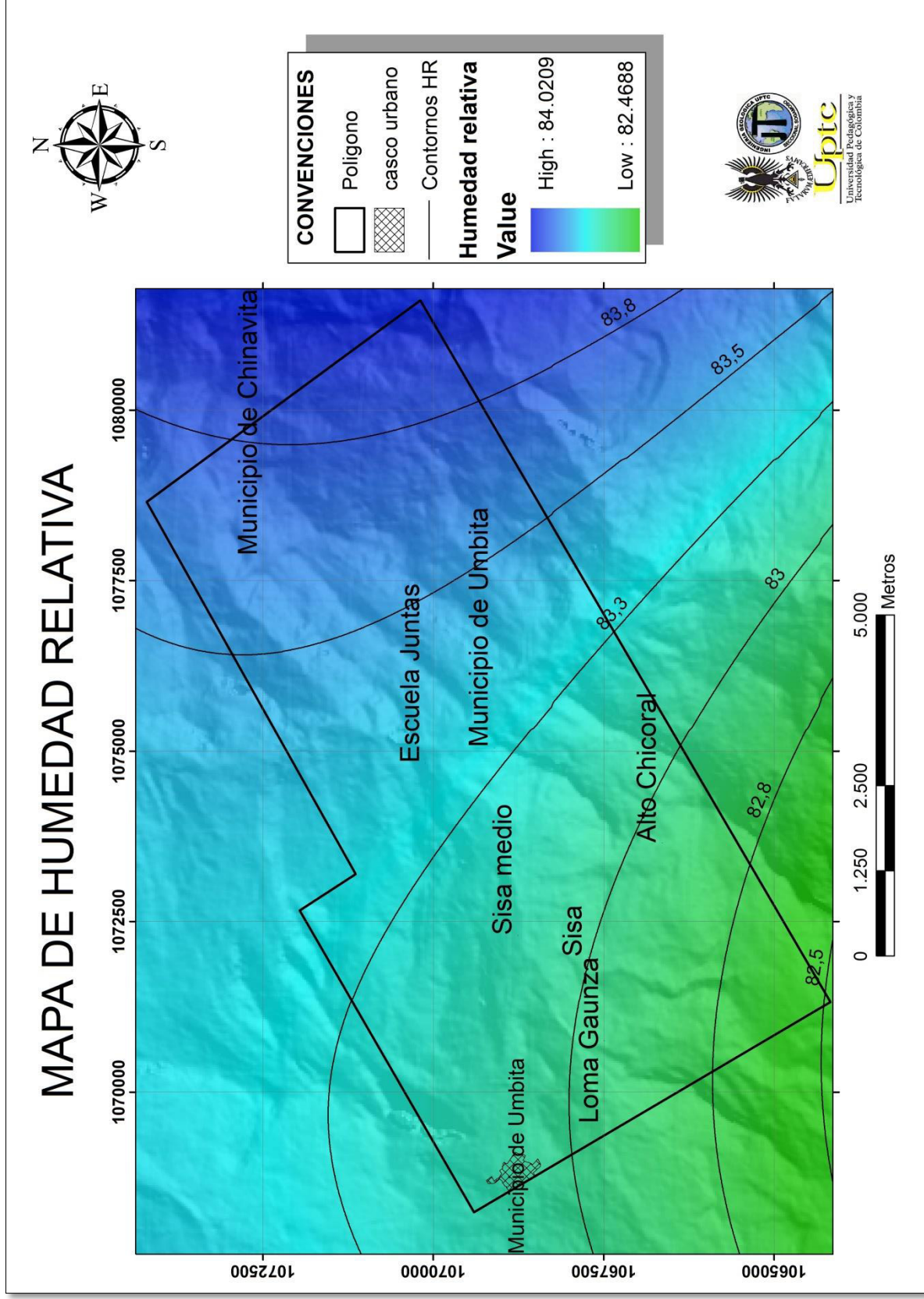


Imagen 18: Mapa de Isotermas



Fuente: Autores

Imagen 19: Mapa de Humedad Relativa



Fuente: Autores

Imagen 20: Mapa de Evaporación

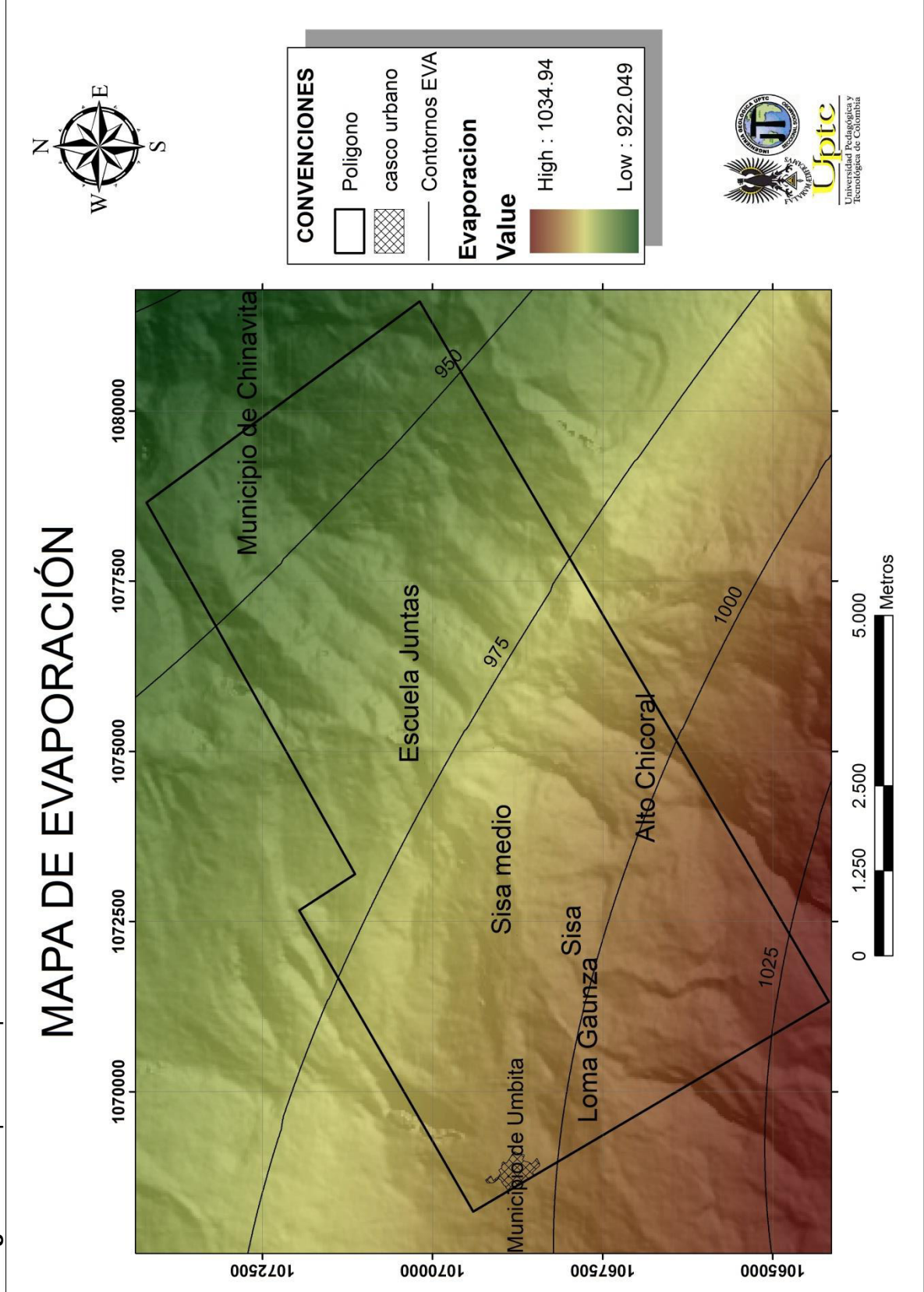
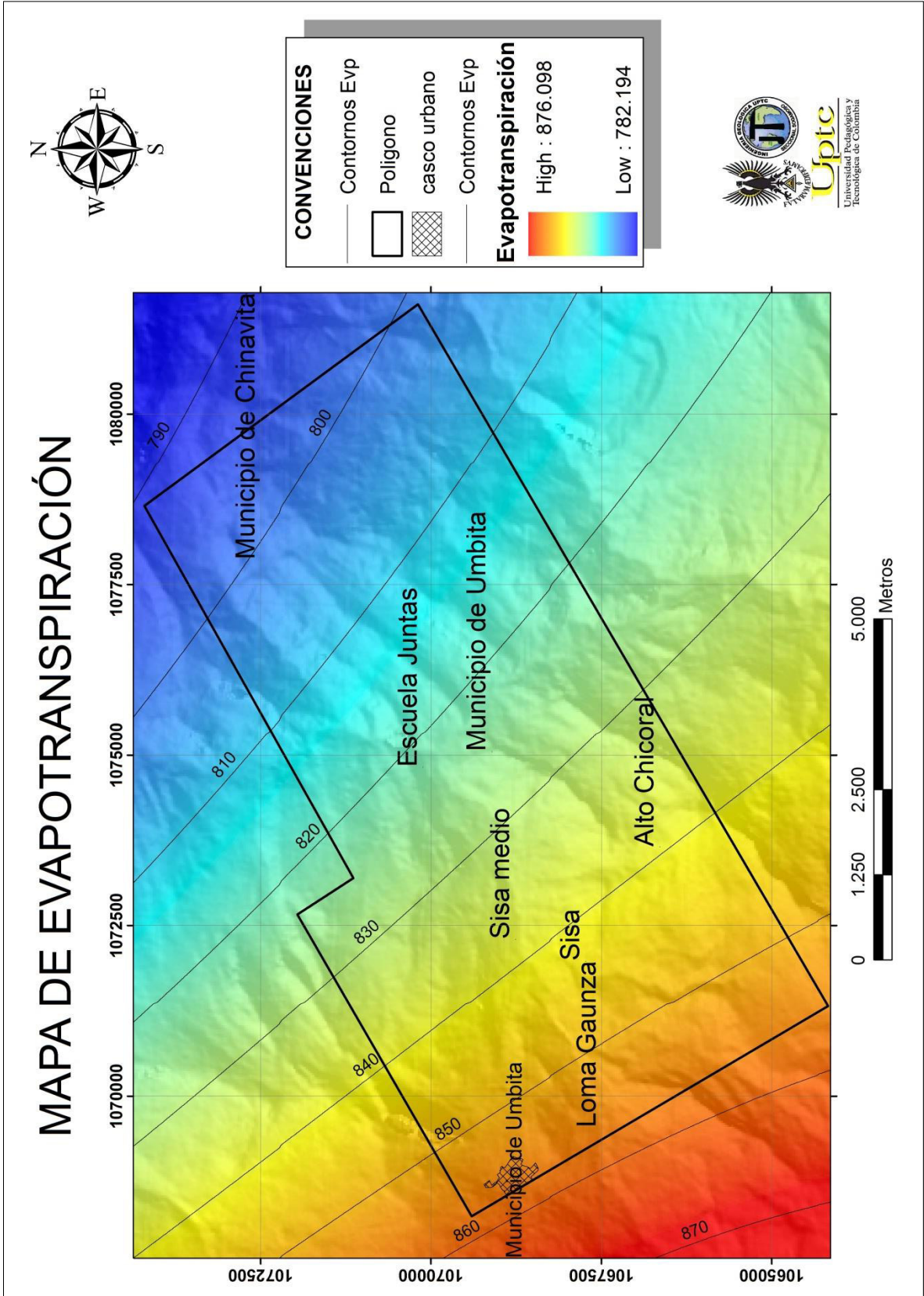


Imagen 21 : Mapa de Evapotranspiración



Fuente: Autores

8.3.2 Escorrentía (Q)

La escorrentía es el conjunto de agua producto de la precipitación que se desplaza por la superficie terrestre, por acción de la gravedad; depende de diferentes variables como la topografía, condiciones climatológicas, cobertura vegetal y aspectos hidrológicos. Para el cálculo de este parámetro se utilizó el método de Número de Curva (Soil Conservation Service)²², que define la siguiente formula:

$$Q = (P - 0,2 S)^2 / (P + 0,8 S)$$

Donde, P es la precipitación considerando que en una misma cuenca diferentes niveles de precipitación generan diversas escorrentías.

$S = (25400 / CN) - 254$ Capacidad potencial de lluvia a retener por la cuenca.

CN: Número de Curva, determinado mediante Tablas.

El número de curva se determinó mediante las Tablas 16 y 17 en las cuales intervienen diferentes condiciones de terreno, como son la cobertura vegetal, el uso de suelo, condición hidrológica a partir de la textura del suelo.

Tabla 16: Valores de CN para Suelos

TIPO DE VEGETACION	FORMA DE CULTIVO	ESTADO	CLASE HIDROLOGICA DEL SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	Surcos Rectos	Malo	77	86	91	94
Cultivos en Surcos (Viandas y Hortalizas)	Surcos Rectos	Bueno	72	81	88	91
		Malo	67	78	85	89
	Curvas de Nivel	Bueno	70	79	84	88
		Malo	65	75	82	86
	Curvas de Nivel y Bancales	Bueno	66	74	80	82
		Malo	62	71	78	81
Cereales Finos (Maíz, Caña)	Surcos Rectos	Bueno	65	76	84	88
		Malo	63	75	83	87
	Curvas de Nivel	Bueno	63	74	82	85
		Malo	61	73	81	84
	Curvas de Nivel y Bancales	Bueno	61	73	81	84
		Malo	59	70	78	81

²² R. Pardo, N. Marrero, El Tiempo de Concentración y El número de la Curva para obtener el Hidrógrafo de una cuenca. Ingeniería Hidráulica Y Ambiental, VOL. XXX, No. 1, 2009

Tabla 16: Continuación Valores de CN para Suelos

Leguminosas de siembra densa o prados en rotación	Surcos Rectos	Bueno	66	77	85	89
		Malo	58	72	81	85
	Curvas de Nivel	Bueno	64	75	83	85
		Malo	55	69	78	83
	Curvas de Nivel y Bancales	Bueno	63	73	80	83
		Malo	51	67	76	80
Pastos o Pastizales		Bueno	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Malo	39	61	74	80
	Curvas de Nivel	Bueno	47	67	81	88
		Regular	49	69	79	84
		Malo	39	61	74	80
Prado (Permanente)		Bueno	30	58	71	78
		Malo	6	35	70	79
Bosques (Fincas Boscosas)		Regular	36	60	73	79
		Malo	25	55	70	77

Fuente: Pardo R, Marrero N, 2009

Tabla 17: Clasificación suelos Según Clase Hidrológica.

Características	Grupos			
	A	B	C	D
Velocidad de Infiltración	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Transmisibilidad	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Profundidad	Muy Profundos	Profundos	Moderada	Poco Profundos
Drenaje Interno	Muy Bueno	Bueno	Moderado	Malo
Textura	Arenas y Gravas	Medio Arenosa	Medio Arcillosa	Arcillas Pesadas
Potencial de Escurrimiento	Bajo	Moderado Bajo	Moderado Alto	Alto
Nivel Freático	---	---	---	Permanentemente Alto

Fuente: Pardo R, Marrero N, 2009

Según los análisis de las tablas se determinó que la cobertura de la zona se encuentra entre las clases Hidrológicas B y C, las cuales se describen a continuación²³:

Grupo A. es el que ofrece atañor menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad, incluso cuando están saturados. Comprenden los terrenos profundos sueltos con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla (Arenosos, arenosos-limosos.)

Grupo B. Incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados comprendiendo los terrenos arenosos menos profundos que los del Grupo A, otros de textura franco-arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.

Grupo C. Incluye los suelos, que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados, por presentar un estado impermeable que dificulta la infiltración o porque en conjunto, su textura es franco-arcillosa o arcillosa.

Grupo D. Es el que ofrece mayor escorrentía. Incluye los suelos que presentan gran permeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos con alto grado de Tumefacción, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma una capa de arcilla muy impermeable y aquellos otros con subsuelo muy impermeable próximo a la superficie.

Analizando cada factor se encontraron los valores de Número de curva descritos en la Tabla 18, dependiendo del tipo de cobertura vegetal.

Tabla 18: Determinación de Numero de Curva

Tipo de Cobertura	CONDICION HIDROLOGICA							% Area
	Área Km ²	Perimetro Km	NC	A	B	C	D	
Zona de Arbustales	5,5	109,47	5,141	30	58	71	78	0,089
Pastos Limpios	5,12	37,85	6,932	70	79	84	88	0,083
Bosque Fragmentado	14,6	59,13	16,472	25	55	70	77	0,235
zaico de pastos y culti	26,89	109,47	34,233	49	69	79	84	0,433
Zona de Bosque	9,94	53,84	9,612	36	60	73	79	0,16
Total	62,05	369,76	72,389					1

Fuente: Autores

El valor de los NC se realizó con el siguiente cálculo:

$$NC = \text{Clase Hidrológica} \times \% \text{ Área}$$

²³ S.Ibañez, H. Moreno, J. Gisbert, Valores de numero de curva, cálculo de la escorrentía, Escuela Técnica superior de Ingeniería, Universidad Politécnica de Valencia.

Calculando los parámetros se tiene el valor de la cantidad de agua que recorre el área de estudio:

Tabla 19: Valores de Escorrentía

PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Precipitacion (mm)	21,8	36,64	76,04	128,08	174,22	168,49	176,05	151,62	113,38	126,02	110,51	47,22	
CN	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	72,389	
S	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	96,88	
Q (mm)	0,06	2,61	20,91	57,48	95,25	90,39	96,81	76,32	46,3	55,88	44,18	6,22	592,4

Fuente: Autores

El valor de escorrentía para el área de estudio estimado es de 592,4 mm/añual.

