

FORMULACIÓN DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO CESAR

FASE DE DIAGNÓSTICO

Convenio Interadministrativo No. 19-7-0007-0-2017



Grupo de
Investigación
en Agua y
Saneamiento

JULIO DE 2018

FASE DE DIAGNÓSTICO

EQUIPO DE TRABAJO

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN AGUA Y SANEAMIENTO – GIAS UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

DIEGO PAREDES CUERVO
Director General del Proyecto
Dr. en Ingeniería

JOHANA GRAJALES
Administradora Ambiental
M.Sc en Ciencias Hídricas e Ingeniería

JOSÉ ALEXANDER SÁNCHEZ
Geólogo

JUAN CARLOS SIERRA
Administrador Ambiental
M.Sc en Sistemas de Información Geográfica

LEIDY JHOANA AGUDELO
Ingeniera Agrícola

DERLY ZULETA
Administradora Ambiental

JAIME ANDRÉS MONSALVE
Administrador Ambiental
M.Sc en Administración Ambiental y de Recursos

JULIANA FLÓREZ VALOIS
Comunicadora Social

CORPOCESAR

JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ
Profesional Especializado
Supervisor del convenio

CONTENIDO

FASE DE DIAGNÓSTICO	6
1. LOCALIZACIÓN	6
2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	8
2.1 EVALUACIÓN GEOLÓGICA.....	9
2.1.1 Recopilación y análisis de información secundaria	9
2.1.1.1 Cartografía y estudios	31
2.1.1.2 Sensores Remotos.....	36
2.1.2 Geología General	38
2.1.3 Geología Estructural.....	44
2.1.3.1 Fallas.....	44
2.1.3.2 Pliegues	46
2.1.4 Levantamiento de Columnas Estratigráficas	49
2.1.5 Análisis de Testigos de Perforaciones.....	50
2.1.6 Geomorfología.....	51
2.1.6.1 Unidad Geomorfológica Uno -UG1- (Llanuras Aluviales y Depósitos Recientes)	54
2.1.6.2 Unidad Geomorfológica Dos -UG2- (Colinas Bajas o Intermedias Estructurales Denudativas)	56
2.1.6.3 Unidad Geomorfológica Tres -UG3- (Colinas Altas o Montañas Estructurales Denudativas)..	57
2.1.6.4 Unidad Geomorfológica Cuatro -UG4- (Antrópicas).....	58
2.1.7 Suelos.....	59
2.1.8 Usos del Suelo	60
2.1.9 Hidrogeología Regional.....	62
2.1.9.1 Provincias Hidrogeológicas para el Departamento del Cesar	64
2.1.9.2 Sistemas de Acuíferos en el Departamento del Cesar.....	65
2.1.9.3 Sub-Sistemas Sugeridos para el sistema acuífero Cesar (INGEOMINAS, 1995).....	69
2.2 EVALUACIÓN GEOFÍSICA.....	71
2.2.1 Compilación y Análisis de Información	71
2.2.2 Prospección y exploración geofísica	76
2.2.2.1 Métodos Geoeléctricos	87
2.2.2.2 Método Magnetométrico	95
2.2.2.3 Método Electromagnético.....	96
2.2.2.4 Método Gravimétrico	96
2.2.2.5 Métodos Sísmicos	96
2.3 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA (PAS).....	97
2.3.1 Distribución de PAS por municipio	98
2.3.2 Tipos de PAS en el sistema acuífero Cesar.....	99
2.3.3 Concesiones de agua subterránea en el sistema acuífero Cesar	100
2.3.4 Estado actual de los PAS.....	101
2.3.5 Propiedades organolépticas de los PAS	102

2.3.6 Usos de los PAS.....	102
2.3.6.1 Uso pecuario	103
2.3.6.2 Uso agrícola.....	104
2.3.6.3 Uso industrial y servicios.....	105
2.3.7 Condiciones sanitarias y de seguridad de los PAS	106
2.3.8 Mapas de pH, temperatura y conductividad	107
2.3.9 Inventario de PAS del municipio de Valledupar.....	111
2.3.10 Inventario de PAS del municipio de La Paz.....	111
2.3.11 Inventario de PAS del municipio de San Diego.....	112
2.3.12 Inventario de PAS del municipio de Agustín Codazzi.....	112
2.3.13 Inventario de PAS del municipio de Chiriguaná	113
2.3.14 Inventario de PAS del municipio de Curumaní.....	114
2.3.15 Inventario de PAS del municipio de El Paso	114
2.3.16 Inventario de PAS del municipio de Bosconia	115
2.3.17 Inventario de PAS del municipio de La Jagua de Ibiríco	115
2.3.18 Inventario de PAS del municipio de Becerril.....	116
2.4 DETERMINACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO	117
2.4.1. Análisis de la información.....	117
2.4.2 Red de flujo	147
2.5 ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	159
2.5.1 Balance hídrico.....	159
2.5.2 Análisis de información.....	159
2.5.3 Diagramas de Cajas	165
2.5.4 Precipitación media	167
2.5.5 Precipitación en ocurrencia fenómeno Niño y Niña.....	170
2.5.6 Evapotranspiración media	171
2.5.7 Evapotranspiración potencial respecto al uso del suelo.....	174
2.5.8 Retención (S).....	176
2.5.9 Escorrentía (E)	177
2.5.10 Cambio de humedad en el suelo.....	179
2.5.11 Recarga potencial por precipitación	180
2.5.12 Revisión de expresiones empíricas para estimar la recarga	183
2.5.13 Conclusiones del análisis hidrológico.....	184
2.6 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	185
2.6.1 Desarrollo metodológico.....	186
2.6.2 Caracterización hidrogeoquímica del acuífero	191
2.6.3 Determinación de la calidad del agua subterránea	194
2.7.4 Conclusiones de las condiciones geoquímicas y de la calidad del agua en el sistema acuífero Cesar.....	212
2.7.5 Recomendaciones.....	213
2.7 ISÓTOPOS AMBIENTALES	214
2.8 HIDRÁULICA DE POZOS	214
2.8.1 Recopilación y análisis de información de trámites de concesión	215
2.8.2 Caudal constante.....	220