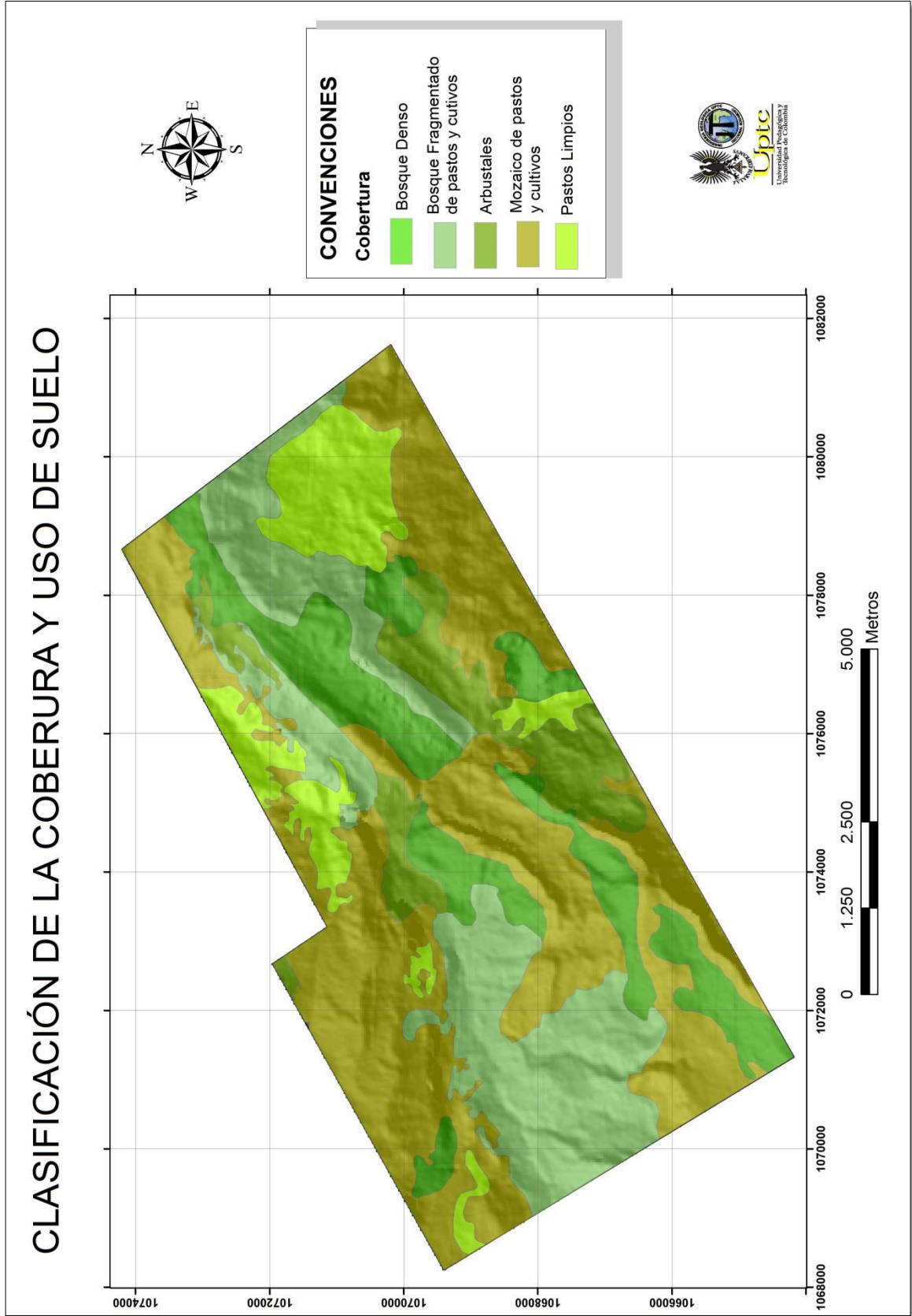
Grafico 2: Escorrentía Superficial



Fuente: Autores

El mapa de cobertura vegetal se realizó a partir de una adaptación de la metodología Corine Land Cover, aplicada en Colombia; se procesaron imágenes satelitales de Landsat 8 en el software Idrisi Selva y Arcgis 9.3, donde la calificación fue supervisada debido a que se tomaron puntos de control en campo.

Imagen 22: Mapa de Cobertura vegetal y uso del suelo



Fuente: Autores

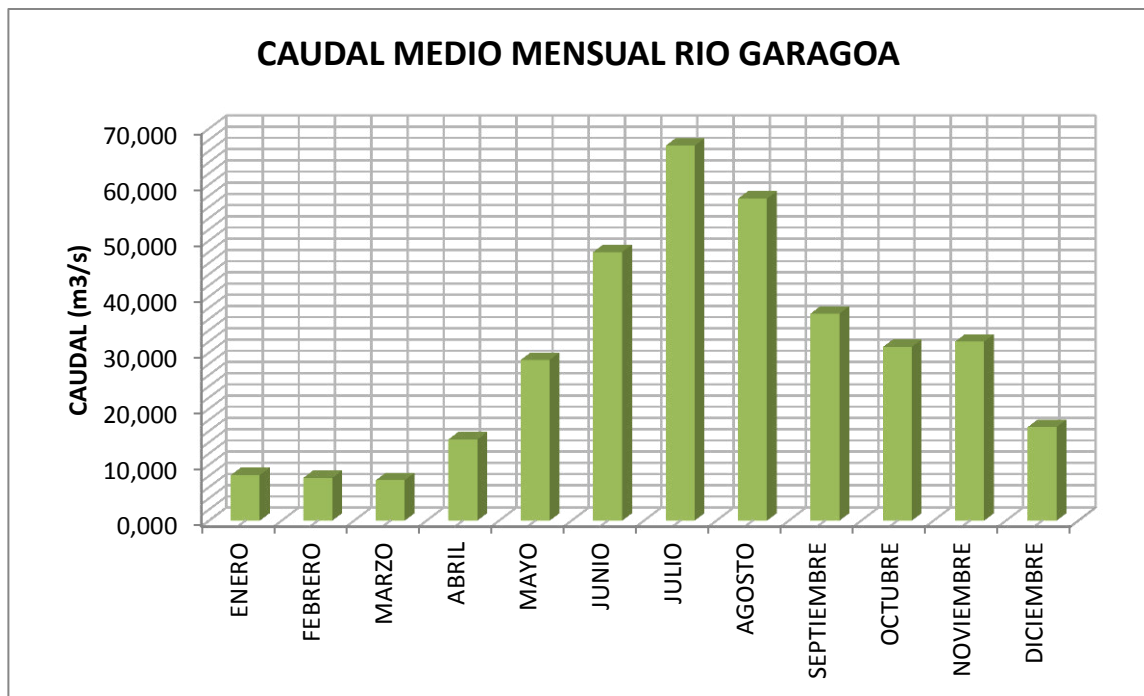
Debido a que el área de estudio se encuentra sobre la cuenca alta del río Garagoa, cuyo cauce principal es el río mencionado, se obtuvieron datos de caudal de este a partir de la estación limnigráfica el Caracol ubicada en el municipio de Garagoa, donde se puede tener control acerca de este parámetro. (Ver Tabla 20, Gráfico 3).

Tabla 20: Caudales Río Garagoa

CAUDAL RIO GARAGOA													
CAUDAL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MEDIOS	8,145	7,644	7,226	14,493	28,708	47,965	66,949	57,506	36,962	31,017	31,983	16,706	31,074
MAXIMO	43,48	33,2	17,54	52,75	52,35	85,7	119,2	115,7	104,1	109,9	117,6	51,3	119,2
MINIMO	1,1	2,05	3,67	5,1	10,16	20,41	34,1	27,09	13,51	10,63	13,47	4,71	1,1

Fuente: Autores

Gráfico 3: Caudal Medio Río Garagoa



Fuente: Autores

Con la obtención del gráfico de caudales del río Garagoa se observa que se encuentra en relación directa con la precipitación, ya que igual que esta presenta un comportamiento unimodal (Ver Gráfico 3), donde los valores de menor

escorrentía se encuentran en los meses de diciembre a inicios de abril y el mes de octubre; el mayor grado de escorrentía se presenta en el mes de julio donde alcanza valores de 65 m³/s

8.3.3 Análisis Balance Hídrico

El balance hídrico (Ver Tabla 21) permite analizar los volúmenes que entran al área de estudio como la precipitación y los volúmenes de agua que salen de la cuenca por medio de infiltración, escorrentía y evapotranspiración.

Tabla 21: Balance Hídrico

BALANCE HIDRICO													
MES/PARA METRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
P (mm)	21,8	36,64	76,04	128,08	174,22	168,49	176,05	151,62	113,38	126,02	110,51	47,22	1319,73
ETP (mm)	71,81	67,77	80,29	75,95	72,5	67,51	63,77	67,78	68,65	73,78	74,54	76,38	860,73
ESC	0,06	2,61	20,91	57,48	95,25	90,39	96,81	76,32	46,3	55,88	44,18	6,22	592,4
Δ	-50,07	-33,74	-25,16	-5,35	6,47	10,59	15,47	7,52	-1,56	-3,64	-8,21	-35,38	
ALM	0	0	0	-5,35	6,47	10,59	15,47	7,52	-1,56	-3,64	-8,21	0	
DEFECIT	-50,07	-33,74	-25,16									-35,38	
RECARGA					6,47	17,07	32,53	40,05	38,48	34,85	26,63		196,08

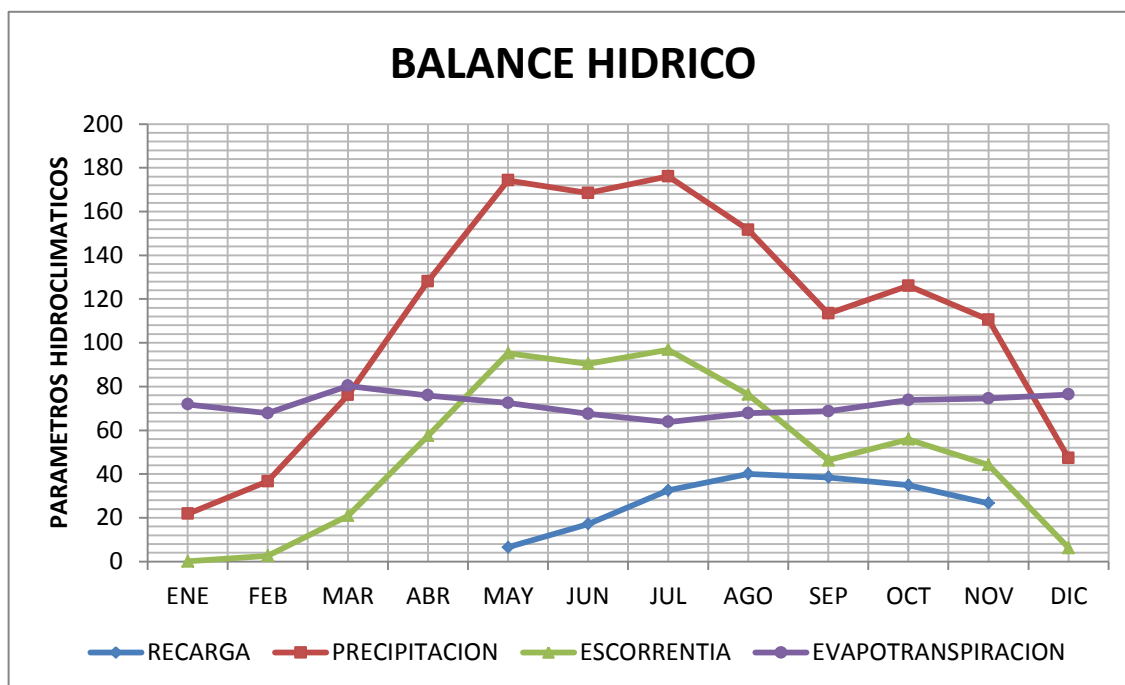
Fuente: Autores

Para el desarrollo del balance hídrico se analizaron diferentes aspectos climatológicos, donde los parámetros fueron obtenidos mediante el procesamiento de la información suministrada por el IDEAM. Algunos parámetros fueron determinados mediante el software Arcgis 9.3

Se determina que en los meses de diciembre a abril se presenta déficit en el aspecto de recarga (Ver Gráfico 4), debido a que los valores de precipitación en estos meses son desfavorables, siendo mayor el valor de evapotranspiración. El periodo de mayo a noviembre tiene aumento en la recarga, siendo el mes más favorable Agosto, debido al aumento en las precipitaciones manteniendo un valor de evapotranspiración constante. La escorrentía está directamente relacionada con la cantidad de precipitación de cada mes teniendo un comportamiento similar, con valores menores.

Se logró determinar que en el área de estudio se presenta una estabilidad hídrica hacia el municipio de Úmbita, mientras que en el municipio de Chinavita exceso hídrico esto determinado a partir de las variables de precipitación, evapotranspiración y escorrentía.

Grafico 4: Balance Hídrico



Fuente: Autores

Realizando un cálculo de la recarga en el área total de la zona de estudio se determina un volumen total de 12'161.800 m³ / año. Analizando el volumen de las zonas de recarga establecidas para el área se obtiene 1'826.497 m³ / año.

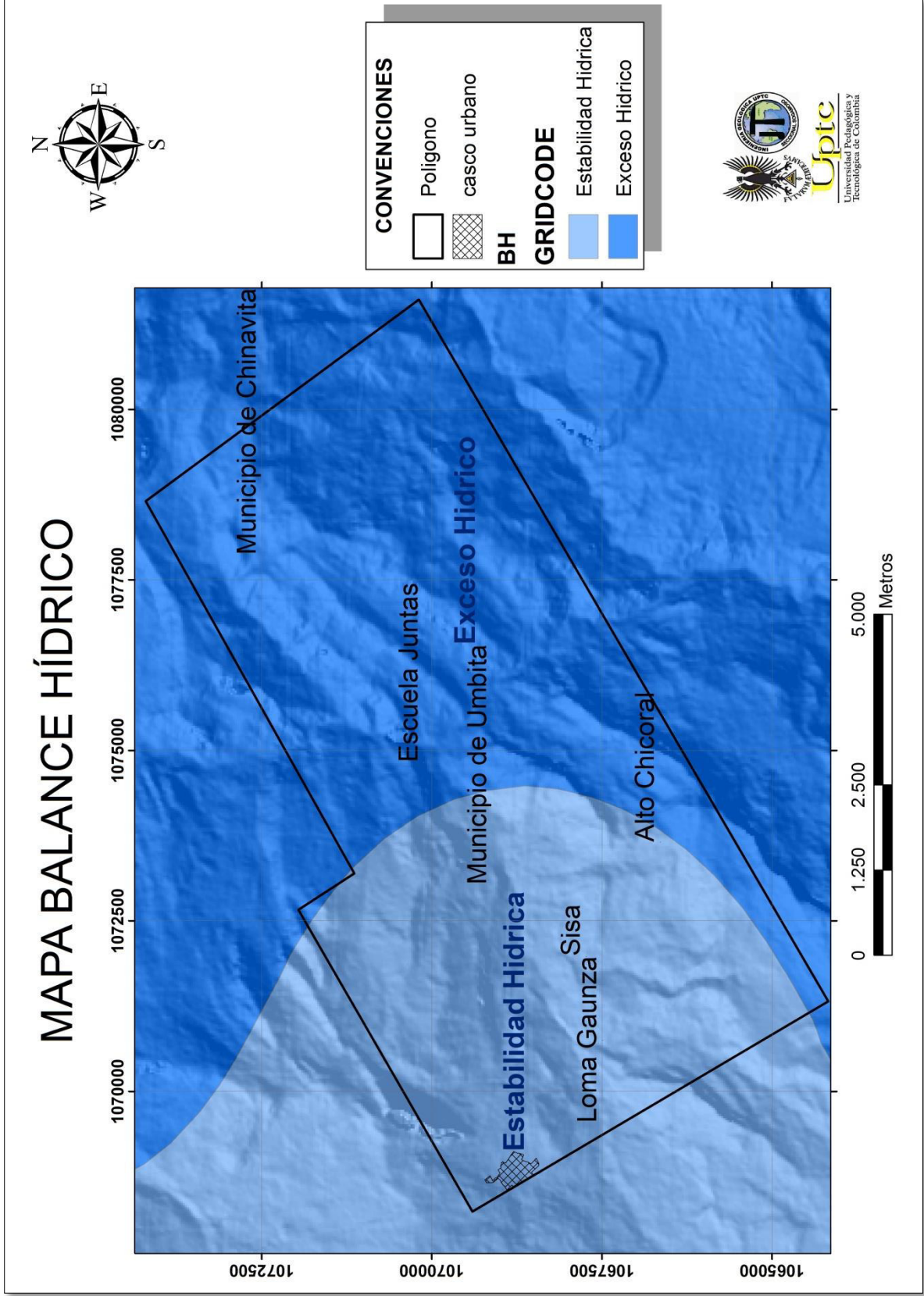
A continuación se presenta la Tabla 22 de la recarga que actúa en las Formaciones que presentan características de acuíferos de porosidad primaria y secundaria.

Tabla 22: Recarga por Acuíferos

FORMACION	SIGLA	TIPO DE ACUIFERO	AREA m ²	RECARGA m ³ /año
Deposito Cuaternario	Qco	Acuífero de Porosidad Primaria	7,521	1'216.597
Formación Picacho	E2P	Acuífero de Porosidad Primaria	6,053	979.133
Formación Socha Inferior	E1si	Acuífero de Porosidad Primaria	5,08	821.741
Formación Labor y Tierna	K2lt	Acuífero de Porosidad Primaria	4,023	650.760
Formación Dura	K2d	Acuífero de Porosidad secundaria	3,919	633.937
Formación Une	K1K2U	Acuífero de Porosidad secundaria	4,67	755.419
TOTAL			31,266	5'057.588

Fuente: Autores

Imagen 23: Balance Hídrico



Fuente: Autores

9. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La hidrogeología se encarga de evaluar la presencia, disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas, un acuífero potencial depende principalmente de sus características intrínsecas: La capacidad de almacenar y de permitir el flujo del agua; para ello estudia detalladamente las formaciones y/o suelos con una alta permeabilidad.