2.8.3 Análisis de la recopilación de información de pruebas de bombeo caudal constante	235
2.8.4 Caudal escalonado.....	240
2.8.5 Pruebas tipo <i>Slug Test</i>	241
2.8.6 Conclusiones de las características hidráulicas del acuífero.....	243
2.9 REDES DE MONITOREO	244
2.9.1 Objetivos de una red de monitoreo.....	244
2.9.2 Clasificación de los sistemas de monitoreo.....	244
2.9.3 Diseño de la red de monitoreo.....	245
2.9.4 Red de monitoreo para el sistema acuífero Cesar	247
2.10 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	251
2.10.1 Modelo geológico-geofísico.....	251
2.10.1.1 Geofísica	252
2.10.1.2 Unidades hidrogeológicas	262
2.10.2 Hidrología	265
2.10.3 Hidráulica e hidrodinámica	266
2.10.4 Hidrogeoquímica	267
2.10.5 Red de flujo	267
2.10.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	267
3. ASPECTOS DE ESPECIAL IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA	271
3.1 ZONAS DE RECARGA ASOCIADAS AL SISTEMA ACUÍFERO CESAR	271
3.2 ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	274
3.3 VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN	276
3.3.1 <i>Inventario de fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas.</i>	278
3.3.2 Perímetros de protección de captaciones	291
3.3.3 Zonas con interferencia de pozos.....	292
4. DIAGNÓSTICO PARTICIPATIVO	293
4.1 EJECUCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE PARTICIPACIÓN Y COMUNICACIÓN DURANTE LA FASE DE DIAGNÓSTICO ..	294
4.1.1 Actividad 1. Entrevistas.	294
4.1.2 Actividad 2. Talleres	299
4.1.2.1 Estructura del Taller Institucional	300
4.2.1.2 Estructura del taller dirigido a actores comunitarios.....	302
4.2.1.3 Evaluación de los talleres.....	306
5. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICAS SOBRE EL ACUÍFERO	309
5.1 CONFLICTOS POR EL USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	309
5.2 RIESGOS DE CONTAMINACIÓN Y AGOTAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	309
6. BIBLIOGRAFÍA	311

FASE DE DIAGNÓSTICO

La Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (MADS, 2014) define la fase de diagnóstico como la caracterización del sistema acuífero y de las condiciones socioculturales de la población asociada al acuífero objeto de estudio, con el fin de elaborar o actualizar la línea base de oferta y demanda de agua subterránea, identificar los conflictos y problemáticas por uso de este recurso hídrico, analizar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación e identificar las fuentes potenciales de contaminación, entre otros aspectos.

1. LOCALIZACIÓN

El departamento del Cesar se encuentra localizado en el extremo norte de Colombia y abarca una extensión de 22213 Km², de los cuales 13828 Km² se encuentran definidos en la zona plana del valle del Río Cesar y 8385 Km² constituyen las áreas montañosas del departamento (Serranía del Perijá al Oriente y Sierra Nevada de Santa Marta al noroccidente). El departamento, tiene un clima tropical con variaciones de altura desde los “0” hasta los 5000 m.s.n.m. y precipitaciones que oscilan entre los 1000 y los 3000 mm anuales.

El departamento se encuentra dividido en seis regiones naturales de gran importancia: La Sierra Nevada de Santa Marta, localizada hacia la parte noroeste del departamento; la Serranía del Perijá, la cual recorre toda la margen oriental del departamento y limita a Colombia con Venezuela; el Complejo Cenagoso de Zapatosa, el cual se encuentra localizada en el centro del departamento; el Valle del Río Cesar, localizado en la parte central del departamento; el Valle del Río Ariguaní y el Valle superior del Magdalena, localizado hacia la parte sur del departamento (Figura 1).

La cuenca del Río Cesar tiene una extensión de 18.485 Km², incluyendo todas sus áreas de drenaje en los departamentos del Cesar, Guajira y Magdalena, y es drenada de Norte a Sur por las microcuencas de los Ríos Cesar, Badillo, Seco, Guatapurí, Pereira, Mocho, Cesarito, Tocaimo, Margiriamo, Fernambuco, Guarupal, Ariguaní, Casacará, Tucuy-Sororia, Calenturitas, San Antonio, Maracas, Perete, y que en conjunto conforman la gran cuenca del Río Cesar, el cual actúa como recurso integrador físico que canaliza las aguas de todas estas cuencas (CORPOCESAR y la Universidad del Atlántico, 2014).

El departamento del Cesar se encuentra dividido en tres sistemas de acuíferos (sistema acuífero Cesar, Sistema Acuífero Simití y Sistema Acuífero Banco Mompós) según la clasificación establecida por el IDEAM (2013, 2014). El sistema acuífero Cesar fue priorizado como fase previa a la formulación del plan de manejo ambiental y acogiendo los criterios establecidos en el decreto 1076 de 2015. El acuífero, pertenece a la provincia hidrogeológica Cesar-Ranchería PC4 y tiene una extensión de 8593 km². El sistema acuífero Cesar abarca los municipios de Valledupar, Manaure, La Paz, San Diego, Agustín Codazzi, Bucaramanga, La Jagua de Ibirico, Chiriquaná, Curumaní, El Paso y Bosconia y geográficamente corresponde al valle o planicie del Río Cesar por lo que está conformado por depósitos aluviales del Río Cesar y por secuencias detriticas del Paleógeno-Neógeno. Los usos de este sistema de acuífero están representados principalmente por el consumo doméstico, agropecuario y la explotación del carbón a cielo abierto por la mediana y gran minería.