Un estudio hidrogeológico se basa principalmente propiedades físicas y geológicas de las rocas como lo son: la permeabilidad, porosidad, conductividad hidráulica, y características secundarias de las rocas como el fracturamiento y diaclasamiento, a partir de estas características se definen tres tipos de unidades hidrogeológicas: Acuífero, Acuitardo y/o Acuicierre y Acuífugo.²⁴

9.1 ACUÍFERO

Son rocas que almacenan agua y que a su vez permiten su movimiento bajo la acción de fuerzas de gravedad, es decir, presenta una porosidad y permeabilidad media a alta. De tal manera que puede explotarse en cantidades relativamente apreciables. Estos a su vez pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada dependiendo de la posición estructural de la roca. Pueden ser:

9.1.1 Acuíferos Confinados

En estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica, son rocas permeables limitadas por rocas de muy baja permeabilidad. No existe una superficie libre de del agua por lo que se habla de superficies piezométricas (Superficies imaginarias que coinciden con el nivel de agua del acuífero). Cuando se producen cabezas piezométricas mayores que las de la superficie del terreno se producen acuíferos saltantes o artesianos.

9.1.2 Acuíferos Libres

Son aquellos que presentan una superficie libre de agua, que está en contacto directo con la atmosfera, esta superficie se denomina Nivel freático. En estos acuíferos el espesor varía de forma directa con el comportamiento temporal de la precipitación.

²⁴ Vélez M. Ortiz C. Vargas M. Las aguas subterráneas un enfoque práctico. Universidad Nacional de Colombia. Ingeominas.

9.1.3 Acuíferos Semiconfinados

Son acuíferos limitados ya sea por la base o techo, o por ambos, por una capa semipermeable. Esta situación permite que haya flujo entre acuíferos que se encuentran separados por el Acuitardo, flujo que puede efectuarse en dirección a la diferencia de niveles piezométricos existentes entre éstos.

9.2 ACUITARDO Y/O ACUICIERRE

Son rocas que almacenan agua, pero sólo permiten el flujo de esta en forma muy lenta. Estas rocas pueden ser claves cuando se estudia el movimiento del agua a nivel regional. Se consideran acuitardos a rocas como arcillas y limos arenosos, gravas limo-arenosas que permiten que el material más fino se infiltre provocando una reducción en las líneas de flujo.

9.3 ACUÍFUGO

Son rocas o unidades geológicas impermeables que no almacenan ni transmiten agua, es decir, aquellas rocas en las cuales no existen intersticios intercomunicados y en consecuencia no absorben ni permiten el paso de agua.

9.4 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

Para la clasificación hidrogeológica de cada una de las formaciones se tomó en cuenta la capacidad de almacenar y transmitir fluidos de las rocas existentes.

9.4.1 Acuíferos

Según las condiciones de porosidad y permeabilidad que presentan las Formaciones Geológicas en la zona, se caracterizaron las siguientes Unidades como acuíferos:

Depósitos de Coluvión (Qc): constituidos por gravas y arenas no consolidadas, poseen alta porosidad y permeabilidad aptas para grandes acumulaciones de agua.

Formación Picacho (E2p): se caracteriza por poseer capas muy gruesas de cuarzonitas blancas o gris claro, textura media hasta conglomerática, friables, inmaduras, algo líticas, con estratificación inclinada. Aparecen lechos de guijos redondeados de cuarzo lechoso e intercalaciones de lodolitas abigarradas micáceas. Debido a su composición posee una buena porosidad y permeabilidad que lo caracterizan como acuífero. En la zona la formación se encuentra fallada, por lo que hay un aumento en la porosidad primaria.

Formación Socha Inferior (E1si) constituida por areniscas de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, con pequeñas intercalaciones de limolitas y arcillolitas la convierten en un buen acuífero de porosidad primaria. .

Formación Areniscas de Labor y Tierna (K2It): Secuencia de cuarzoarenitas grises, finas y muy finas con algunas intercalaciones de arcillolitas con buena permeabilidad, adicionalmente las estructuras geológicas en la formación facilitan la presencia de acuíferos de alta productividad.

Formación Arenisca Dura (K2d): cuarzoarenitas muy finas y finas intercaladas con porcelanitas, arcillolitas grises, cherts y limolitas de cuarzo, ocasionalmente capas de fosforita. Se considera un acuífero de baja productividad aunque en la zona se encuentra altamente fracturado, por lo que se considera un acuífero de porosidad primaria.

Formación Une (K1K2U): Está constituida por areniscas cuarzosas estratificadas, de grano fino a grueso, algunas veces conglomeráticas; altamente permeables, aunque la formación es altamente compacta, en la zona de estudio se encuentra altamente fracturada, por lo que se considera un acuífero de porosidad secundaria.

9.4.2 Acuitardos y/o acucierres.

Son rocas semipermeables que a pesar de contener grandes cantidades de Agua, la transmiten muy lentamente. En la zona se calificaron como acuitardos a las siguientes formaciones:

Formación Concentración (E2E3co): compuesta por arcillolitas y limolitas con intercalaciones de areniscas; en la parte basal, localmente una capa de hierro oolítico de poco espesor, Su composición permite el almacenamiento de agua subterránea, pero esta a su vez la transmite lentamente debido a las composiciones de grano fino.

Formación Chipaque (K2cp): Arcillolita gris oscuro, laminadas, meteorizadas, con intercalaciones tabulares de arenitas de cuarzo, de textura fina, maduras, con cemento silíceo, generalmente bioperturbadas en la base de las capas, con espesor delgado hasta grueso. Por su composición

Formación Plaeners (K2p): Arcillolitas grises con intercalaciones de cuarzoarenitas muy finas y finas, lodolitas, porcelanitas y capas de arenitas con restos de conchas bivalvos. Es un Acuitardo de productividad muy baja, siendo su principal fuente de recarga la precipitación y las aguas superficiales.

Formación Socha Superior (E1ss): compuesta por arcillolitas abigarradas con intercalaciones de areniscas de poco espesor, se constituye en acuitardo a pesar de los niveles arenosos que posee.

Formación Guaduas (K2E1g) compuesta por arcillolitas y limolitas abigarradas con intercalaciones de areniscas; en las partes inferior y media, frecuentes mantos de carbón. Debido a su alto contenido de rocas lutíticas de alta plasticidad se clasifica como un acuitardo, aunque presenta que algunos niveles arenosos que se pueden comportar como acuíferos confinados.

Para realizar el mapa hidrogeológico se realizó una correlación con las formaciones geológicas, de acuerdo a su litología y a la capacidad de porosidad y permeabilidad de la roca (Ver Tabla 23).

Tabla 23: Clasificación de unidades hidrogeológicas según litología

FORMACION	LITOLOGIA	CLASIFICACION	CARAC. HIDROGEOLOGICAS
Labor y tierna	Cuarzo arenitas, limolitas de cuarzo, arcillolitas con intercalaciones de areniscas.	Acuífero de porosidad primaria	Acuíferos que presentan porosidad y permeabilidad primaria que permite interconexión hidráulica.
Socha inferior	Areniscas cuarzosas de textura fina hasta conglomeratica en capas muy gruesas.		
Picacho	Capas gruesas de cuarzo arenitas de textura media hasta conglomeratica con intercalaciones de lodolitas micáceas.		
Deposito coluvial	Bloques angulosos a subangulosos arenosos y limosos, en una matriz areno arcillosa		
Une	Cuarzo arenitas finas, algo meteorizadas, con cemento síliceo intercaladas con capas de arcillolitas limosas.	Acuífero de porosidad secundaria	Están restringidos a áreas fracturadas donde se genera porosidad y permeabilidad secundaria.
Dura	Cuarzo arenitas de color naranja con textura fina a muy fina, micáceas o glauconíticas con intercalaciones de porcelanitas y arcillolitas.		
Chipaque	Arcillolitas laminadas meteorizadas con intercalaciones de areniscas de textura fina cuarzosas.	Acuitardo	Presenta porosidad y permeabilidad secundaria.
Plaeners	Arcillolitas grises meteorizadas con intercalaciones de cuarzo arenitas.		

Guaduas	Sucesión lutítica con intercalaciones de areniscas y capas de carbón.		Debido a la presencia de areniscas y capas de carbón se consideras como transmisor y almacenador.
Socha superior	Arcillolitas con pequeñas intercalaciones de lodolitas, limolitas y areniscas.		Presenta porosidad y permeabilidad secundaria.
Concentración	Arcillolitas y lodolitas abigarradas macizas micáceas con capas gruesas de conglomerado arenoso.		

Fuente: Autores

9.5 ZONAS DE RECARGA

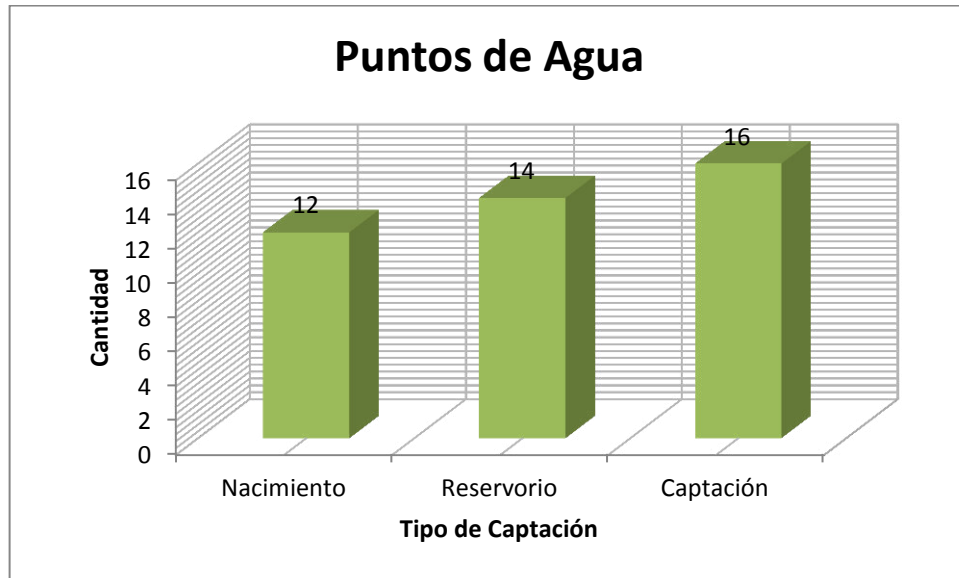
Se presentan zonas de recarga a lo largo del área de estudio, debido a que se encuentra en el flanco este del sinclinal de Umbita, donde las características de porosidad y permeabilidad de algunas formaciones, como el grado de inclinación de la estructura son indispensables para la determinación del grado de infiltración de agua lluvia. Así las formaciones de Labor y Tierna, Socha Inferior y Dura en donde forman laderas se comportan como zonas de recarga.

Los puntos de descarga principales son los manantiales, originados por surgencias superficiales de agua subterránea, que drenan hacia diversos cauces que se convierten en afluentes de los drenajes principales como son el Rio El Bosque y el Rio Garagoa (Ver Imagen 24).

9.5.1 Inventario de puntos de agua

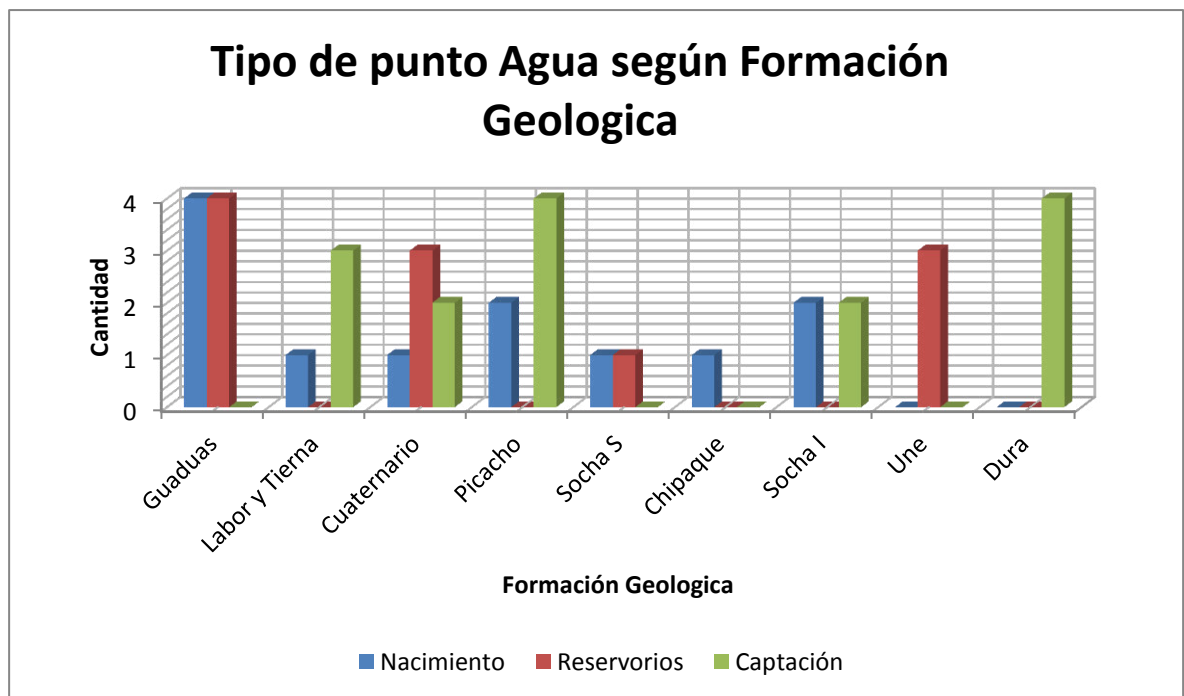
Los registros de puntos de agua se obtuvieron durante la visita a campo, en la cual se recopiló información de 42 captaciones de agua entre las que se destacan reservorios que son utilizados principalmente para uso agrícola, captaciones de agua de nacimientos y manantiales provenientes de agua subterránea, que en algunos casos surten a población, o están siendo estudiados para posibles acueductos. Se observaron 12 nacimientos de agua y 30 puntos de agua superficial de origen antrópico (reservorios y captaciones de nacimientos de agua) (Ver Gráfico 5). La formación geológica donde más se registraron puntos de agua fue la formación Guaduas (Ver Gráfico 6) cerca a las areniscas guía, seguido de la formación Picacho y los depósitos Cuaternarios, en la formación Picacho se encuentran en la base de sus laderas ya que son áreas destacadas para ser zonas de descarga.

Grafico 5: Tipos de captación de Agua



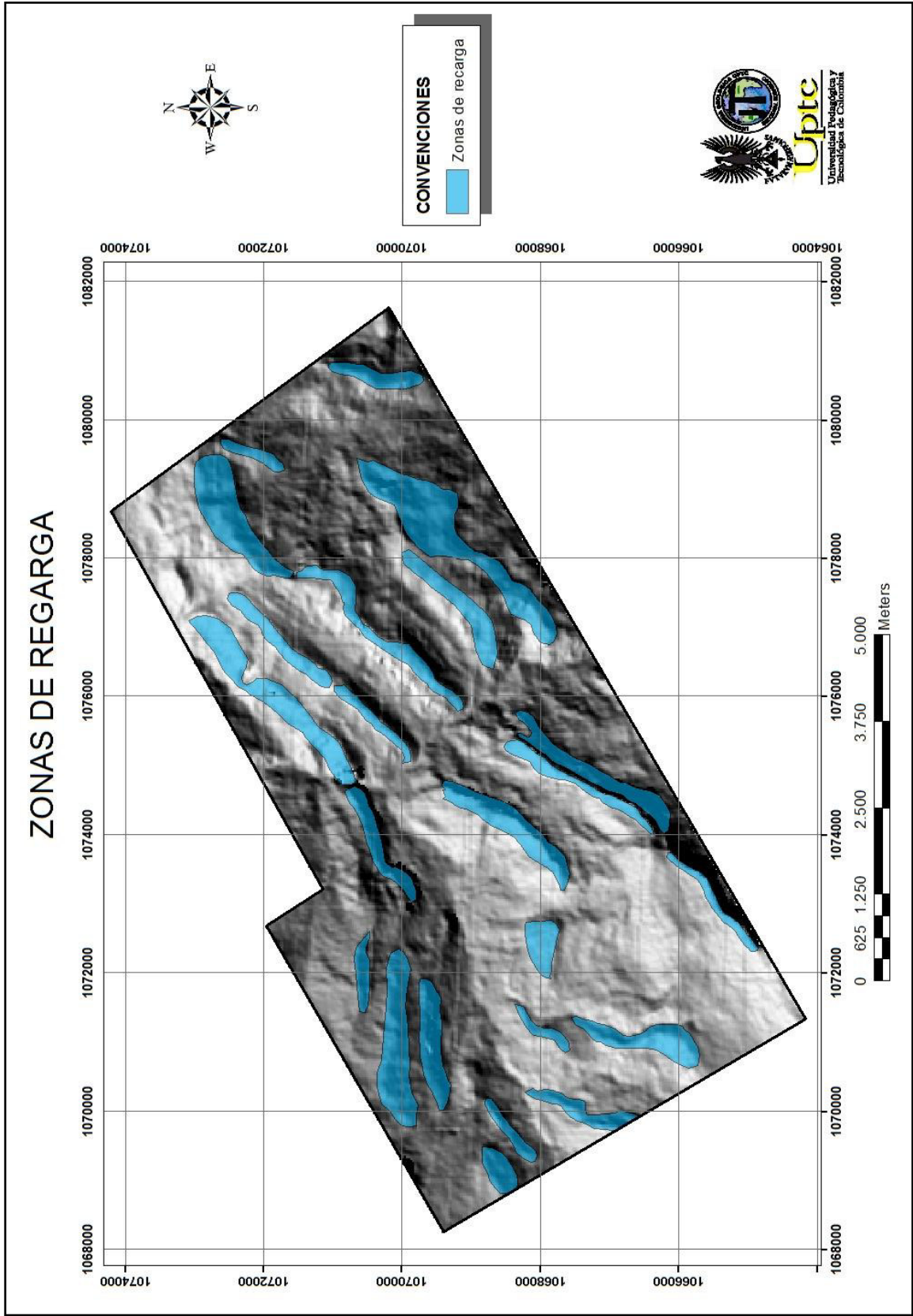
Fuente: Autores

Grafico 6: Puntos de Nacimientos de Agua Ubicados en las formaciones geológicas presentes.



Fuente: Autores

Imagen 24: Zonas de Recarga



Fuente: Autores

Imagen 25: Mapa Hidrogeológico

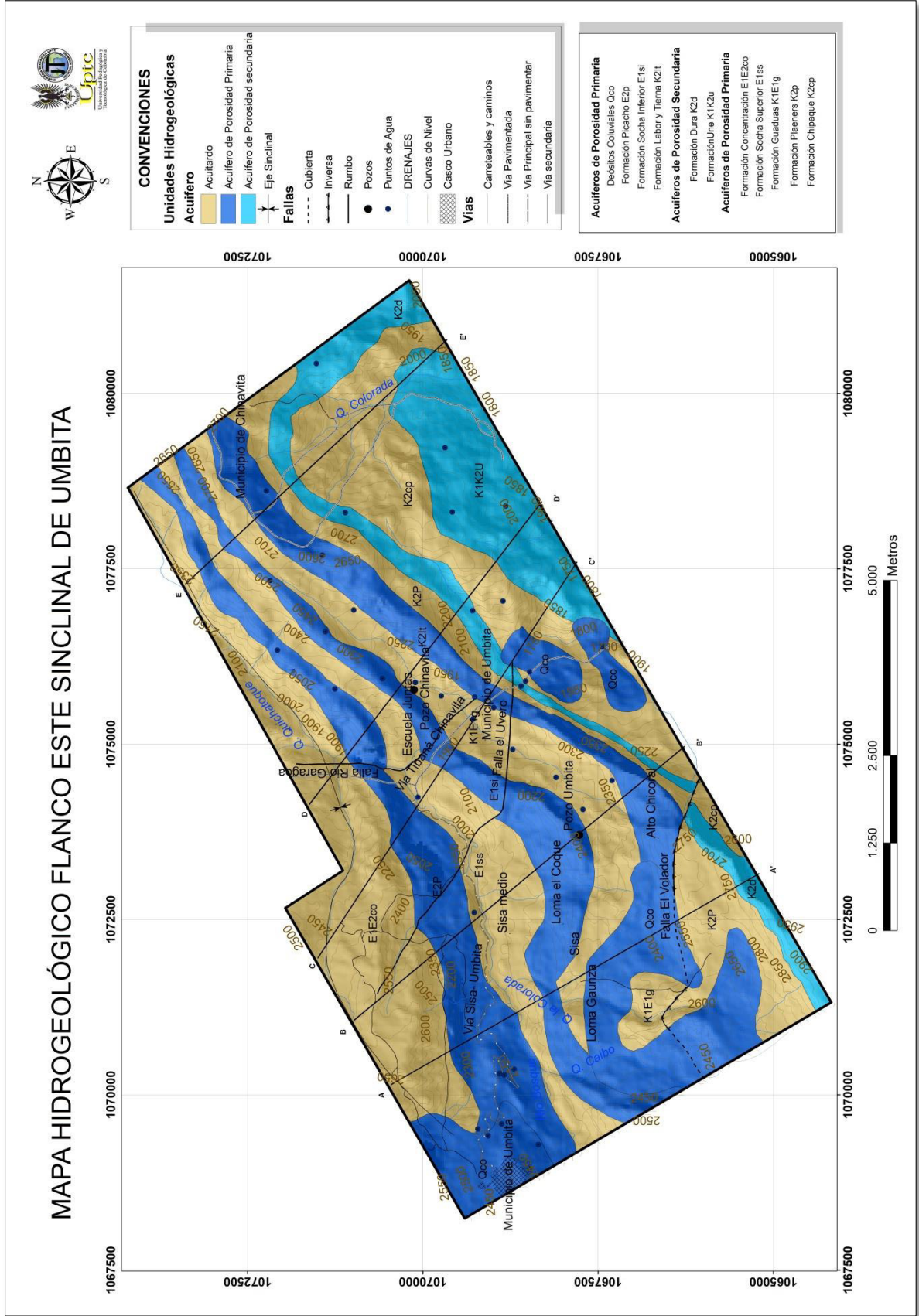
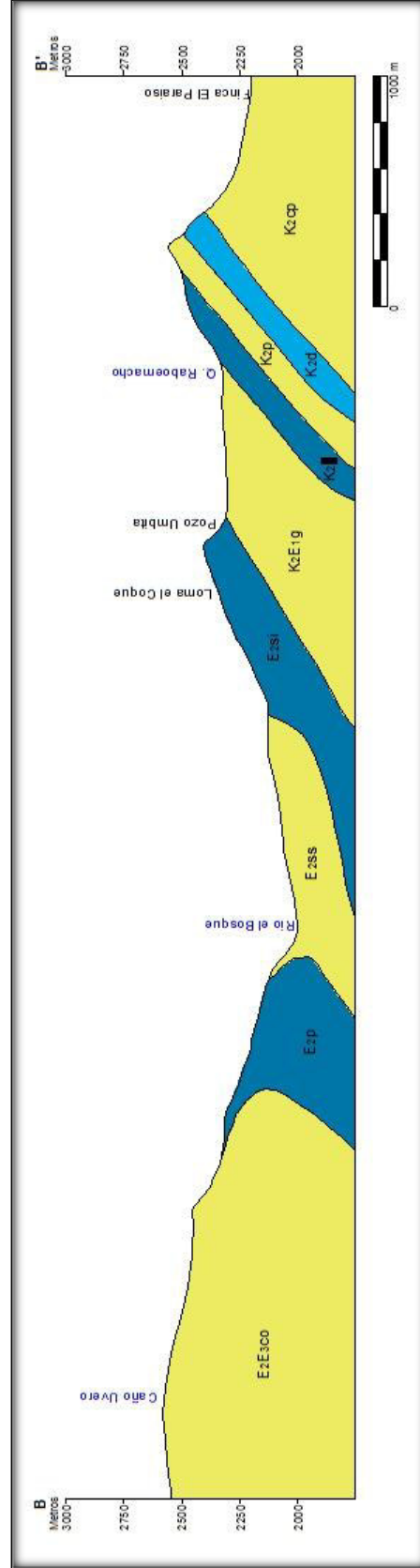
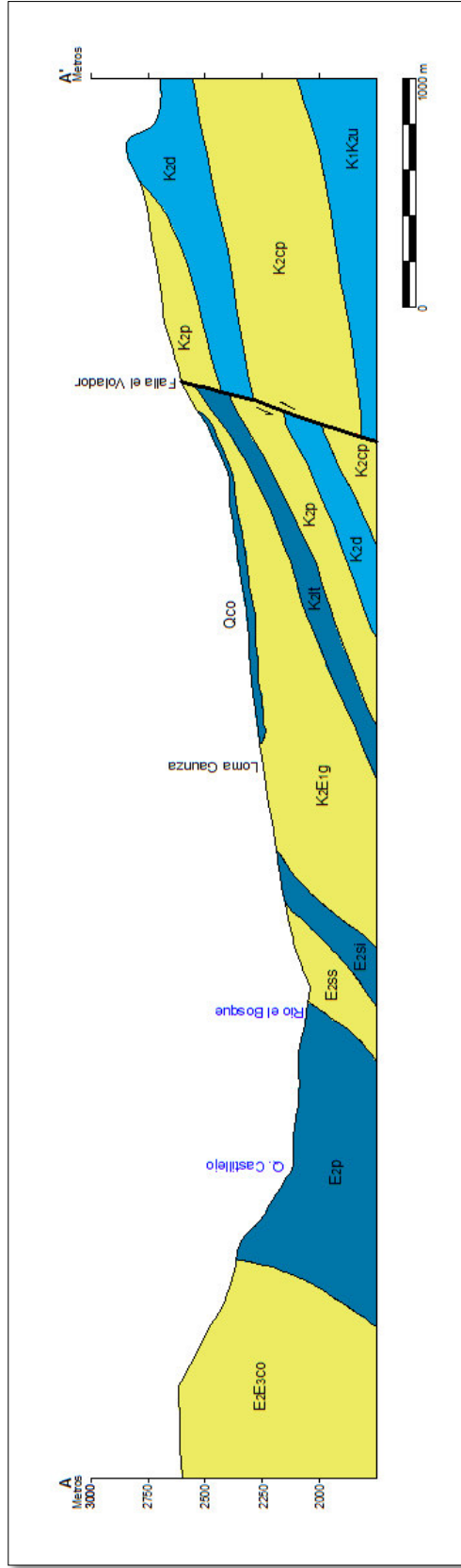
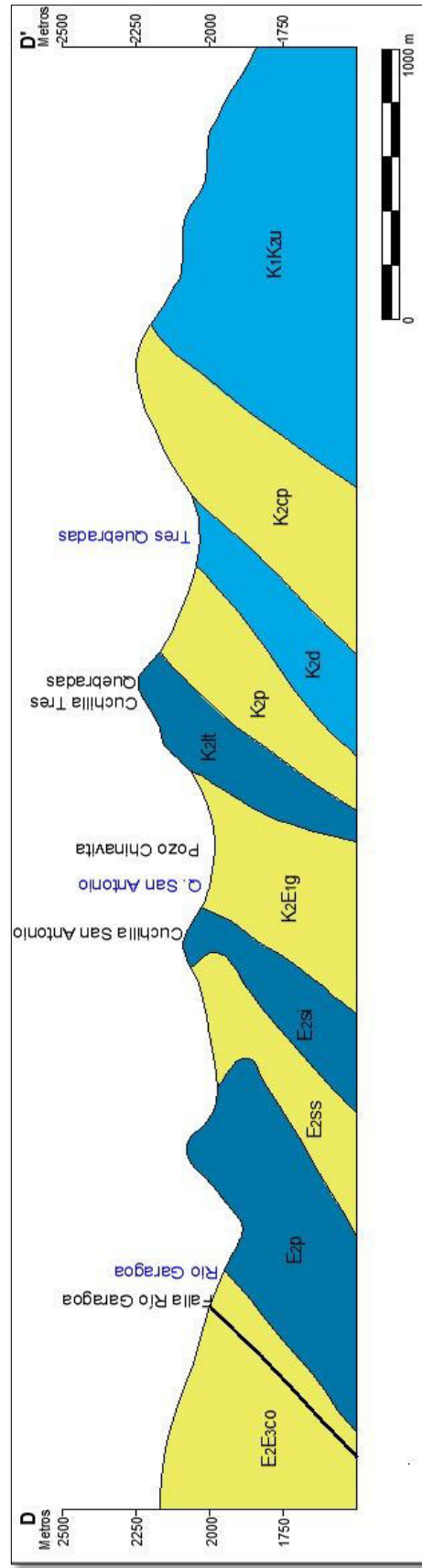
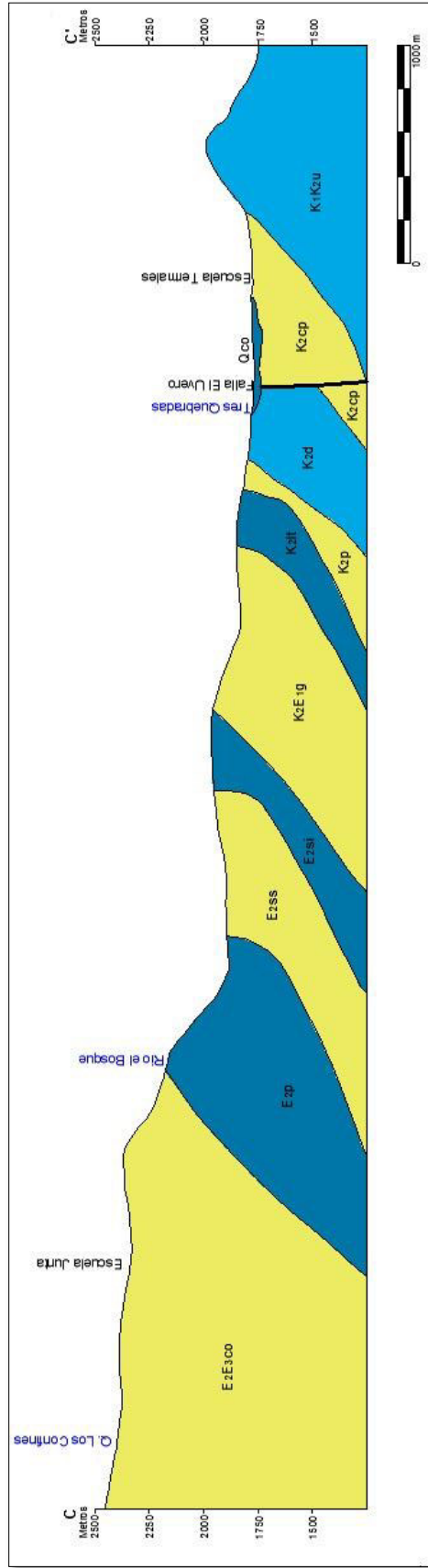


Imagen 26. Perfiles Hidrogeológicos Perfil A-A' y Perfil B-B'



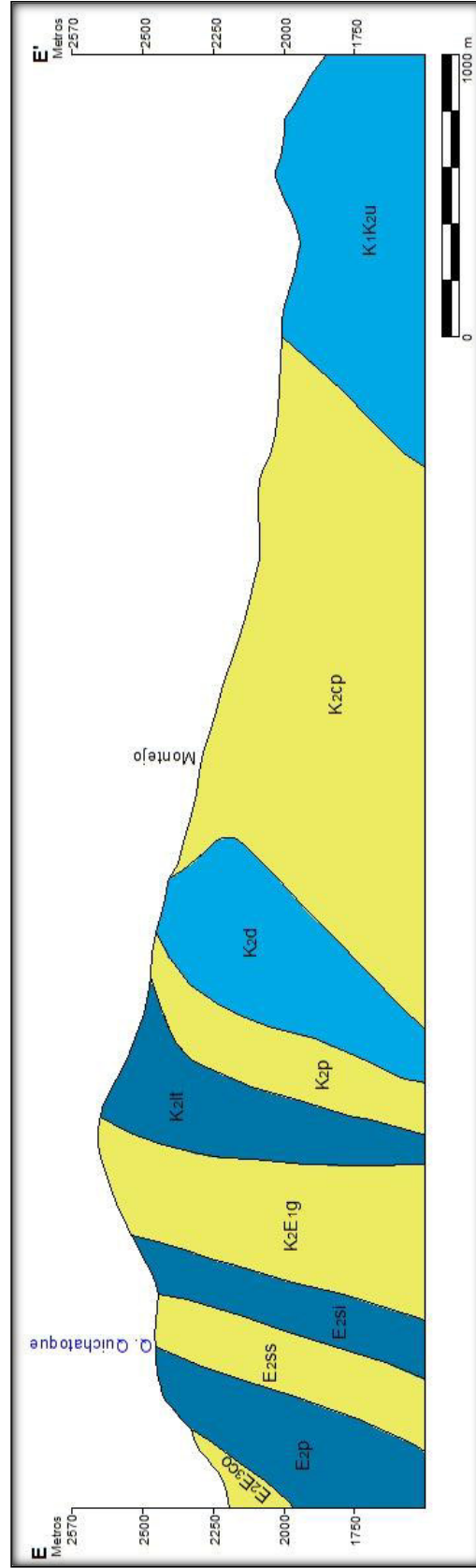
Fuente. Autores

Imagen 27. Perfiles Hidrogeológicos, Perfil C-C' y Perfil D-D'



Fuente. Autores

Imagen 28. Perfil Hidrogeológico, Perfil E-E'



Fuente. Autores

10. HIDROGEOQUÍMICA

La hidrogequímica permite definir las características químicas del agua de superficie y subterránea, estableciendo el origen, procesos y evolución que tiene el agua almacenada en diferentes formaciones geológicas, esto debido a la constante interacción entre agua y roca. Inicialmente se planteó tomar las muestras de agua en los pozos perforados por el SGC; sin embargo debido a la falta de acceso por el sellamiento completo de estos con cemento se replanteo el lugar de toma de muestras. Por tanto para el reconocimiento y caracterización del agua de superficie y el agua encontrada en la formación Guaduas específicamente sobre los mantos de carbón se analizaron siete muestras de agua, cuatro muestras tomadas en los frentes de mina teniendo en cuenta el contacto agua - carbón y tres muestras en la parte superficial de la formación.

El muestreo se realizó en los municipios de Ñmbita y Chinavita, en las veredas Juncal y Usillo, la toma de muestras de agua de superficie, se realizó en drenajes y nacimientos en las veredas de Usillo y Juncal municipios de Chinavita y Ñmbita respectivamente. Estas muestras fueron debidamente tomadas en recipientes adecuados, rotulados y entregadas al laboratorio de química ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, para sus respectivos análisis fisicoquímicos (Ver Fotografía 18). Los resultados de análisis fisicoquímicos las muestras de agua tomadas al interior de las minas San Antonio de Usillo, Juncal (Parte Alta) y Juncal (Parte Baja), fueron facilitados al presente estudio por los propietarios de las minas.

Fotografía 18. Recipientes muestras de agua superficial de los municipios de Umbita y Chinavita.



Fuente. Autores

Dos muestras de superficie se obtuvieron en nacimientos de agua, uno ubicado en la vereda Usillo municipio de Chinavita (2133 m.s.n.m) sobre la formación Socha Inferior y otro en la vereda Juncal municipio de Ñmbita (2031 m.s.n.m) formación Guaduas, la tercera muestra de superficie se tomó en la Quebrada San Antonio (1997 m.s.n.m) que discurre a lo largo de la formación Guaduas. Las muestras de agua procedente de mantos de carbón fueron tomadas en frentes de explotación de las minas San Antonio de Usillo y Juncal zona Alta y Baja (Ver Tabla 24).