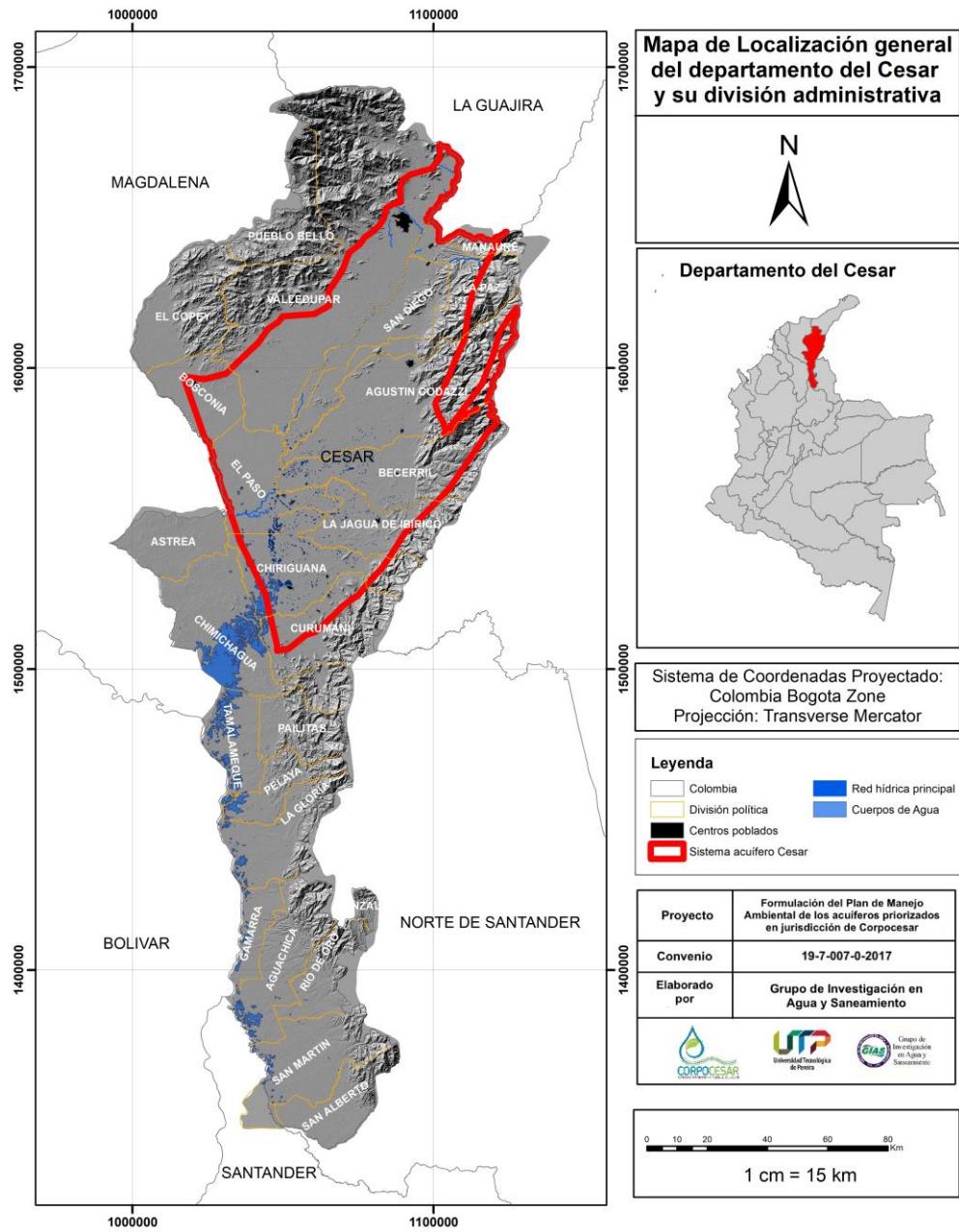


Figura 1. Localización y división política administrativa del Departamento del Cesar, en el cual se incluye el sistema acuífero Cesar.

2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico planteado para el sistema acuífero Cesar se basa en un modelo genérico, debido a que se carece de datos continuos que permitan plantear modelos interpretativos o de predicción, que ayuden a estimar el comportamiento del flujo o la dinámica del sistema, sabiendo que los acuíferos son sistemas dinámicos y su variación es permanente en el tiempo; por lo tanto, el modelo hidrogeológico conceptual genérico presentado fue construido con la información secundaria obtenida a través de diferentes fuentes como son la Corporación Autónoma Regional del Cesar -CORPOCESAR-, Servicio Geológico Colombiano -SGC- antes INGEOMINAS, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM, Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-, Agencia Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-, Agencia Nacional de Minería -ANM, Universidades y la información consultada en revistas especializadas, entre otros.

La información consultada permitió definir de manera general tres (3) unidades hidroestratigráficas, la primera (A1) conformada por los sedimentos cuaternarios que rellenan la cuenca sedimentaria del Cesar, definidos como Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla), Depósitos de Cono o Abanico Aluvial (Qcal) y Depósitos de Terrazas Aluviales (Qt o Qta); la primera unidad se encuentra discordantemente sobre las rocas terciarias presentes en la cuenca del Río Cesar. La segunda unidad (A2) se encuentra conformada de manera general por rocas terciarias que a su vez están conformadas por las Sedimentitas de Arjona (Tpaa), Formación Cuesta (N1c), Formación Cuervos (Ec2) y Formación Barco (Eb1) cuya litología está definida por la presencia de paquetes interestratificados de areniscas de grano medio a fino, conglomerados interdigitados con areniscas, arcillolitas intercalada con areniscas, intercalaciones de areniscas con shales carbonosos y cintas de carbón, depositados en ambientes correspondientes a deltas transicionales y lagunares; por último, se presentan las rocas cretácicas y pre-cretácicas aflorantes principalmente en la Serranía del Perijá y a la base de la Sierra Nevada de Santa Marta, como son Formación Guatapurí (TRg-Tg), Formación La Quinta (Jqv), Grupo Cogollo (K1c), Formación La Luna (K2l) y Formación Molino (K2m) principalmente (INGEOMINAS, 1995). Estas litologías constituyen las geoformas dominantes de la zona, que son clasificadas como geoformas de origen aluvial, relacionadas a los valles de los principales ríos de la zona; geoformas de origen denudativo y relieve montañoso.

Así mismo, los datos obtenidos mediante la prospección geofísica realizada y la inventariada en la cuenca del Río Cesar permitió definir un modelo geoeléctrico de diez (10) capas siendo las primeras seis (6) las de mayor resolución en la zona, conformada por la unidad denominada Llanura Aluvial (Qlla) con resistividades en el rango de los 0.1 Ohm-m hasta los 5493.6 Ohm-m, y espesores entre superficiales y los 142 m, la unidad aluviales recientes (Qal) con resistividades entre los 28 Ohm-m a 1219 Ohm-m y espesores entre los 9 m y los 13 m aproximadamente, la unidad denominada Abanicos o Conos Aluviales (Qcal) con resistividades entre los 26 Ohm-m hasta 671 Ohm-m, espesores entre 0,3 m hasta 101.6 m y finalmente la unidad denominada terrazas (Qt) con resistividades de 41 Ohm-m a 156 Ohm-m, y profundidades desde superficiales hasta 16.36 m. Las formaciones terciarias en general presentan resistividades entre los 3 Ohm-m (arcillolitas, limolitas saturadas) hasta los 12855 Ohm-m (conglomerado) y espesores centimétricos (0.345m) hasta los 2281 m. Por último, las formaciones cretácicas y pre- cretácicas con valores de resistividad entre los 1 Ohm-m hasta los 4724 Ohm-m, con profundidades desde los 4 m hasta 2321 m, posible acucierre.

Las unidades saturadas (salobres, duras y dulces) distribuidas desde la capa 1 hasta la 6 (en menor proporción) presentan resistividades desde los 3 Ohm-m (arenas saturadas) hasta los 830 Ohm-m (areniscas saturadas con agua salobre), profundidades entre los 1.2 m hasta 252 m, y espesores entre 3.3 m y 193 m.

2.1 EVALUACIÓN GEOLÓGICA

2.1.1 Recopilación y análisis de información secundaria

La revisión y análisis de la información secundaria para la temática, se llevó a cabo de acuerdo a los lineamientos de la Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (MADS, 2014). La información revisada incluyó *cartografía básica y temática, estudios, informes técnicos, diagnósticos, estadísticas, evaluaciones hidrogeológicas o estudios específicos en los temas físico, social, económico y cultural realizados con anterioridad en la zona.*

La evaluación geológica es la herramienta fundamental para los estudios hidrogeológicos ya que mediante la cartografía permite identificar las rocas, los sedimentos y las estructuras geológicas aflorantes que favorecen la circulación y almacenamiento de las aguas subterráneas, así como la determinación de su continuidad espacial y espesor (MADS, 2014); estudios previos realizados en el área de influencia, específicamente sobre aguas subterráneas, son también importantes debido a que nos permiten conocer su comportamiento, las zonas de recarga o descarga y su asociación litológica. Algunos de estos estudios se citan a en este documento.