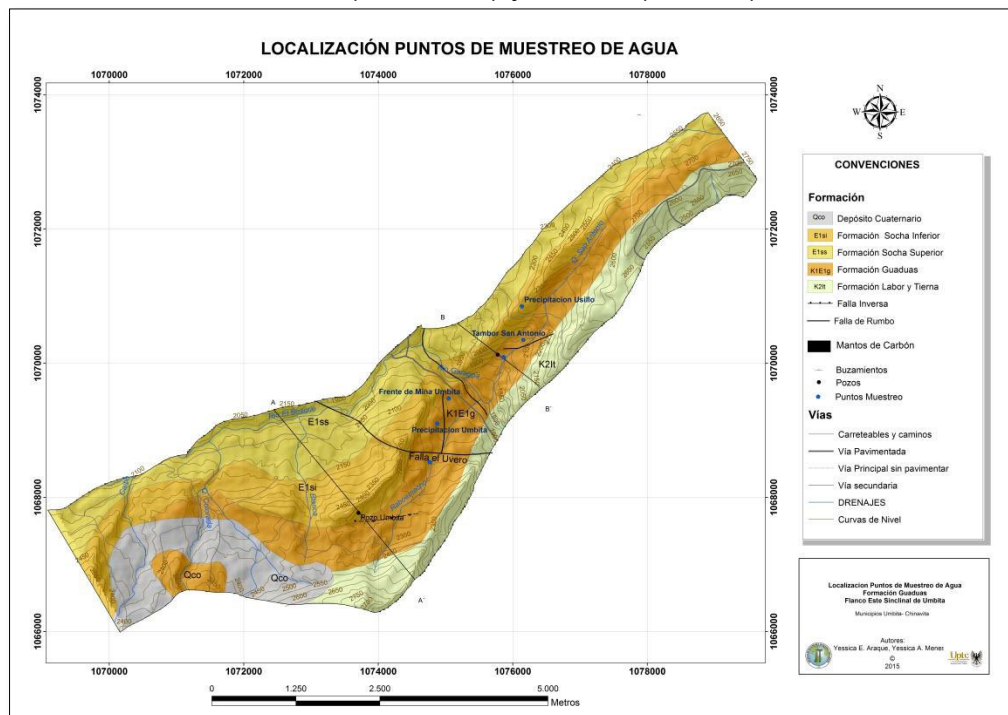
Tabla 24. Muestras de mantos de carbón.

MUESTRA N°	NOMBRE	ALTURA (m.s.n.m)	MANTO
1	Inclinado Mina San Antonio Chinavita	2058	M7
2	Tambor Mina San Antonio Chinavita	2073	M7
3	Inclinado Mina el Juncal Parte Baja Ñmbita	1971	M6
4	Inclinado Mina Juncal Parte Alta Ñmbita	2028	M7

Fuente. Autores

En la Imagen 29 se presenta la localización de cada uno de los puntos de muestreo.

Imagen 29. Puntos de muestreo de agua formación Guaduas y Socha Inferior, veredas Usillo (Chinavita) y Juncal (Ñmbita)



Fuente. Autores

10.1 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS QUÍMICOS

Previo a la clasificación y descripción del tipo de agua en cada una de las muestras tomadas, se requiere la evaluación de los resultados químicos mediante un balance iónico (electroneutralidad) y verificación de relaciones entre algunos iones y parámetros, que permitan verificar la confiabilidad de los resultados.

10.1.1 Balance iónico

Mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en mili equivalentes por litro (meq/L), los rangos de error para aceptar o no el análisis de una muestra de agua, dependen del valor de conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1976) (Ver Tabla 25 y 26). Estos valores pueden ser conservadores, por tanto se acepta un valor máximo en el error del balance iónico de 10%.

$$Error = \frac{\sum Cationes - \sum Aniones}{\sum Cationes + \sum Aniones} * 100$$

Tabla 25: Balance Iónico muestras de agua mantos de carbón

MUESTRAS MANTOS DE CARBON				
PARAMETRO	Inclinado Mina San Antonio	Frente de Mina Juncal (Parte Alta)	Frente de Mina Juncal (Parte Baja)	Tambor Mina San Antonio
Aniones (meq/L)	5,04	8,86	8,35	1,75
Cationes (meq/L)	5,83	5,4	8,64	2,4
Balance Ionico (%)	7,32	-24,25	1,69	15,63
CE (uS/cm)	479	959	797	180,8
Error Aceptable (%)	±8	±4	±4	±10
	ACEPTABLE	NO ACEPTABLE	ACEPTABLE	ACEPTABLE

Fuente. Autores

Tabla 26: Balance Iónico muestras de agua superficial

MUESTRAS DE SUPERFICIE			
PARAMETRO	QUEBRADA SAN ANTONIO	NACIMIENTO USILLO	NACIMIENTO UMBITA
Aniones (meq/L)	0,29	0,26	0,2
Cationes (meq/L)	0,33	0,27	0,2
Balance Ionico (%)	6,77	2,85	1,34
CE (uS/cm)	23,5	18,2	10
Error Aceptable (%)	±30	±30	±30
	ACEPTABLE	ACEPTABLE	ACEPTABLE

Fuente. Autores

10.1.2 Relaciones Interparamétricas

Son relaciones que se evalúan para complementar el criterio de confiabilidad de los resultados químicos de muestras de agua.

Tabla 27: Relaciones interparamétricas muestras de mantos de carbón

RELACIONES INTERPARAMÈTRICAS MUESTRAS MANTOS DE CARBON					
PARAMETRO	Inclinado Mina San Antonio	Frente de Mina Juncal (Parte Alta)	Frente de Mina Juncal (Parte Baja)	Tambor Mina San Antonio	ESTADAR
rNa/rK	1,15	43,84	2,66	8,48	<20
rCa/rMg	67,28	68,16	69,85	73,45	<40
rSO4/Cl	5,29	0,27	1,19	7,59	
rCl/rHCO3	99,08	0	98,17	99,13	
rCa/rSO4	8,91	15,76	19,03	69,66	>50
rNa/rCl	99,29	82,68	98,7	98,57	>50
icb	-139,83	-7,5	-77,26	-74,38	
kr	1,09	0	2,31	0,94	
CE/Cationes	82,15	177,51	92,25	75,46	>90 y <110

Fuente. Autores

Tabla 28: Relaciones interparamétricas muestras de Superficie

MUESTRAS DE SUPERFICIE				
PARAMETRO	QUEBRADA SAN ANTONIO	NACIMIENTO USILLO	NACIMIENTO UMBITA	ESTANDAR
rNa/rK	17,05	0	20,82	<20
rCa/rMg	72,63	78,8	71,12	<40
rSO4/Cl	17,92	15,93	100	
rCl/rHCO3	92,96	92,25	90,44	
rCa/rSO4	38,79	33,81	100	>50
rNa/rCl	79,21	55,71	62,94	>50
icb	-3,59	-0,26	-1,14	
kr	0,12	0,1	0,1	
CE/Cationes	71,12	67,4	49,28	>90 y <110

Fuente. Autores

Las fórmulas utilizadas para determinar los valores de icb y kr se describen a continuación:

$$Kr = (Ca * (HCO3)^2)^{1/3}$$

$$Icb = (Cl - (Na + K))/Cl$$

Al obtener los resultados del balance iónico y relaciones iónicas, se evidencia que la muestra número 5 del frente de mina Juncal de la parte alta de la vereda, no alcanza los niveles de confiabilidad para verificar la consistencia de los análisis, ya que para un valor de conductividad eléctrica de 959 $\mu\text{s}/\text{cm}$ presenta un porcentaje de error de -24,25% (Ver Tabla 25), cuando para dicho valor el error aceptable es de $\pm 4\%$. La muestra del tambor de San Antonio de Usillo es aceptable debido a que estos valores son conservadores por tanto se acepta un error máximo de 10%. Al desarrollar las relaciones interparamétricas se encontró deficiencia en algunos resultados ya que no concuerdan con los estándares establecidos (Ver Tabla 27).

Estas anomalías se pudieron presentar debido a:

- Falta de bombeo en la mina que provoca estancamiento en el agua, por lo que se puede contaminar con los componentes minerales de las rocas adyacentes.
- Circulación de agua de diferentes mantos de carbón que generan mezclas de agua.
- Ausencia de refrigeración durante el transporte de las muestras.
- Contaminación de la muestra en momento de su toma.
- Falta de conservación de las condiciones naturales de la muestra de agua.

Tanto las muestras de superficie como las de los inclinados de las minas San Antonio y Juncal Parte Baja presentan un balance iónico aceptable y los datos son confiables para realizar interpretaciones.

10.2 PARÁMETROS FÍSICOS

10.2.1 Conductividad Eléctrica

Es la habilidad que tiene para conducir corriente eléctrica, depende del contenido iónico del agua, a mayor contenido de iones mayor conductividad eléctrica, a su vez está directamente relacionada con la temperatura. Para las muestras de superficie los valores de conductividad son muy bajos se encuentran en un intervalo de 10 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 23,5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ lo que evidencia muy baja mineralización, las muestras de mantos de carbón presentan valores entre 180 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 950 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

10.2.2 Potencial de Hidrogeno (ph)

Se refiere a la intensidad de la condición de acidez o alcalinidad de una solución (Sawyer, 1978), tiene en una escala de 0 a 14, donde el valor de 7 es neutro, menores a este valor son ácidos y mayores alcalinos. El valor de ph varía con respecto a la temperatura. Las muestras de agua tomadas en el área de estudio se identifican por valores de ph entre 5,3 – 7,3; sin embargo se encontró que la

muestra de la mina de Juncal parte alta tiene un Ph ácido (2,86), se debe tener en cuenta que esta muestra no es confiable, de acuerdo al análisis de electro neutralidad.

10.2.3 Dureza

Este parámetro permite medir la capacidad que tiene el agua de producir espuma, está en función del Calcio y Magnesio. Las muestras de precipitación y de la mina San Antonio de Usillo se consideran blandas, mientras que las correspondientes a las minas del municipio de Umbita se clasifican como Duras.

10.2.4 Alcalinidad

La alcalinidad se define como la capacidad de neutralizar ácidos, en aguas naturales la alcalinidad es debida a la presencia de tres compuestos: Hidróxidos, Carbonatos y Bicarbonatos.

Las Tabla 29 y 30, presentan los parámetros físicos de cada una de las muestras de agua.

Tabla 29. Localización y parámetros físicos muestras de agua

MUESTRA	LOCALIZACIÓN			CE $\mu\text{s}/\text{cm}$	T (°C)	Ph	T (°C)	DUREZA CALCIO	DUREZA MAGNESIO	DUREZA TOTAL
	NORTE	ESTE	ALTURA							
1 QDA. SAN ANTONIO VEREDA USILLO	1070091	1075866	1997	23,5	22,5	5,75	17,3	3,15	7,03	10,18
2 NACIMIENTO USILLO	1070881	1075655	2133	18,2	22,5	5,31	18,3	2,6	8,13	10,73
3 NACIMIENTO 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

Fuente. Autores

Tabla 30. Solidos totales encontrados en las muestras de agua

MUESTRA	PESO CAPSULA	AGUA	RESIDUO EN ppm	RESIDUO	%RESIDUO
1 QDA. SAN ANTONIO VEREDA USILLO	51,8956	49,8727	39900	0,0399	0,08
2 NACIMIENTO USILLO	43,9302	49,8811	12600	0,0126	0,03
3 PRECIPTACION UMBITA	50,7981	49,8225	3700	0,0037	0,01
4 INCLINADO MINA SAN ANTONIO	52,3235	49,8856	24100	0,0241	0,05
5 FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte Alta)	54,4847	49,8974	48800	0,0488	0,1
6 FRENTE DE MINA JUNCAL (Parte Baja)	52,4185	24,3823	30900	0,0309	0,13
7 TAMBOR MINA SAN ANONIO	44,0737	49,8698	41500	0,0415	0,08

Fuente. Autores

10.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química del agua varía de acuerdo al conjunto de sustancias generalmente orgánicas que estén en contacto con esta, para definir la composición química de cada una de las muestras de agua se realizó análisis de aniones y cationes que se exponen en la Tabla 31.

Con los resultados obtenidos y sus respectivas conversiones (Ver Tabla 32), utilizando los software DIAGRAMMES y EASY_QUIM, se realizaron diagramas de Piper, Stiff y Schöeller Berkaloff con el fin de obtener facies de agua, direcciones de flujo que permita establecer conexiones entre el agua superficial y la encontrada en los mantos de carbón igualmente tener una mejor interpretación de los datos obtenidos con los análisis químicos.

Tabla 31. Composición química de muestras de agua

NOMBRE	FLUORURO (F-)	CLORURO (Cl-)	NITRITOS (NO ₂ -)	BROMUROS (Br)	NITRATOS (NO ₃ -)	SULFATO (SO ₄)	HIDROXIDO (OH)	CARBONATO (CO ₃)	BICAR. (HCO ₃)	HIERRO (Fe)
QDA. SAN ANTONIO VEREDA USILLO	0,000	0,772	0,000	0,000	0,000	4,878	0,000	0,000	10,200	0,000
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	LITIO (Li)	SODIO (Na)	AMONIO (NH ₄)	POTASIO (K)	MAGNESIO (Mg)	CALCIO (Ca)	ESTRONCIO (Sr)	ZINC (Zn)	COBALTO (Co)	NIQUEL (Ni)
QDA. SAN ANTONIO VEREDA USILLO	0,000	1,906	0,000	0,666	2,026	1,262	0,000	0,000	0,000	0,000
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

Fuente. Autores

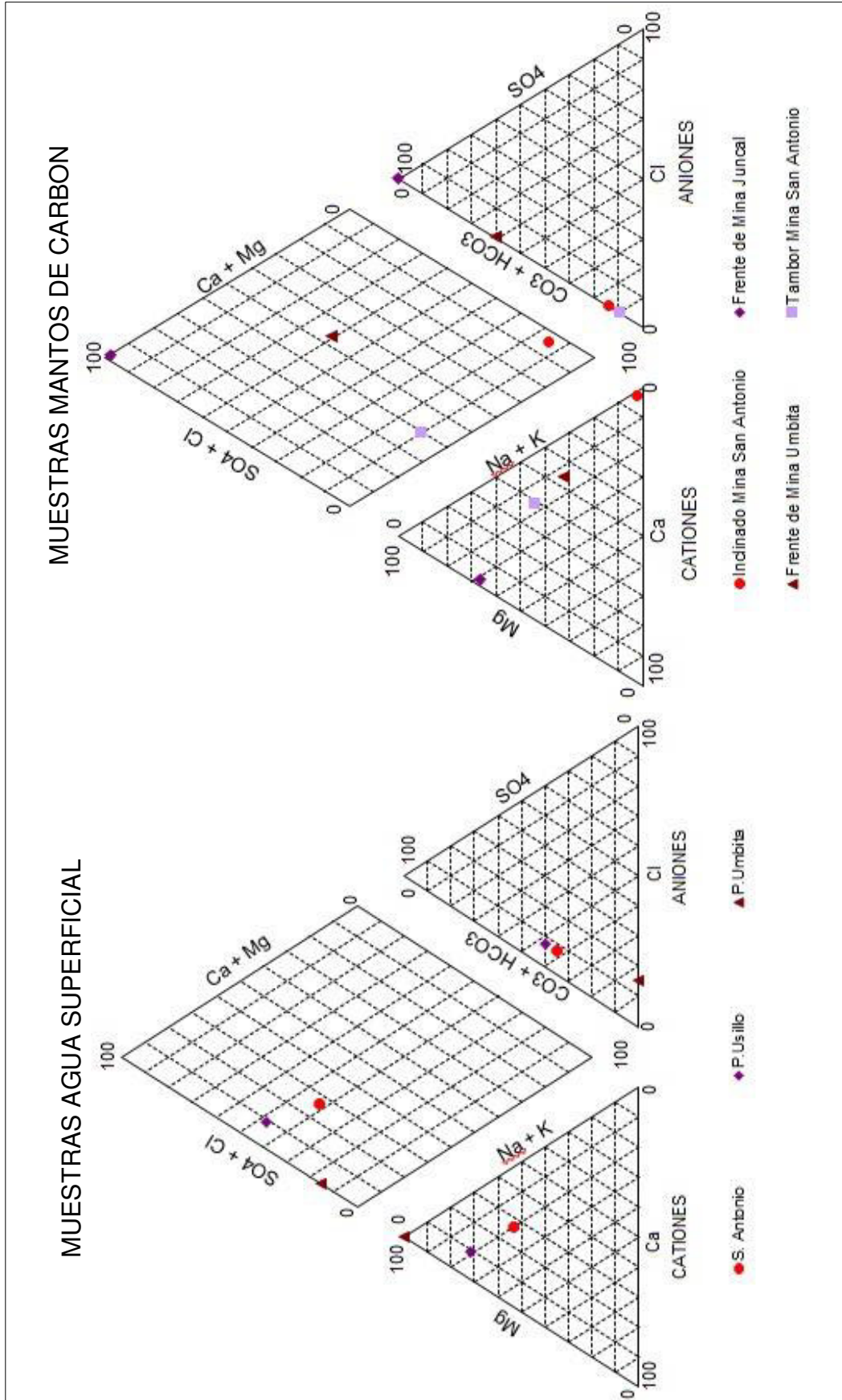
Las muestras superficiales presentan una composición iónica menor con respecto a las muestras del subsuelo. Las muestras en general tienen en común iones como HCO₃⁻, SO₄⁻, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Na⁺, Cl⁻; las muestras tomadas en los manto de carbón presentan composiciones de F⁻, NO₃⁻, Fe, K y Ni. Dos tipos de agua contienen iones en menor proporción de NO₂⁻, Li, Zn.

Tabla 32. Conversiones valores iónicos muestras de agua.

MUESTRAS MANTOS DE CARBON					MUESTRAS DE SUPERFICIE			
PARAMETRO	Inclinado Mina San Antonio	Frente de Mina Juncal (Parte Alta)	Frente de Mina Juncal (Parte Baja)	Tambor Mina San Antonio	PARAMETRO	QUEBRADA SAN ANTONIO	NACIMIENTO USILLO	NACIMIENTO UMBITA
NORTE	1070349	1068527	1069478	1070420	NORTE	1070091	1070849	1069100
ESTE	1076157	1074764	1075045	1076270	ESTE	1075866	1076136	1074877
ALTURA	2058	2028	1971	2073	ALTURA	1997	2133	2031
FECHA	17-sep-15	17-sep-15	17-sep-15	17-sep-15	FECHA	17/09/2015	18/09/2015	19/09/2015
CE (uS/cm)	479	959	797	180,8	CE (uS/cm)	23,5	18,2	10
TEMP (°C)	19,3	19,2	19,2	18,8	TEMP (°C)	17,3	18,3	18,3
pH	7,32	2,86	6,85	5,61	pH	5,75	5,31	5,51
ANIONES	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	ANIONES	mg/L	mg/L	mg/L
HCO3-	261,12	0	197,88	91,8	HCO3-	10,2	8,16	10,2
SO4=	34,31	422,83	240,45	7,75	SO4=	4,78	4,9	0
Cl-	1,42	0,84	2,15	0,47	Cl-	0,77	0,69	1,08
NO3-	0	1,74	2,33	4,25	NO3-	0	0	0
TOTAL	296,84	425,42	442,8	104,27	TOTAL	15,75	13,74	11,28
CATIONES	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	CATIONES	mg/L	mg/L	mg/L
Na+	127,71	2,61	106,01	21,05	Na+	1,91	0,56	1,19
K+	2,53	3,46	4,93	3,32	K+	0,67	0	0,53
Ca++	1,4	32,96	23,54	7,41	Ca++	1,26	1,04	0,8
Mg++	1,74	42,69	32,99	12,41	Mg++	2,03	2,34	1,19
TOTAL	133,38	81,71	167,48	44,19	TOTAL	5,86	3,94	3,7
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L	mg/L
NH4+	0	0,45	0	0	NH4+	0	0	0
Cl-+NO3-	1,42	2,59	4,48	4,72	Cl-+NO3-	0,77	0,69	1,08
Na+ + K+	130,24	6,06	110,95	24,37	Na+ + K+	2,57	0,56	1,72
CONVERSIONES					CONVERSIONES			
ANIONES	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	ANIONES	meq/L	meq/L	meq/L
HCO3-	4,28	0	3,24	1,5	HCO3-	0,17	0,13	0,17
SO4=	0,71	8,81	5,01	0,16	SO4=	0,1	0,1	0
Cl-	0,04	0,02	0,06	0,01	Cl-	0,02	0,02	0,03
NO3-	0	0,03	0,04	0,07	NO3-	0	0	0
Cl-+NO3-	0,04	0,05	0,1	0,08	Cl-+NO3-	0,02	0,02	0,03
TOTAL	5,04	8,86	8,35	1,75	TOTAL	0,29	0,26	0,2
CATIONES	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	CATIONES	meq/L	meq/L	meq/L
Na+ + K+	5,62	0,2	4,74	1	Na+ + K+	0,1	0,02	0,07
Na+	5,55	0,11	4,61	0,92	Na+	0,08	0,02	0,05
K+	0,06	0,09	0,13	0,08	K+	0,02	0	0,01
Ca++	0,07	1,65	1,18	0,37	Ca++	0,06	0,05	0,04
Mg++	0,14	3,53	2,73	1,03	Mg++	0,17	0,19	0,1
NH4+	0	0,02	0	0	NH4+	0	0	0
TOTAL	5,83	5,4	8,64	2,4	TOTAL	0,33	0,27	0,2
ANIONES	%	%	%	%	ANIONES	%	%	%
HCO3-	85,01	0	38,84	86,09	HCO3-	57,95	52,44	84,63
SO4=	14,19	99,41	59,98	9,23	SO4=	34,51	39,99	0
Cl-	0,79	0,27	0,72	0,76	Cl-	7,54	7,58	15,37
NO3-	0	0,32	0,45	3,92	NO3-	0	0	0
Cl-+NO3-	0,79	0,59	1,17	4,68	Cl-+NO3-	7,54	7,58	15,37
TOTAL	100	100	100	100	TOTAL	100	100	100
CATIONES	%	%	%	%	CATIONES	%	%	%
Na+ + K+	96,34	3,73	54,81	41,74	Na+ + K+	30,23	9	32,09
Na+	95,23	2,1	53,35	38,2	Na+	25,08	9	25,41
K+	1,11	1,64	1,46	3,54	K+	5,15	0	6,68
Ca++	1,2	30,5	13,62	15,47	Ca++	19,1	19,29	19,61
Mg++	2,46	65,3	31,56	42,79	Mg++	50,67	71,71	48,3
NH4+	0	0,46	0	0	NH4+	0	0	0
TOTAL	100	100	100	100	TOTAL	100	100	100

Fuente. Autores

Grafico 7. Diagramas de Piper



Fuente. Autores

Para elaborar Diagramas de Piper y Stiff se realizaron conversiones ml/L a % y meq/L, respectivamente.

10.3.1 Descripción Según diagrama de Piper.

Para las muestras superficiales la interpolación en el gráfico arroja aguas tipo Bicarbonatadas Magnésicas, siendo el valor de 10,2 ppm en la Quebrada San Antonio y en el nacimiento del municipio de Ñmbita la mayor concentración de HCO_3^- . En cuanto a las muestras procedentes de los mantos de carbón en el tambor de la mina San Antonio se tiene igual composición que las de superficie pero con mayor concentración iónica. La muestra de agua del inclinado tiene una composición Bicarbonatada sódica. Con respecto a las muestras tomadas en los frentes de explotación del municipio de Ñmbita presentan composición Sulfatada, en la mina de la parte alta de la vereda Juncal se interpretaron de tipo Sulfatada Magnésica; mientras que en la mina de la parte baja de la vereda Juncal se halló agua de tipo Sulfatada sódica. (Ver Gráfico 7)

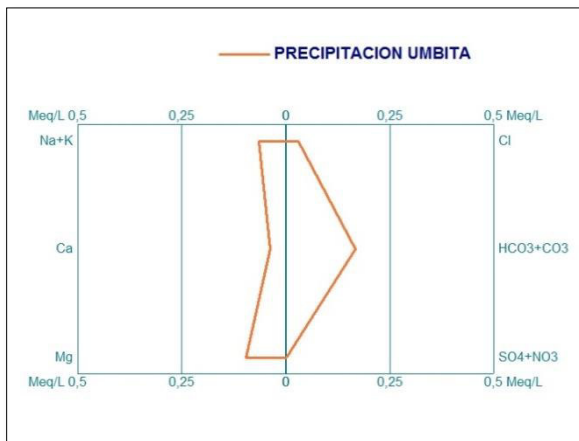
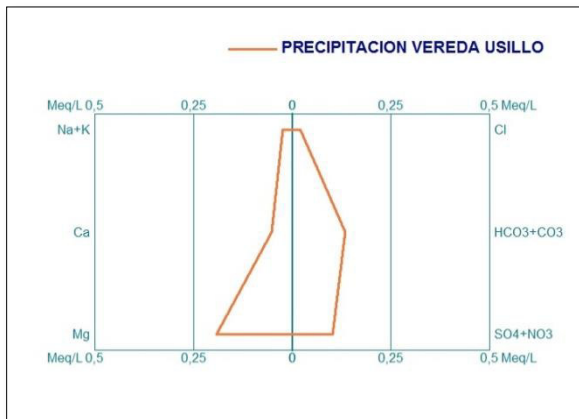
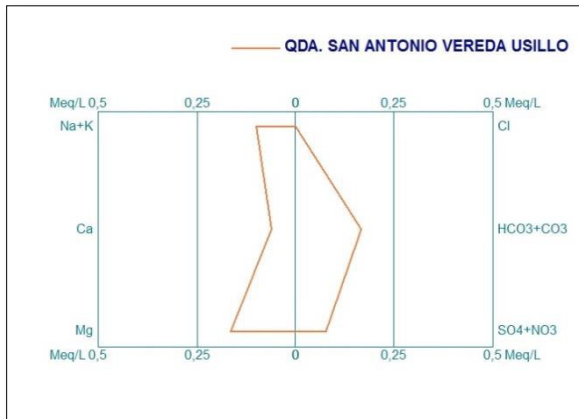
10.3.2 Descripción según diagrama de Stiff.

Para elaborar los diagramas de Stiff se utilizaron los cationes $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{++} y Ca^{++} , y los aniones Cl^- , $\text{SO}_4^- + \text{NO}_3$, $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^-$; con los que se determinó que las muestras de superficie presentan contenidos iónicos menores a 0,25 meq/L. En las tres muestras se evidencia un mayor contenido de HCO_3^- , seguido de SO_4^- a excepción de la muestra del nacimiento de Ñmbita que no presenta contenidos de SO_4^- ; estas muestras tienen una composición iónica similar, con predominancia de catión Mg^{++} y en menores contenidos el Ca^{++} (Ver Gráfico 8).

Con respecto a las muestras de los mantos de carbón, se encontró que las adquiridas en el municipio de Ñmbita vereda juncal predomina el ion SO_4^- , se cree que esto es debido a la oxidación de los sulfuros presentes en los materiales, como la pirita, cuya oxidación constante genera disminución en el valor de ph, el cual para la muestra tomada en la parte alta de la vereda Juncal es de 2,8, sin embargo esta muestra no cumple con los parámetros estándares para ser confiable (Ver Tabla 25 y 27). Otro aspecto a tener en cuenta para explicar el aumento del contenido de este ion, es que este procede del lavado de terrenos formados en ambientes marinos, y el área de estudio se asocia a litofacies de Zona Submareal, en las cuales hay presencia de material carbonoso (Amaya, Mariño, Jaramillo, 2010). La presencia de este anión refleja que el agua subterránea es poco profunda y es una evolución química de las aguas procedentes de manantiales (Stone y otros, 1983).

Grafico 8. Diagramas Stiff

MUESTRAS DE SUPERFICIE



MUESTRAS MANTOS DE CARBÓN

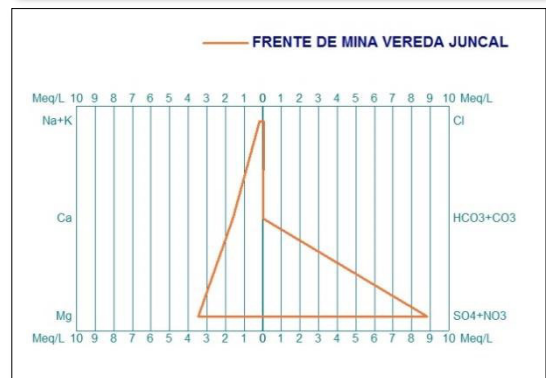
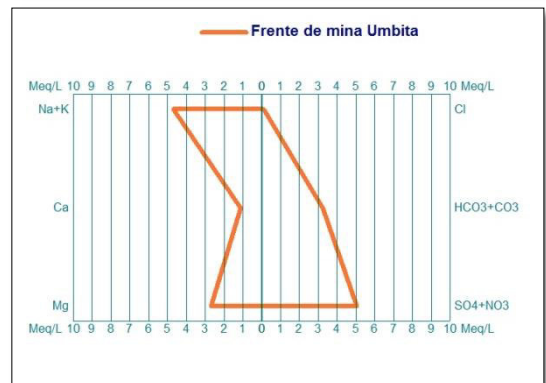
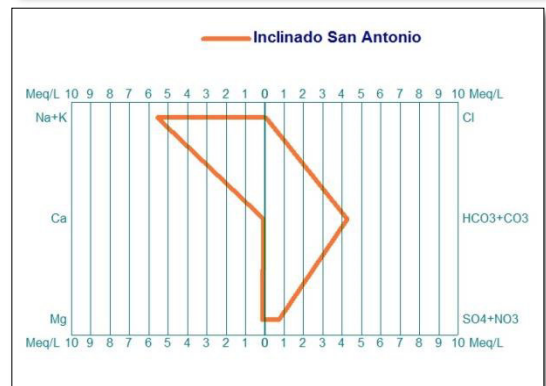
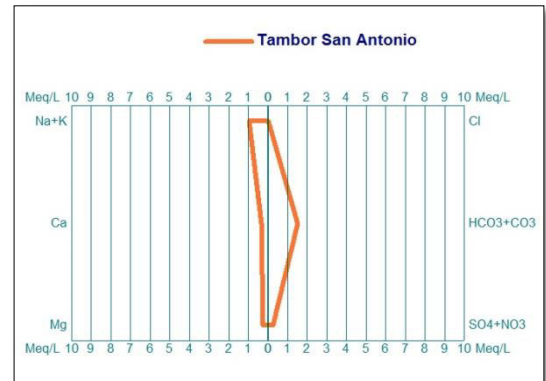
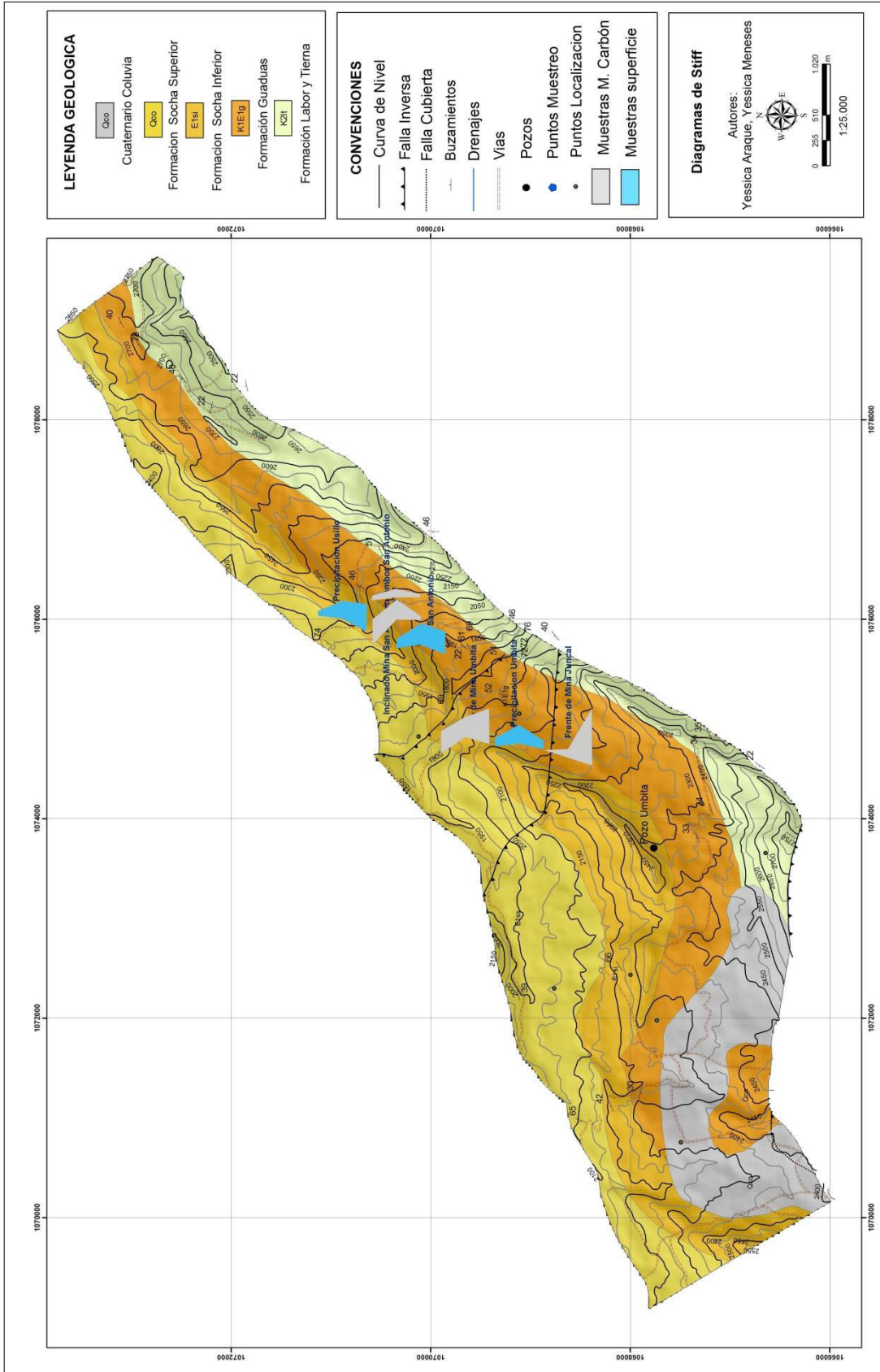


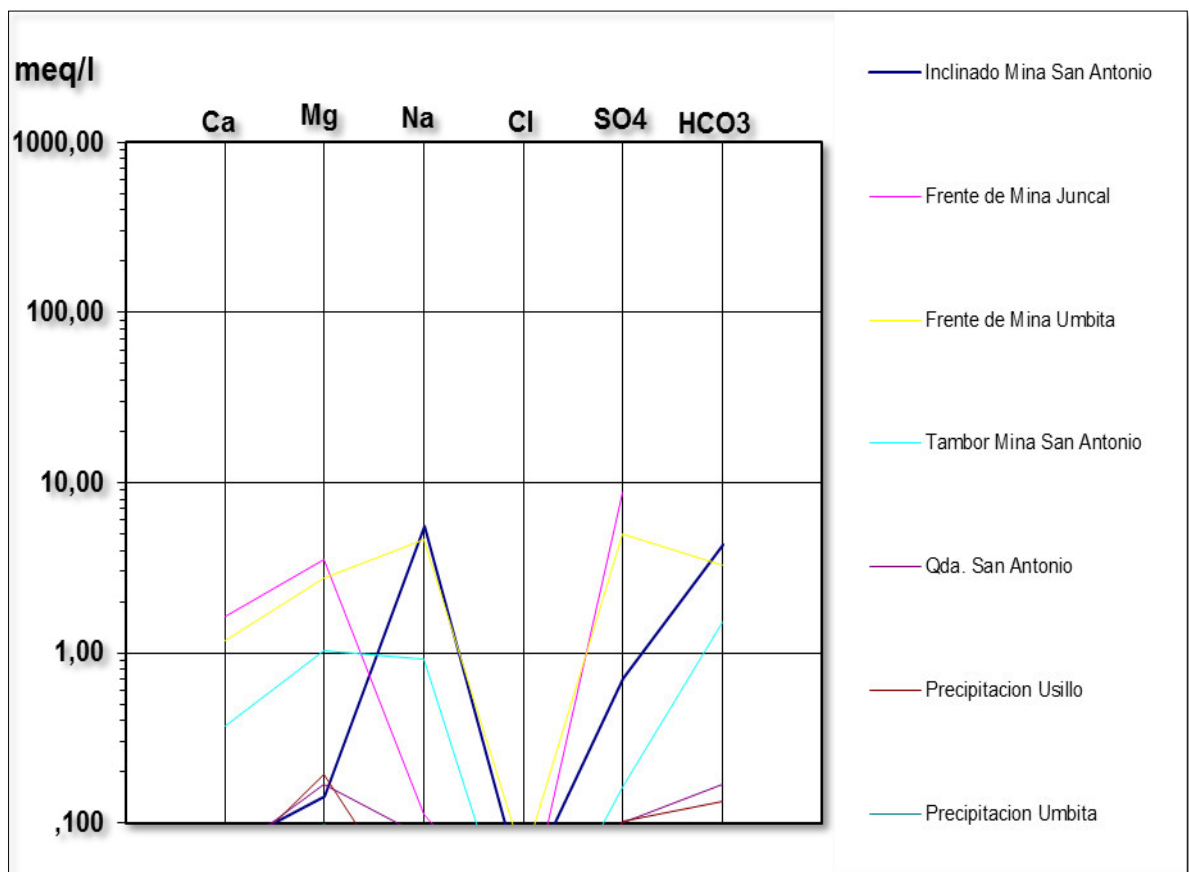
Imagen 30. Polígonos de Stiff



Fuente. Autores

Las muestras tomadas en los mantos de carbón de la mina San Antonio, municipio de Chinavita, presentan composición HCO_3^- ; sin embargo se encontraron diferencias entre las dos muestras; la muestra tomada en el tambor de la mina presenta contenidos de HCO_3^- de 91,8 mg/L mientras que la del inclinado alcanza un valor de 261,12 mg/L; de igual forma se evidencia enriquecimiento significativo en los contenidos de SO_4^- , Na^+ , siendo la diferencia de 26,56 mg/L y 106,66 mg/L respectivamente. Además, la muestra del inclinado presenta disminución en los contenidos de Mg^{++} y Ca^{++} . Con respecto a lo anterior ya que se observa un aumento hacia a profundidad en los contenidos de Na^+ HCO_3^- , tal y como sucede en cuenca de San Juan, Formación Fruitland, se puede mencionar que aguas con estas características evidencian sobrepresión en el área, y según Decker and Horner (1987) los yacimientos de carbón sobrepresionados tienen mejores condiciones y se prefieren como objetivo de exploración, con relación a la producción sostenida de los yacimientos, asimismo agua rica en Bicarbonato en vetas de carbón indica la presencia de agua fresca.