Las fuentes de información utilizada para la elaboración de este documento fueron obtenidas principalmente de las compañías mineras (Drummond, PRODECO y CNR), CORPOCESAR, IDEAM, IGAC, Servicio Geológico Colombiano -SGC-, Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-, Universidades y revistas científicas nacionales principalmente.

Se cuentan con estudios cartográficos, hidrogeológicos, entre otros, a diversas escalas, de los cuales se resaltan los siguientes:

Etayo-Serna (1983) define diversos terrenos geológicos en Colombia de los cuales se destacan el Terreno Perijá conformado por metamorfitas (pelitas, cuarcitas y meta-arcosas), magmatitas (intrusivos hipoabisales calco-alcalinos) y sedimentitas (secuencias grano decrecientes de conglomerados a lutitas arenosas calcáreas, secuencias clásicas, secuencias clásticas a volcanoclásticas, conglomerados, vulcanitas riolíticas jurásicas y diques basálticos alcalinos); limitado al Norte por la Falla de Oca, al Este por el Sistema de fallas Perijá-El Tigre, al Sur por la Falla Arena Blanca-Ariguaisa y al Oeste por la falla del Cerrejón. El Terreno Sierra Nevada de Santa Marta se encuentra conformado por metamorfitas (granulitas, migmatitas, neises félsicos y máficos, anfibolitas, piroxenitas, anortositas, asociadas al Precámbrico), Magmatitas (plutonitas félsicas, intermedias a básicas, y plutonita cuarzodiorítica del Terciario inferior), Volcanitas y Sedimentitas (pelitas, ruditas y calizas paleozoicas, pelitas y tobas Triásicas, y localmente cobertura péltica y calcárea del Cretácico superior); limitada por las fallas de Oca al Norte, de Santa Marta al Oeste y del Cesar al Este.

Mestre et al., 1990 llevan a cabo la exploración, geotecnia y control de calidad en la mina La Victoria, en La Jagua de Ibiríco. Allí mencionan que en la Formación Barco y los Cuervos, esta última con 13 mantos de carbón que varían entre los 0.65 m a los 6.0 m de potencia, son afectadas por un sistema de fallas NE y NW denominadas falla Santa Cruz y Arena Blanca, estructura que pone en contacto las rocas de la Formación Barco con la Formación La Luna de edad Cretácica. En la Mina La Victoria la Formación Los Cuervos presenta un espesor de 212 m siendo 30 m asociados a los mantos de carbón, los cuales hacen parte del Sinclinal de La Jagua; además, determinaron que se presentan dos direcciones preferenciales de diaclasamiento con tendencia NW en el flanco oriental y la otra al NE en el flanco occidental del pliegue. Presentan levantamiento geológico a escala 1:25.000; por último, concluyen que el nivel freático se presenta cercano al nivel de explotación actual, siendo considerado como un factor determinante en la estabilidad de los taludes y en la inundación de los mantos.

Ujueta y Llinás (1990) realizan el reconocimiento geológico (fotogeológico y de campo) de la parte más septentrional de la Serranía del Perijá hacia el departamento de la Guajira, describiendo rocas tales como esquistos grafitosos, filitas y cuarcitas del Cambro-Ordovícico, rocas Jurásicas y Devoniano-Carbonianas y hacia el borde occidental y hacia el oriente de la sierra se presentan rocas del Terciario inferior y rocas del Cretáceo. Estructuralmente presenta patrones de fracturamiento agrupadas en direcciones preferenciales N35°E (Fallas de Sevilla, Tucurinca, Corual, Carrizal, Tierra Nueva y Ranchería hacia la Sierra Nevada de Santa Marta; y las Fallas de Perijá, de El Tigre y Cuiba, y el sinclinal de Manuelote, Falla Cerrejón, Yaya, Las Minas, Monte Lía y La Colonia, estas hacia la Serranía del Perijá), NNO-SSE (Falla de Santa Marta), E-O (Falla de Oca y Cuisa, y las Fallas Buritaca, Maromal y Las Vueltas en la Sierra Nevada de Santa Marta; hacia la Serranía del Perijá se presentan la Falla La Palma, Surimena, Juan Simón, Marimondas, Marquezoté y Marquezotico) y NO-SE (Fallas Masterban, Capuchino, El Molino y Villanueva).

INGEOMINAS (1995) y Corpocesar mediante convenio interadministrativo ejecutan el proyecto denominado “Evaluación del Agua Subterránea en el Departamento del Cesar”, en el cual sintetizan la geología levantada a escala 1:25.000 del departamento del Cesar en un mapa (planchas) a escala 1:100.000 y una mapa final a escala 1:250.000; indican además, que las unidades aflorantes son rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con edades que varían desde Pre-cámbrico hasta el reciente (Holoceno), cartografía que permitió definir que unidades geológicas, de acuerdo a su litología y estructura, eran las más aptas almacenar aguas subterráneas. Es de resaltar que los valores de resistividad obtenidos en dicho estudio se agruparon en bajos (1-9 Ohm-m, arcillas, shales o arenas y gravas con agua salobre); intermedios en tres categorías de 9-15 Ohm-m (limos o arenas con agua poco dulce), entre 15-30 Ohm-m (arenas finas a gruesas con agua dulce) y entre 30-100 Ohm-m (Gravas y arenas gruesas con agua dulce); y por último en altos correspondientes a valores mayores de 100 ohm-m (calizas, limolitas, volcanitas, conglomerados, cuerpos ígneos y metamorfítas).

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC- (1997) realiza el estudio general de suelos para el departamento del Cesar, presentando la información gráfica como apoyo al ordenamiento territorial a escala 1:250.000 y otros mapas de apoyo para dicho estudio a escala 1:500.000. En este informe presentan una síntesis de la geología y describen las unidades geomorfológicas presentes en el departamento, como también la clasificación climática de acuerdo con Guhi; además, describen las unidades ecológicas presentes en el Cesar, entre otros.

INGEOMINAS (1999a y 2003a) presenta la memoria explicativa del mapa generalizado del departamento del Cesar a escala 1:250.000, mencionando que las rocas presentes en dicho departamento se encuentran distribuidas estratigráficamente en cincuenta y una (51) unidades geológicas de origen ígneo, metamórfico y sedimentario con edades desde el precámbrico hasta el reciente; además, mencionan que estructuralmente se presentan dos (2) sistemas de fallas principales caracterizadas por altos ángulos de inclinación y marcados desplazamientos laterales, con desarrollo de pliegues poco tectonizados.

INGEOMINAS (1999b) presentan el informe del mapa de regiones-zonas y subzonas de carbón en Colombia, donde indican que gran parte de los carbones presentes en el país corresponden a los ubicados entre el Cretáceo superior y el Terciario inferior, contenidos en las formaciones Guaduas, Catatumbo, Cuervos, Carbonera y la Formación Cerrejón, formaciones localizadas en parte de la Cordillera Occidental y en alrededores de la Sierra Nevada de Santa Marta. Incluyen al departamento del Cesar en la Región Atlántica y en ella se ubica en la Zona Guajira-Cesar, conformada por las subzonas El Cerrejón, La Jagua de Ibirico y La Loma.