Grafico 9. Diagrama Schöeller Berkaloff



Fuente. Autores

Según el diagrama de Schöeller Berkaloff, (Ver Gráfico 9) las muestras no evidencian una correlación clara y directa entre ellas, sin embargo las aguas de superficie presentan un contenido iónico bajo, con respecto a las de los mantos de carbón.

En las muestras de nacimientos y quebrada prevalece el contenido de HCO_3^- , seguido de Mg^{++} y Ca^{++} . En cuanto a las muestras adquiridas en los mantos de carbón se presenta diferencia en los iones que sobresalen en dichas muestras, ya que en las obtenidas en las minas de la vereda Juncal municipio de Ñmbita se caracterizan por ser predominantemente SO_4 , mientras que las recolectadas en la mina San Antonio de Usillo Municipio de Chinavita se identifican por el anión HCO_3^- . En cuanto a otros componentes iónicos, se determinaron contenidos bajos como el caso del cloro en todas las muestras, presencia de NO_2 y Li, en la muestra tomada en el frente de mina de la parte baja vereda Juncal; contenidos de NH_4 y Zn en la muestra de la parte de alta de la vereda Juncal, y finalmente presencia de Fe y NO_3 en tres muestras (Juncal y Tambor mina San Antonio).

10.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar las comparaciones hidrogeoquímicas de la zona de estudio se tomaron como referencia varios autores que han realizado investigaciones sobre este tema alrededor del mundo.

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 Van Voast, (2003), afirma 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, (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 Ñmbita) 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, de igual forma y con respecto a los valores de CBM encontrados en los pozos Chinavita 1 y Úmbita 1, existe concordancia de acuerdo a los conceptos mencionados por los anteriores autores. Sin embargo, es necesario profundizar en la investigación para que esta hipótesis sea verificada.

Tabla 33. Contenidos iónicos en los sectores Chinavita - Úmbita

ION (mg/L)	CHINAVITA		ÚMBITA	
	Inclinado Mina San Antonio	Tambor Mina San Antonio	Frente de Mina Juncal (Parte Baja)	Frente de Mina Juncal (Parte alta)
Cloruro (Cl ⁻)	1,416	0,471	2,148	0,842
Sulfato (SO ₄)	34,508	7,749	240,447	422,831
Bicarbonato (HCO ₃)	261,12	91,8	197,88	0
Sodio (Na ⁺)	127,709	21,05	106,014	2,605
Magnesio (Mg ⁺⁺)	1,739	12,407	32,993	42,687
Calcio (Ca ⁺⁺)	1,398	7,412	23,54	32,958

Fuente. Autores

En la Tabla 33. Se presentan los contenidos iónicos encontrados en las muestras procedentes de los mantos de carbón, 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 pie³/t. 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 pie³/t. a una profundidad de 189,40 m. Aunque el en el sector suroeste los resultados coinciden con lo propuesto por 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.

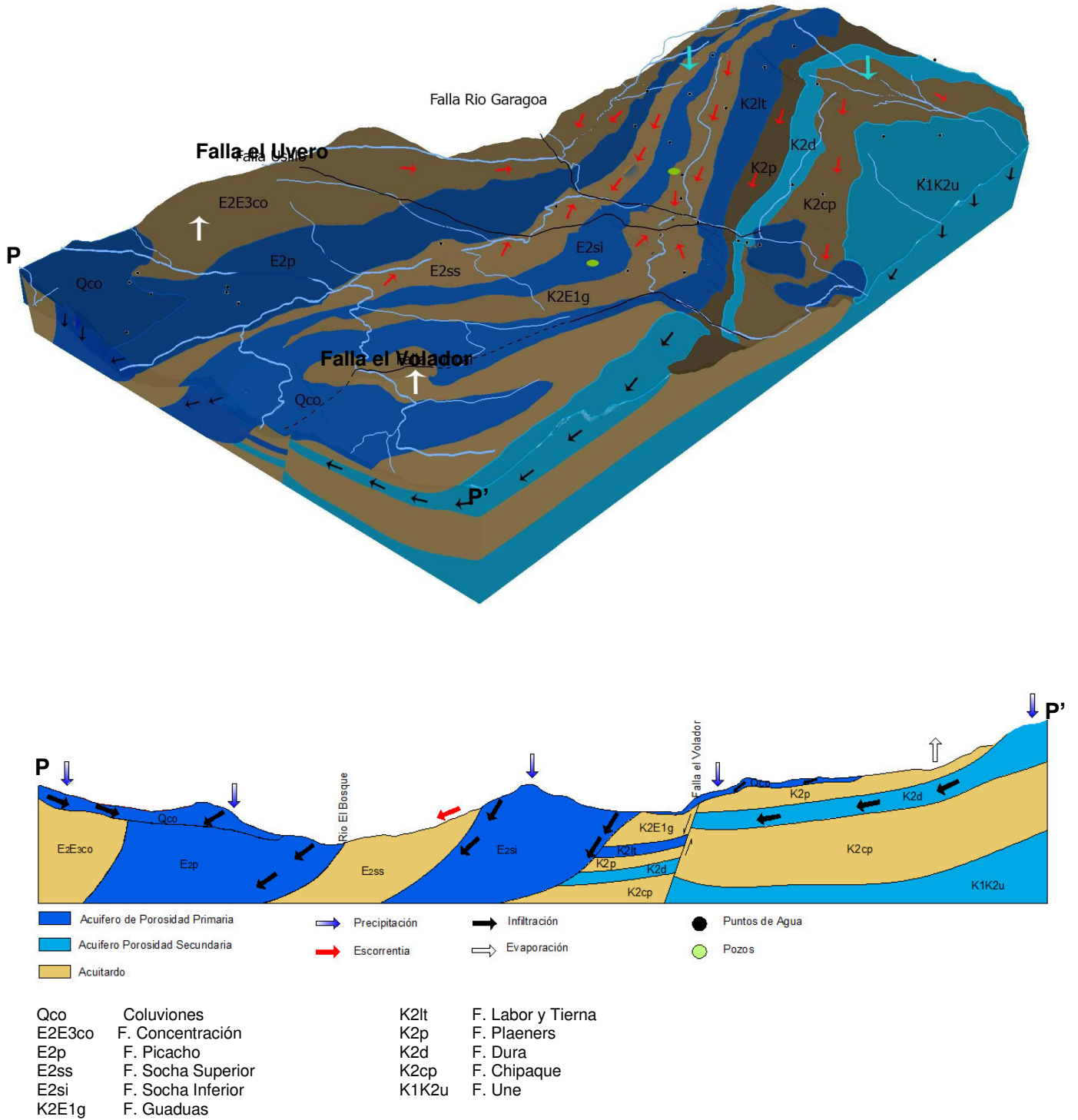
11. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual se elaboró a partir de la integración e incorporación de variables geológicas e hidrogeológicas, su interrelación con los sistemas asociados (ríos, quebradas) y las variables climatológicas. Se identificaron cuatro variables principales, la precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración en interacción directa con el terreno en superficie y profundidad.

En el modelo 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, hacia el SW en el municipio de Umbita 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 Umbita permite que la infiltración se genere en sentido de la inclinación de las capas, y ya que se presentan formaciones con textura Areno arcillosa que tienen una permeabilidad mayor se pueden alimentar los acuíferos de las formaciones Picacho, Socha Inferior, incluso el de la formación Dura.

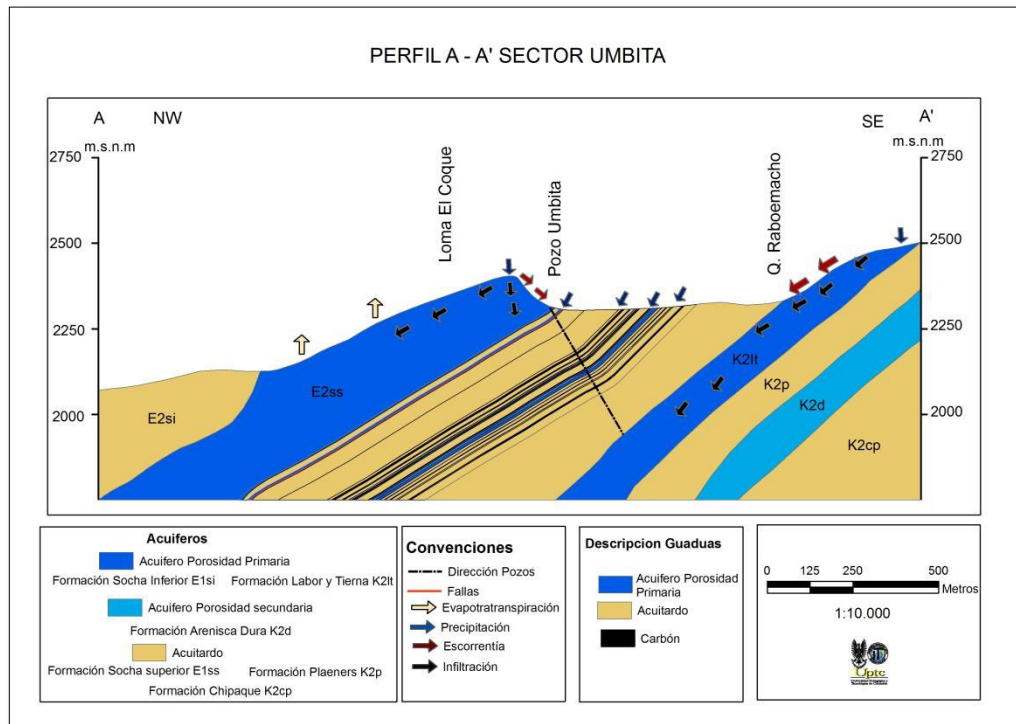
Con el desarrollo de los modelos de la Formación Guaduas mediante perfiles, se puede interpretar cómo el agua puede infiltrarse en la formación Guaduas, sobrepasar sus capas permeables y llegar hasta los mantos de carbón que debido a su alto fracturamiento tienen la capacidad de transportar y acumular grandes cantidades de agua.

Imagen 31. Modelo hidrogeológico conceptual Regional, con perfil.



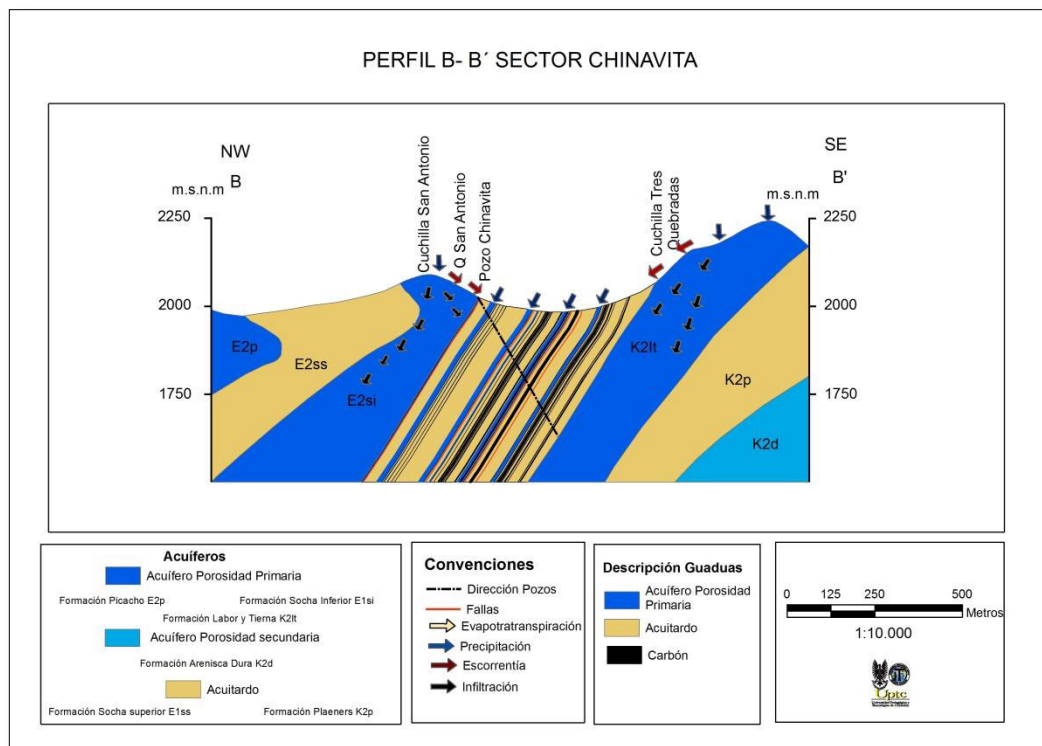
Fuente. Autores

Imagen 32. Modelo conceptual de la dirección de la recarga, sobre mantos de Carbón Sector Úmbita



Fuente. Autores

Imagen 33. Modelo conceptual de la dirección de la recarga, sobre mantos de carbón Sector Chinavita



Fuente. Autores

12. DISCUSIÓN

ANTECEDENTES

La primera producción y utilización de gas metano asociado a mantos de carbón se remonta al año 1900 en Estados Unidos, cuando entro en contacto el carbón con la perforación de un pozo de agua localizado sobre la cuenca de Power River; el gas generado se utilizó con fines domésticos. Las primeras investigaciones de la relación entre las acumulaciones de gas con la hidrogeología se dieron hacia los años 90, en la cuenca de San Juan, Nuevo Mexico. Los estudios piloto se realizaron en Estados Unidos en las cuencas de San Juan, Powder River, Black Warrior, Ratón, Central Appalachian y Uinta – Pineance Park; posteriormente en países como Rusia, Canadá, China y Australia.

En Colombia en cuanto a la acumulación de CBM por factores Hidrogeológicos no existen antecedentes de referencia.

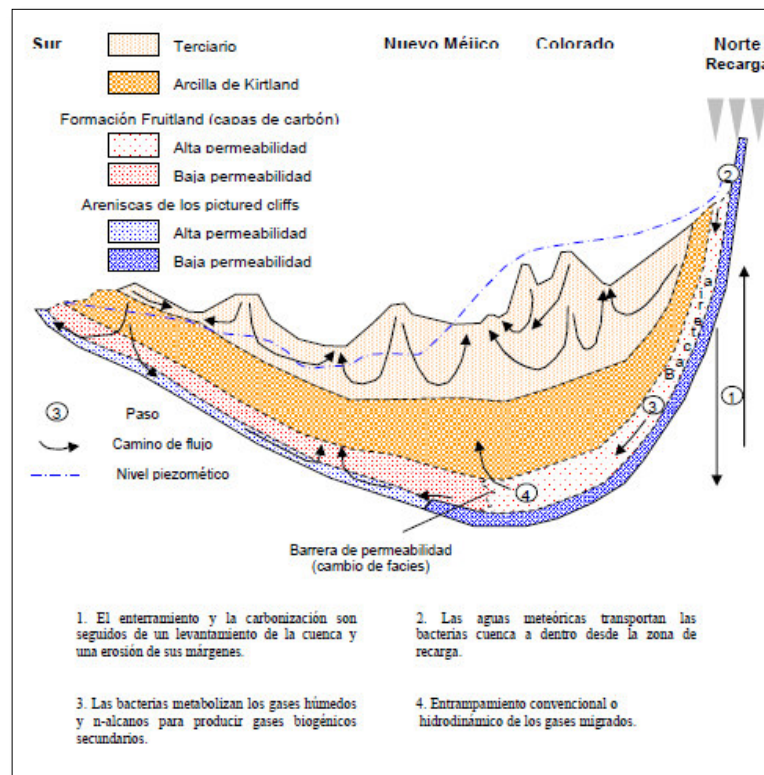
OTRAS CUENCAS DEL MUNDO

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 cuecas como: San Juan (Colorado – Nuevo México), Alberta (Canadá) y Ordos (China) (Kaiser et al. (1992), Bashu S. et al. (2013), Li Y. et al. (2015))

Geológicamente hablando en la cuenca de San Juan se presenta en la base la formación Pictured Cliffs compuesta por dos unidades, la primera presenta secuencia granodecreciente de lodolitas y areniscas intercaladas (Ayers et al, 1994), la unidad superior contiene areniscas bien sorteadas, donde el tamaño del grano incrementa significativamente de la parte media hacia el techo, con estratificación plana y laminar, el buzamiento es preferencialmente al NW. Sobreyaciendo se encuentra la formación Fruitland compuesta por areniscas, limolitas, lodolitas y capas de carbón intercaladas, estas capas presentan espesores entre 4 m y 15m, las cuales son productoras de gas metano. Hacia el techo de la cuenca se encuentra la formación Kirtland constituida por arcillolitas (Ver Figura 6); estructuralmente en esta cuenca se presentan altos buzamientos hacia el oeste de la zona, con inclinaciones similares a las del presente estudio. En el continente Asiático, en la cuenca de Ordos, China, las formaciones productoras de CBM son la Formación Taiyuan constituida en su base por areniscas con intercalaciones de limolitas, sobre las que yacen mantos de carbón

con espesores entre 3m – 10m, en el techo presenta intercalaciones de calizas con limolitas; la Formación Shanxi igualmente produce CBM conformada litológicamente de base a techo por Mantos de carbón con espesores de 3m a 8m, intercalaciones de areniscas y limolitas, estructuralmente estas formaciones se sitúan sobre un monoclinal con orientación NS, limitado hacia el este por la falla Jucaita (Ver Figura 7). En cuanto a la zona de estudio la formación productora de CBM es la formación Guaduas, suprayaciendo e infrayacida por formaciones arenosas (Ver Capítulo 4) Comparando estas zonas se puede observar una similitud debido a las intercalaciones de capas permeables y de baja permeabilidad; en las formaciones Taiyuan y Shanxi en la cuenca de Ordos al igual que en la formación Guaduas se presentan acuíferos sobre las capas de carbón.