INGEOMINAS (2002-2003c) presentan el Atlas de Aguas subterráneas de Colombia (Version 2.0), Mapa del Estado del Recurso de la Plancha 5-04 a escala 1:500.000 y la Memoria técnica del citado mapa, mencionando que el sistema acuífero Cesar presenta dos (2) zonas de alta explotación (al SE de Valledupar y entre el Río Sicarare y al Norte de Agustín Codazzi), la primera con pozos de explotación en una densidad de 0.87 pozo/Km², con profundidades entre los 50 m y los 160 m y caudales de explotación entre los 12 l/s a 41 l/s, y la segunda zona captando el acuífero La Luna (Formación Cretácica), donde se encuentra localizados 45 pozos con una densidad de 0.4 pozos/Km², profundidades que oscilan entre los 70 m y los 180 m, y caudales entre los 10 l/s y 60 l/s. De manera general en las unidades hidrogeológicas consideradas clasifican los acuíferos cuaternarios en someros y profundos, de los cuales se resaltan los siguientes: 1) **Acuífero Cesar**, conformado por gruesas intercalaciones de arenas y gravas con cantos de rocas ígneas y volcánicas, contiene aguas generalmente bajo condiciones semiconfinadas, pero las frecuentes intercalaciones arcillosas crean localmente condiciones confinantes, es explotado por cerca de 320 aljibes con profundidades de 3.0 a 10 m con rendimientos desde 0.1 hasta 5.0 l/s y por alrededor de 30 pozos con profundidades que varían desde 60 hasta 300 m., con niveles estáticos "...entre 4.0 a 8.0 m., produciendo caudales desde 5.0 hasta 120 l/s. La transmisividad del acuífero es variable con valores generalmente menores a 300 m²/día, con excepción del suroriente de Valledupar y la parte central del Río Cesar donde el acuífero alcanza su mayor espesor y la transmisividad llega a tener valores de 1300 m²/día. El coeficiente de almacenamiento es del orden de 1.0 E⁻⁰³ y las capacidades específicas muy altas, mayores de 5 l/s/m..." . 2) **Acuífero Ariguani**, consiste de intercalaciones de arenas medias a gruesas, gravas, limos y arcillas, el acuífero se encuentra bajo condiciones de confinamiento, por ser de tipo multicapa, y es captado "...por cerca de 28 pozos que tienen profundidades entre 80 y 160 m con niveles estáticos que oscilan desde 4.5 hasta 10 m y caudales que varían de 1.5 a 25 l/s. Junto al Río Ariguani en cercanías de la población de Bosconia se construyó un pozo de 160 m de profundidad, captando arenas finas entre los 60 y los 90 m y gravas desde los 140 hasta los 160 m, con un nivel estático de 1.5 m que produjo un caudal de 60 l/s, una capacidad específica mayor de 5.0 l/s/m, con valores de transmisividad para el acuífero de 1200 m²/día, conductividad hidráulica de 10 m/día y coeficiente de almacenamiento 1.0 E⁻⁰⁴. El flujo subterráneo es de carácter local, siendo recargado, principalmente por el río Ariguani". En lo referente a los acuíferos y unidades confinantes terciarias mencionan al **Acuífero Cuesta**, que según los pozos exploratorios para petróleo El Paso-1, El Paso-2 y El Paso-3, de techo a base se encuentran los sedimentos del acuífero del cuaternario y la Formacion Los Cuervos de

carácter impermeable, este acuífero está conformado por areniscas cuarzosas de grano medio intercaladas con clonglomerados y arcillolitas limosas; el pozo "...El Paso-3, presenta de techo a base, hasta los 600 m de profundidad, rocas Terciarias saturadas con agua dulce, de 600 a 1700 m, rocas Terciarias con agua salobre a salada y de 1700 m hacia abajo, rocas Cretácicas con agua salada y salmueras". Los acuíferos y unidades confinantes del cretáceo son: 1) **Acuífero La Luna**, conformado por las formaciones La Luna y Aguas Blancas, con litologías calcáreas como calizas, calizas arenosas, limolitas calcáreas, con presencia de aguas salobres y saladas; este acuífero está catalogado "...desde baja hasta muy alta, con valores desde 0.05 hasta mayores de 5 l/s/m. Las producciones de los pozos con profundidades entre 150 y 300 m fluctúan entre 10 y 100 l/s. Entre las localidades de Codazzi y Becerril el espesor de este acuífero oscila entre 80 y 200 m. En esta región es captado por cerca de 60 pozos con profundidades de 60 a 180 m, los cuales presentan rendimientos entre 10 y 60 l/s". 2) **Acuífero Cogollo**, conformado por alternacia de lutitas negras carbonosas, limolitas, arcillolitas y calizas negras bituminosas intercalada con lentes de chert y areniscas calacareas; la transmisividad varía entre 30 m³/día hasta los 200 m³/día y conductividades hidráulicas desde 0.5 a 20 m/día. Como regiones acuíferas con buenas posibilidades de explotación mencionan las siguientes: 1) Acuífero Cesar, 2) Acuífero Arquaní, 3) Acuífero Cuesta, 4) Acuífero La Luna. El sistema acuífero Cesar es considerado dentro de las zonas acuíferas con explotación intensiva. En lo referente a la prospección geofísica realizada mencionan que el sistema acuífero Cesar cuenta con 90 SEVs, con profundidades hasta la última capa de 70 a 350 m, en donde a los 30 m aparecen resistividades entre los 5 Ohm-m y 100 Ohm-m (correlacionables con arcillas, arenas y gravas), a los 30 m arrojaron valores entre los 3 Ohm-m y 150 Ohm-m (intercalaciones de arenas, gravas y limos hacia Valledupar, y areniscas y arcillolitas en Agustín Codazzi), a los 100 m valores bajos en Valledupar, intermedios al norte del acuífero y altos al sur; entre los 150 y 200 m presenta resistividades predominantemente altas asociadas al basamento ígneo-metamórfico. Entre otros aspectos cabe destacar el análisis de la vulnerabilidad del sistema acuífero Cesar por el método GOD, donde concluyen que el acuífero somero es indexado con el valor de 1 (parámetro "G"); litológicamente los valores asignados en las poblaciones de San Diego y el sur de Agustín Codazzi fue de 0.7 y de 0.5 (parámetro "O"); finalmente la profundidad del nivel es variable, variando desde superficial en el centro del valle hasta los 15° en el pie de monte oriental asignadole por lo tanto un valor de 0.7 a 1 (parámetro "D"), sugiriendo que gran parte del acuífero presenta alta vulnerabilidad, extrema en los alrededores de Valledupar.

CORPOCESAR e IDEAM (2006) mediante convenio 132-2003, realizan el inventario de 1118 puntos de agua (311 pozos, 779 aljibes, 22 manantiales y 6 aljibes-pozo, equivalentes en área por puntos entre 1.21 a 1.61 km²) y una campaña geoeléctrica en la cual efectúan 50 sondeos eléctricos verticales SEV, oscilando las aberturas de los electrodos (AB/2) entre 80 y 301 m, sondeos que se mencionan a continuación: 1) Once (11) SEV's en el municipio Agustín Codazzi localizados principalmente sobre sedimentos cuaternarios (Qlla o Qcal) y en profundidad correlacionables con rocas del terciario y cretáceo (formaciones Barco, Molino, La Luna o Grupo Cogollo, considerados como basamento geoeléctrico); 2) Cuatro (4) SEV's en el municipio de Becerril ubicados sobre sedimentos cuaternarios pertenecientes a los Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla), con información a profundidad de unidades geológicas del cretáceo que incluyen la formación Molino y La Luna (Basamento geoeléctrico); 3) Diez (10) SEV's en el municipio de El Paso ubicados sobre sedimentos cuaternarios pertenecientes a los Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla) y definiendo un basamento resistivo conformado por unidades geológicas del cretáceo que incluyen la formación Sedimentitas de Arjona y la formación Cuesta; 4) Nueve (9) SEV's en el municipio de Astrea ubicados sobre sedimentos cuaternarios pertenecientes a los Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla) o Aluvial reciente (Qal), con unidades resistivas a profundidad correlacionables con la Formación Sedimentitas de Arjona (Tpaa), que conforman de acuerdo a

la profundidad el basamento geoeléctrico; 5) Tres (3) SEV's en el municipio de Chimichagua sobre sedimentos cuaternarios pertenecientes a los Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla) o Fluvio-lacustres (Qfl) y unidades geológicas del terciario correlacionadas con la Formación Sedimentitas de Arjona (Tpaa) como basamento resistivo; 6) Siete (7) SEV's en el municipio de Chiriguáná sobre sedimentos cuaternarios pertenecientes a los Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla), además de ubicar el basamento resistivo correlacionable con unidades geológicas del terciario como la Formación Sedimentitas de Arjona (Tpaa) o del cretáceo Formación Río negro (Kir); 7) Cuatro (4) SEV's en el municipio de La Jagua de Ibirico en sedimentos cuaternarios pertenecientes a los Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla) y de Terraza Aluvial (Qt), arrojando resistividades correlacionables con unidades geológicas del terciario correlacionadas con la Formación Barco (Tpb), Formación Cuesta (Tmc) o del cretáceo Formación Molino (Ksm) interpretadas como basamento resistivo. Concluyen además, que existen unidades roca-sedimento que forman acuíferos de poca a gran importancia hidrogeológica para el desarrollo social y económico del Departamento del Cesar. Los sistemas acuíferos de gran importancia hidrogeológica corresponden unidades geológicas con porosidad primaria o intergranular, correspondientes a los Depósitos Cuaternarios de Llanura Aluvial (Qlla), y a unidades geológicas del Terciario correspondientes a la Formación Cuesta (Tmc), y la Formación Sedimentitas de Arjona (Tpaa) y la Formación la Quinta Sedimentaria (Jqs).

Olarte y Polo (2005) llevan a cabo la delimitación de las zonas de protección para las aguas subterráneas en las cuencas de los ríos Marigaimo y Fernambuco, en el municipio de Codazzi (Cesar), concluyendo que la precipitación anual, para la zona, tiene un valor menor que la evapotranspiración potencial presentándose por lo tanto déficit en la infiltración anual de 253.16 mm. La recarga potencial (mes de mayo y septiembre-noviembre, octubre la de mayor infiltración y de mayor precipitación en la cuenca) mensual en la cuenca del Río Marigaimo es del orden 209.37 mm/año representando el 14.60% de la precipitación total anual. Además, los 33 aljibes (caudales entre 0.01 a 6.70 l/s, siendo 2.5 l/s el más común) inventariados en Codazzi captan el agua de la primera capa acuífera del Cono Aluvial de Codazzi (Qcal) y de la Llanura Aluvial (Qlla), presentando una dirección NE a W hacia la zona plana del valle aluvial de Codazzi en dirección del Río Cesar, y la recarga es correspondiente al contacto entre la Formación La Quinta y el ápice del cono aluvial de Codazzi, presentando gradientes hidráulicos entre 1.22×10^{-4} hacia la Serranía del Perijá y 3×10^{-5} a 4.5×10^{-5} hacia la llanura aluvial, y valores de Conductividad Eléctrica en el 17.6 % de las captaciones muestradas arrojaron valores mayores a los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

GEOESTUDIOS LTDA. e INGEOMINAS (2006) mediante contrato No. 084-2005, llevan a cabo la cartografía geológica de la cuenca del Río Cesar-Ranchería con fines petroleros, toda vez que se enfocan en las rocas del cretáceo presentes en la Serranía del Perijá, donde afloran las Formaciones Río Negro (porosidad muy baja a buena porosidad en la parte media de la unidad, potencial importante como roca reservorio), rocas generadoras como La Luna y Formación Aguas Blancas (Miembro Animas y Maraca, reservorio fracturado), Formación Lagunita (reservorio fracturado) y Los Cuervos (interesante como roca almacenadora).

Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH et al., 2006 según contrato 081-2005, realizan el estudio geoquímico de superficie de las cuencas Cesar-Ranchería y Sinú-San Jacinto. El estudio incluye el análisis cromatográfico de gases del suelo a 900 muestras con el fin de determinar el origen de los hidrocarburos presentes en el área definida, utilizando análisis isotópicos de carbono del metano (análisis cromatográfico por el método de acidificación). Los resultados obtenidos, para el área de Perijá, señalan la presencia de los siguientes gases: metano, etano, propano, acetileno, isobutano, butano, isopentano, pentano y hexano,

estando los resultados dentro de rangos normales, predominado las concentraciones, lecturas mayores de metano y etano, que la de los otros gases; los investigadores concluyen que varios de los grupos de anomalías se encuentran asociadas a las rocas cretácicas aflorantes, generadoras de hidrocarburos en Colombia, sugiriendo altas concentraciones de materia orgánica, asociada a posiblemente a hidrocarburo líquido con cantidades menores de condensado y gas. Una de las anomalías con mejor expresión se encuentra hacia el oriente de la población de Codazzi (anomalías U y V).

CORPOCESAR e IDEAM (2006) en la descripción del modelo hidrogeológico para el acuífero presente en el municipio de Bosconia, definen para éste los siguientes grupos que conforman los acuíferos de la zona: 1) Grupo de sedimentos y rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa grande a muy pequeña, 2) Grupo de rocas fracturadas y porosas con importancia hidrogeológica relativa grande a pequeña y 3) Grupo de sedimentos y rocas porosas o fracturadas con muy poca importancia hidrogeológica, conformando acuíferos libres, confinados de tipo multicapa a semiconfinados, de importancia principalmente intermedia a baja para aquellos desarrollados en zonas de alto fracturamiento, presentando direcciones de flujo dominante Norte-Sur y flujos locales con tendencias bimodales. Además, describen las unidades geológicas de la zona, efectúan el inventario de pozos, aljibes (captan el primer nivel de agua o tabla de agua en la unidad cuaternaria) y manantiales y realizan los mapas correspondientes a los análisis de calidad de aguas.