Figura 6. Sección de una cuenca con flujos subterráneos y generación de gas Biogénico secundario. Entrampamiento convencional e hidrodinámico.

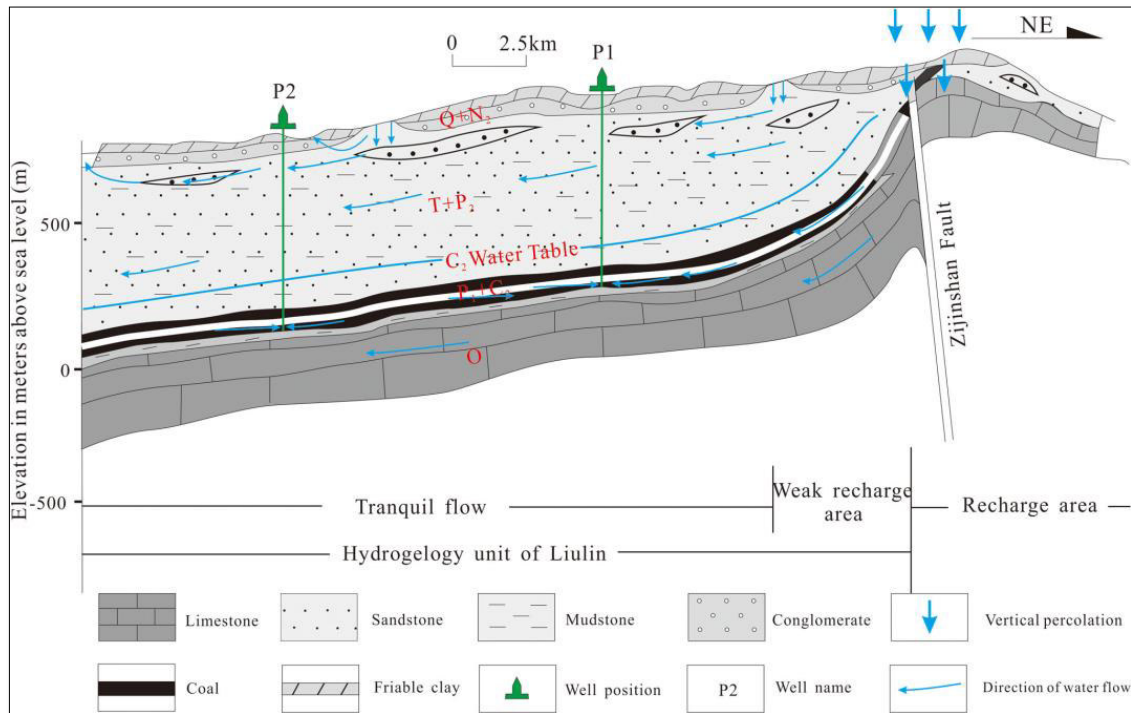


Fuente. Kaiser et al,1991

En relación con la recarga se observa que esta ocurre en las formaciones arenosas que suprayacen a las formaciones generadoras de metano, en estudios realizados en cuencas como San Juan y Alberta se determinó la dirección de la recarga mediante comportamientos hidrodinámicos, realizando pruebas de pozo, niveles piezómetros y utilizando isotopos como trazadores para determinar las áreas de recarga y descarga.

En la zona de estudio no se logró determinar con exactitud la dirección del flujo de las aguas subterráneas debido al sellamiento de los pozos por lo cual no se pudo realizar prueba de pozo, así mismo se intentó trazar el flujo a partir de los datos geoquímicos, pero la cantidad de muestras fueron pocas para determinar las zonas de recarga y descarga.

Figura 7. Sección hidrogeológica de la zona de Liulin, Cuenca Ordos, que muestra la dirección del flujo de aguas subterráneas y la clasificación de zonas de recarga.



Fuente. Li et al,2015

Los rangos de carbón están estrechamente relacionados; en la cuenca de San Juan para determinar el rango del carbón según la clasificación de la ASTM, a partir de los valores de reflectancia a la vitrinita, los carbones se clasifican bituminoso alto en volátiles C, con un valor de R_0 de 0,47; en la cuenca de Alberta, Canadá los carbones en el área son típicamente de rango Sub bituminoso B y C.; en la formación Guaduas se presentan rangos de carbón similares con R_0 entre 0,45 y 0,70; según Rice, (1993) este rango es demasiado bajo para predecir adecuadamente las concentraciones de gas utilizando ecuaciones basadas en la distribución de la madurez de los carbones, porque la generación de gas significativo no se alcanza hasta un grado de alto volátil A Bituminoso a Bituminoso medio volátil, por el contrario la generación de metano Biogénico puede contribuir al potencial de gas en carbones de bajo rango.

En cuanto a la hidrogeoquímica la cuenca San Juan ha sido extensamente estudiada y modelada por Kaiser et al, (1992) Quienes demostraron que las aguas con composición química de tipo Bicarbonatada Sódica son coproducto de aguas subterráneas. En la cuenca Ratón el agua de los mantos de carbón tiene composición Bicarbonatada Sódica y Cloruros, mientras que otros iones comunes en aguas subterráneas como el calcio son casi ausentes (Hemborg, 1998). Concentraciones similares de Bicarbonatos/Cloruros Sódicos se presentan en cuencas como Piceance y Powder River (Daddow, 1986). En este estudio se encontró que el agua muestreada en la mina del sector Chinavita presenta composición Bicarbonatada Sódica lo que podría indicar recarga Hidrogeológica.

En la Tabla 34 se presenta un comparativo entre las cuencas del mundo y el presente trabajo.

Tabla 34. Descripción de características para la acumulación de CBM, en diferentes cuencas del mundo.

CUENCA	LOCALIZACIÓN	FORMACIÓN	EDAD GEOLÓGICA	AMBIENTE DEPOSICIONAL	RANGO DEL CARBÓN	PRODUCCIÓN DE AGUA	FUENTE
Black Warrior	Alabama	Pennsylvania Pottsville	Carbonífero	Marino - Continental	Bituminoso	Bicarbonatada Sodica - Cloruro de Sodio	O'Neil et al. 1989 and Pashin et al. 1990
San Juan	Colorado - Nuevo Mexico	Fruitland	Cretáceo Superior	Continental - Marino Transicional	Sub Bituminoso - Bituminoso	Bicarbonatada Sodica - Cloruro de Sodio	Kaiser et al. 1991
Ratón	Colorado - Nuevo Mexico	Vermejo	Cretáceo Superior	Continental - Marino - Marino Transicional	Bituminoso	Bicarbonatada Sodica - Cloruro de Sodio	Departamento de archivos publicos de Salud y ambiente de Colorado
		Raton	Cretáceo - Paleoceno				
Piceance	Colorado	La Mesa Verde	Cretáceo Superior	Marino Transicional	Sub Bituminoso - Bituminoso	Bicarbonatada Sodica - Cloruro de Sodio	Departamento de archivos publicos de Salud y ambiente de Colorado
Unita	Utah	Ferron Sandstone	Cretáceo Superior	Marino Transicional	Bituminoso	Bicarbonatada Sodica - Cloruro de Sodio	Division de Gas, Aceite y Minería de Utah
Powder River	Wyoming - Montana	Union	Paleoceno	Continental	Sub Bituminoso	Bicarbonatada Sodica	Rice et al. 2000
Alberta	Canada	Scollar	Cretáceo Superior	Transicional Costero - Marino	Sub Bituminoso - Bituminoso	Bicarbonatada Sodica - Cloruro de Sodio	Stefan Bachu et al. 2013
		Horseshoe Canyon					
		Belly River					
Ordos	China	Taiyuan	Carbonífero	Epicontinental	Bituminoso	Bicarbonatada Sodica - Cloruro de Sodio	Yong Li et al. 2015
		Shanxi	Permico	Continental- Marino Transicional			
Cordillera Oriental Úmbita - Rondón	Colombia	Guaduas	Cretaceo - Paleogeno	Continental - Marino Transicional	Sub Bituminoso - Bituminoso	Bicarbonatada Sodica/Magnesica - Sulfatada Sodica	Autores

Fuente. Autores

13. CONCLUSIONES

El flanco este del sinclinal de Ùmbita 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 dicho sinclinal y fallas de tipo inversa y de rumbo, que generan características favorables para la creación de acuíferos por porosidad secundaria como Dura y Une, las características litológicas del área de estudio favorecen para generación de acuíferos de porosidad primaria como los depósitos cuaternarios, las formaciones picacho, Socha Inferior, Labor y Tierna.

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 originados en los mantos de carbón de la formación Guaduas.

En gran parte del flanco este del sinclinal de Ùmbita se presentan características favorables para la acumulación y recarga de agua subterránea por la composición litológica de areniscas de grano medio a grueso de formaciones como Picacho, Socha Inferior, Labor y Tierna y Arenisca Dura.

Según la caracterización hidrometeorológica se determinó que hacia el municipio de Umbita 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 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 entre 1447 y 1083 mm anual.

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 Total de $13'527.988 \text{ m}^3 / \text{año}$, en las zonas de recarga que obedecen a las partes altas de la zona $1'826.497 \text{ m}^3 / \text{año}$ y en los acuíferos $5'057.588 \text{ m}^3 / \text{año}$.

Al realizar los análisis Hidrogeoquímicos, se determinó por medio de diagramas de Piper que las aguas superficiales corresponden a el tipo Mg – HCO₃, mientras las presentes en los frentes de mina son de tipo Na - HCO₃, Mg - HCO₃, Mg - SO₄, Na - SO₄.

Según los diagramas de Stiff se observan comportamientos similares en los contenidos iónicos de las muestras de superficie, teniendo valores inferiores a 0,25 meq/L, a diferencia de las aguas presentes en los mantos de carbón, las cuales muestran contenidos iónicos diferentes entre sí. 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 general las muestras presentan Ph ácido, teniendo valores entre 5,35 – 5,75. A excepción de las muestras tomadas en los inclinados de las minas San Antonio y Juncal (Parte Baja) los cuales arrojan valores en un intervalo de 6,85 – 7,32.

En el pozo de Chinavita se presentaron los mayores contenidos de CBM tomados en el altiplano Cundiboyacense, siendo alrededor de 300 pies³/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 presencia de fallas locales; así mismo se encuentra una mayor coincidencia en cuanto a la Hidrogeoquímica, teniendo las cuatro muestras tomadas altos contenidos de HCO_3 .

Relacionando con los estudios que se han realizado a nivel mundial se puede concluir que las grandes cuencas productoras de CBM en general presentan similitudes en cuanto a condiciones, hidrogeológicas, hidrogeoquímicas. En cuanto a la zona de estudio se requiere estudios detallados sobre condiciones como presión, origen del gas y flujo de la recarga; así como condiciones de formación de la cuenca y por ende generación del gas metano.

14. RECOMEDACIONES

Debido a que en la zona no se presentan estaciones meteorológicas de tipo climatológico se requiere posteriores correcciones para los valores de evapotranspiración, de igual forma muestrear aguas tomadas directamente de la precipitación para análisis químico.

Realizar construcción de pozos y monitoreo con piezómetros que permitan conocer el comportamiento y características de los acuíferos, así mismo desarrollar una red de muestreo amplia en la formación Guaduas, que permita caracterizar el agua presente en cada uno de los mantos, y a su vez obtener las direcciones de flujo entre dichos mantos. Para obtener un modelo Hidrodinámico regional y local de la zona.

Analizar el sistema de diaclasas en los carbones para determinar la dirección predominante de las fracturas endógenas y exógenas para lograr describir el mecanismo de permeabilidad, su influencia en la recarga y en la migración del gas.

Complementar estudios sobre historia de enterramiento en la cuenca, debido a que es un indicador potencial de la generación de gas y define entre otros factores la permeabilidad del carbón.

Emplear isotopos como trazadores con el fin de determinar el flujo del agua en la zona, a su vez emplear esta técnica en los gases a fin de conocer el origen del gas, para saber si parte de las acumulaciones del gas se relacionan con la recarga.

BIBLIOGRAFIA

Ayers W. B. Kaiser W.R. Coalbed methane in the Upper Cretaceous Fruitland Formation, San Juan Basin, New Mexico and Colorado. New Mexico Bureau of mines and mineral resources. 1994.

Daddow, P. B., 1986, Potentiometric-surface map of the WyodakAnderson coal bed, Powder River structural basin.

Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000, Bogotá D. C. Agosto de 2013
INGEOMINAS, Programas De Exploración de Aguas Subterráneas, Bogotá DC. Diciembre de 2004.

Fragoso Amaya A. R. Estudio Comparativo del comportamiento de producción de un yacimiento de gas asociado a manto de carbón bajo diferentes configuraciones de pozo. Bucaramanga, 2011.

Freeze, R. A., and J. A. Cherry, 1979, Groundwater: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 604 p.

Giuliano A. M. Blarasin M. Cabrera E. Hidrogeoquímica del agua superficial y subterránea en el sistema Barranquita – Knutzen Córdoba, Argentina.

Hemborg, H. T., 1998, Spanish Peak field, Las Animas County, Colorado: geologic setting and early development of a coalbed methane reservoir in the central Raton basin: Colorado Geological Survey Resource Series 33, 34 p.

Holditch S. Andersen M. Gillis G. Teel M. Rottenberg R. Brown M. Singer J. Schlumberger. Oilfield Review Coalbed Methane, 2003 – 2004.

INGEOMINAS, Estándares de Presentación Cartográfica Versión 1.1, Escalas 1:25.000, 1:10.000, 1:5.000 y 1:2.000. Ingeominas Subdirección de Información Geológica Minera, Julio 2004.

Instituto Geológico y Minero de España, ETSI Minas UPM Departamento de Ingeniería Geológica. Estudio de metano en capas de Carbón CBM, estado del arte y posibilidades de las cuencas de la zona Norte León. Madrid, España Diciembre 2004.

Investigaciones hidrogeológicas en Santa Fe de Bogotá D. C. Informe Técnico Interno, 1999

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

Kaiser, W. R., D. S. Hamilton, A. R. Scott, R. Tyler, and R. J. Finley, 1994, Geological and hydrological controls on the producibility of coalbed methane: Journal of the Geological Society, v. 151

Kaiser, W. R. Swartz T. E. and Hawking G. J. 1991, Hydrology of the Fruitland Formation, San Juan basin, in Geologic and hydrologic controls on the occurrence and productivity of coalbed methane, Fruitland Formation, San Juan basin: Gas Research Institute Topical Report GRI-91/0072, p. 195– 241.

Lillo J. Técnicas Hidrogeoquímicas, Hidrogeología y Gestión de recursos hídricos.

Li Y. Dazhen T. Hao X. Derek E. and Yanjun M. Geological and hydrological controls on water coproduced with coalbed methane in Liulin, eastern Ordos basin, China. AAPG Bulletin, v. 99, Febrero 2015.

Mariño J. Contrato interadministrativo - proyecto de investigación suscrito entre la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y el servicio geológico colombiano (SGC), 2014

Mariño J. Mojica L. Aspectos metodológicos de los Yacimientos de CBM, Gas asociado al Carbón, Geología, contenido, Reservas, minería y posibilidades en Colombia, Editorial UPTC, 2015

Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial - MAVDT. Propuesta metodológica para la modelación hidrogeológica conceptual y presentación de mapas, Año 2010

Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos, Anexo A, glosario de unidades y subunidades geomorfológicas.

Rice, D.D., Composition and origins of coalbed gas, in B. e. Law and D. D. Rice, Hydrocarbons from coal AAPG Bulletin, v. 65, 1993.

Rodríguez E. Ballesteros E. Bettin M. Ángel C. Componente Hidrológico. Universidad Nacional de Colombia, Corpochivor, Corpoboyaca.

Rionda R. A. El gas asociado a los yacimientos de carbón mineral (GAC). Pachuca de Soto, Hidalgo, noviembre de 2010.

Servicio Geológico Colombiano, SGC. Exploración Gas metano asociado al carbón, área Ñmbita Rondón. Recursos Energéticos. Bogotá, Diciembre 2014.

Terraza R. Moreno G. Buitrago J. Pérez A. Montoya D. Geología de la Plancha 210 Guateque. Bogotá D.C. 2010.

Van Voast, W. A., and R. B. Hedges, 1980, Hydrology of the area of Westmoreland Resources, tract 3 coal reserves near Sarpy Creek, southeastern Montana (appendix): Montana Bureau of Mines and Geology Open-File Report 54, 50 p.

Wayne A. Van Voast. Hydrogeologic Aspects of Coal-Bed Methane Occurrence, Powder River Basin 1991, AAPG Bulletin, Vol. 75, No. 6 (June)

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