Documentos técnicos de tipo minero-ambiental, son presentados por los titulares mineros a la autoridad ambiental, con el fin de obtener la viabilidad ambiental para la explotación (EIA-PMA, entre el 2006, 2007, 2008, 2010 y 2014) en el área de influencia del acuífero priorizado, donde describen de manera general la geología, hidrogeología, geomorfología y el plan de minado a implementar en los títulos mineros, de los cuales se citan los siguientes: Solicitud No. 0184-20 mina de Caliza La Pringamoza, Solicitud No. 0190-20 mina de caliza Los Corazones, Titulo Minero No. 0210-20 Cantera Piedras y Mármoles del Cesar, Concesión minera No. 15956-1 Cantera de caliza La Primavera, Autorización Temporal No. JKL-08251, Solicitud Minera No. 0363-20 cantera de caliza Minera Los Santos (Municipio de Bosconia); Solicitud de Legalización No.0147-20 de la Empresa HIFO S.A para material de arrastre, Solicitud Minera No. 0154-20 para explotación en el río La Mula, Solicitud Minera No. 0155-20 para explotación de material de arrastre sobre el río Anime (Municipio de Chiriguaná); Solicitud de Legalización Minera No. 0229-20 para caliza denominada Cantera La Marina, Contrato de Concesión Minera No. JGB-10231 para la explotación de materiales de arrastre en el Río Animito, Contrato de Concesión Minero No. IFQ-09091, Contrato de Concesión Minera No 0256-20 para la explotación de Hierro y Caliza, Contrato Único de Concesión KBN-11451 para explotación de materia aluvial, Concesión Minera No. 0191-20 para la explotación de materiales aluviales (Municipio de Curumaní); Solicitud de Legalización No. 0234-20 para materiales de arrastre, Solicitud de Legalización de Minería de Hecho No. 0235-20 para materiales de arrastre del Río San Antonio (Municipio de La Jagua de Ibirico); Contrato de Concesión Minera No. IG4-10421 para explotación de arcilla (Municipio de La Paz); Solicitud de Legalización de Minería de Hecho No.0177-20 para la explotación de arcillas, Contrato de Concesión No. LL7-11251 para materiales de arrastre (Municipio de San Diego); Solicitud de Legalización de Minería de Hecho No. 0151-20 para la extracción de material de arrastre a nombre de la “Cooperativa de Trabajo Asociado de Explotadores de Material de Arrastre del Río Guatapurí COOPEXMA” (mencionan la realización de dos sondeos eléctricos verticales, no obstante en el documento no se evidencia información de los mismos), Título Minero No 0189-20 para la explotación de caliza en la Cantera propiedad de ADEMOLER, Solicitud de Legalización de Minería de Hecho No.0175-20 para la explotación de arcillas, Título Minero No. 0188-20 propiedad de la Cantera de Caliza La Sombra, Solicitud de legalización de minería de hecho No. 0189-20 para la exploración y

explotación de Calizas, Solicitud de Legalización de Minería de Hecho No. 0196-20 a nombre de la “ASOCIACIÓN DE PALEROS DEL CORREGIMIENTO DE GUACOCHE”, Solicitud de Legalización minera No. 0197-20 para la extracción de arcilla, Solicitud de legalización No. 0251-20 para el aprovechamiento de materiales de arrastre, Contrato de Concesión No. IGC-15471 para la explotación de arcilla denominada Ladrillera Montañita, Contrato de Concesión No. FK9-121 para la explotación de una cantera, Título Minero No. 0305-20 otorgado para la explotación de barita, Solicitud de legalización Minera No. 0151-1-20 para caliza, Contrato Único de Concesión No. IJA-08001X para el aprovechamiento de Barita, Contrato de Concesión Minera No. 0349-20 y No. 0350-20 para explotación de caliza, Contrato de Concesión No. 167-1-20 para la exploración – explotación de un yacimiento de material de construcción Balastro y Recebo, Solicitud de legalización No. 0364-20 para la explotación de Recebo y Arena, materiales de construcción en la cantera ubicada en la finca el Blandón, Solicitud de legalización No. 0338-20, Contrato de Concesión No. KE5-16521 y No. KDG-09591 para el aprovechamiento de arcilla, Contrato de Concesión No. HI1-8001X para la extracción de Barita, Solicitud de legalización No. 0164-20 para explotación de arcillas, Solicitud de legalización No. 0157-20 para el aprovechamiento de materiales de construcción, Contrato de Concesión No. 0301-20 Mina de Barita La Guadaña, Contrato de Concesión No. 0167-4-20 para explotación de material conglomerado para construcción y el Contrato de Concesión LFL-08071 para explotación de materiales de construcción (Municipio de Valledupar). Es de resaltar que todos los títulos mineros citados contemplan explotaciones a cielo abierto, lo cual podría generar impacto sobre el sistema acuífero Cesar.

Boada y Chavarro (2006) en el estudio denominado *Evaluación Hidrogeológica y ambiental del potencial del agua subterránea en la cabecera y área de influencia rural en Bosconia-Cesar*, mencionan que este municipio cuenta con minas de mármol localizadas en las veredas Alto de Minas, El Edén, y La Fortuna, en las fincas Durania, la Unión, la Esmeralda, Estrella Roja, la Pringamosa, la Palestina y la Fortuna. Sugieren además, que la asociación de suelos presente en la zona es asociación Margaritas (MTa) incluyendo Los Venados, son moderadamente bien drenados, conformando relieves planos y ligeros encaramamientos en época de lluvia, limitados por arcillas muy finas, generalmente saturados de agua y suelos secos en épocas de sequía y duros generando agrietamientos amplios y profundos; esta asociación se presenta normalmente en la parte media y cabeza de los abanicos. La geología de la zona está conformada por la Formación Volcánico Rirolítico (JKvr), Guatapurí (TRg), Grupo Cogollo (K1c), Espilitas (Trs) y Llanura Aluvial (Qlla). Realizan además el inventario de 109 puntos de agua (17 pozos, 88 aljibes, 3 aljibes-pozo y 1 manantial), los cuales se encuentran localizados principalmente en la llanura aluvial (Qlla) que corresponde con la primera capa acuífera de la zona, con caudales estimados entre los 0.3 a 3.6 l/s; niveles estáticos medidos en aljibes presentan rangos entre 0.62 a 27.91 m, de los cuales el 55.6% se encuentran entre 0 a 10 m, el 22.7% entre 10 a 20 m, el 9.09% de los aljibes presentan nivel estático mayor a 20 m y 4 aljibes de los 88 inventariados fue posible tomar el nivel dinámico, el cual se encuentra entre los 6.73 a 19.55 m. Así mismo, en estos aljibes se midió el nivel de recuperación, que registra un valor entre 0.01 m a 5.54 m.

Los valores en niveles estáticos para los pozos se encuentran entre 1.17 y 11.32 m y los caudales de bombeo de 60 a 100 l/s. Es de resaltar la existencia de un pozo saltante (artesiano) en la Finca Ipanema (caudales entre 1.03 l/s sin bombeo y 2 l/s bombeado) sugiriendo presiones mayores a la atmosférica en dicho punto. Plantean además para el sistema acuífero llanura aluvial (Qlla) las siguientes características hidrogeológicas: Conductividad hidráulica de 20 m/d, transmisividad 300 m²/día, espesor de la zona saturada de 15 m y porosidad efectiva de 19%, donde los aljibes presentan capacidades de bombeo de 0.282 l/s, pozos con conductividades de 1 a 10m/día y direcciones de flujo hacia el SW, aportando a los ríos Ariguaní, Cesar y a

las ciénagas en épocas de sequía, con importancia hidrogeológica intermedia, con una oferta de agua subterránea de "...12.050.475 m³/anuales a 61.79 mm/anuales...", y una demanda estimada por punto de agua de 7.87 m³/día lo que equivale a 2.872.55 m³/año por punto de agua inventariado.

PRODECO (2006-2007) presenta la actualización al Estudio de Impacto Ambiental para la mina Calenturitas, en el cual se encuentra el plan minero para las anualidades desde el 2006 hasta el 2010, los quinquenios 2010-2015 al 2025; el manejo de drenajes, desviación del arroyo Caimancito (para la última etapa del sector A donde se ubicara zona de botadero) y del caño Bautista (realización tramo línea férrea hacia la mina Calenturitas); y el plan de cierre para el año 2019 acorde con el tiempo otorgado para la concesión No. 044/89 adjudicada por la Agencia Nacional de Minera, mencionando que deben ser tenidos en cuenta tres consideraciones: 1) Continuidad (explotación hasta agotar el recurso), 2) Entrega a tercero y 3) Cierre. Indican además que en el modelo hidrogeológico se realizó la extrapolación de la información debido a que las unidades geológicas presentes en la zona minera son las mismas, considerando para el modelamiento flujos continuos sin intervención antrópica (operaciones mineras). En cuanto a la clasificación de suelos consideran la presencia de las siguientes asociaciones: 1) Asociación La Loma (LM, con usos del suelo Clase IV), 2) Tocuy (TU, con usos del suelo Clase II), 3) Sabanales (SA, con usos del suelo Clase IV), 4) Arroyohondo (AO, con usos del suelo Clase III), 5) Río Cesar (RC, con usos del suelo Clase III) y Asociación Boquerón (BO). En lo referente a Hidrogeología, mencionan que en la zona se encuentran presentes el acuífero libre cuaternario (espesor aproximado de 25 m, resistividades de 10 Ohm-m a 20 Ohm-m y nivel estático de 5 m) y el Acuífero Cuestas (espesores entre 150 hasta 400 m, resistividades entre los 15 y los 300 Ohm-m, niveles estáticos, en los alrededores de La Loma, entre los 3.5 y 10.5 m de profundidad, transmisividades de 80 a 600 m²/día y conductividades hidráulicas de 3.5 a 25 m/día (INGEOMINAS, 1995).

El Servicio Geológico Colombiano -SGC- (2007) presenta como parte del atlas geológico de Colombia 2007, la geología de las planchas 5-04 y 5-06 a escala 1:500.000 en los cuales se incluyen la parte norte y sur del departamento del Cesar.

La Agencia Nacional de Hidrocarburos (2007) según convenio 027-2007, presenta informe sobre la respectividad de la cuenca Cesar-Ranchería, en el cual se hace referencia a los pozos perforados entre 1947 y 1954 (primera campaña) y entre 1979 y 1988 por ECOPETROL-Phillips, en dicha zona se mencionan a continuación: 1) perforación pozo El Paso-1 (profundidad final 892.4544 m), atravesó el Plioceno, Formación San Antonio (Mioceno) y Formación La Quinta (Jurásica); 2) perforación pozo El Paso-2 (profundidad final 2677.058 m) atravesando unidades como Formación San Antonio y Molino; 3) perforación pozo Río Maracas (profundidad final 3114.4464 m), atravesó a las formaciones Molino, La Luna, Aguas Blancas; 4) perforación pozo El Paso-3 (profundidad final 3538.4232 m), atravesó a las formaciones Molino, La Luna y Aguas Blancas; 5) perforación pozo El Paso-5 (profundidad final 1296.01 m), cortando unidades como la Formación San Antonio, Los Cuervos, Barco y Molino; 6) perforación pozo Los Venados (profundidad final 1252.728 m), el cual perforó formaciones como Molino, La Luna, Aguas Blancas, Lagunitas, Río Negro y La Quinta; 7) perforación pozo Cesar A-1X (profundidad final 1706.88 m), el cual atravesó desde la Formación Molino hasta la Formación La Quinta, incluyendo Formación Lagunitas (intervalo 1371.6 a 1380.744 m) y la Formación Río Negro (intervalo 1478.28 a 1609.344 m); 8) perforación pozo Cesar F-1X (profundidad final 1994.306 m), cortando desde la Formación San Antonio hasta la Formación Lagunitas, incluyendo a la Formación Aguas Blancas (intervalo 1453.896 a 1575.816 m); 9) perforación pozo Cesar H-1X (profundidad final 1286.256 m), atravesando a las formaciones San Antonio, Molino, La Luna, Aguas Blancas, Lagunitas, Río Negro y La

Quinta; entre otros. Es de resaltar que en la subcuenca del Cesar se encuentran las siguientes líneas sísmicas: Casacara (CV-79-7 y CV-80-47), Becerril (CV-79-37-PT2), Tocuy (CV-79-39 y CV-79-26) y Lead 1 (GM-81-07).

DRUMMOND (2007) en el informe técnico INF.1243-07-2007, presenta la actualización del modelo hidrogeológico y evaluación de impactos en los nuevos proyectos mineros, para atender los requerimientos de la resolución No. 0861 del 2007 del ministerio del medio ambiente, dentro del proceso de licenciamiento del proyecto Descanso, Rincón Hondo y Similoa, en el cual realiza una detallada descripción de la geología, las fallas y análisis del comportamiento lito-estructural de las unidades presentes en la región. En cuanto aguas subterráneas, presentan el inventario de 77 pozos con profundidades entre los 18 y 148 m, los cuales captan en su mayoría el acuífero cuaternario (50%) y el acuífero de la Formación Cuesta (48%), con niveles estáticos entre los 1.8 a 8.6 m (4.8 m en promedio) hacia el SW y SE y profundidades entre los 20 y 130 m. En la unidad del terciario presentan profundidades entre los 35 y los 143 m, con un nivel estático que varía de 2 a los 6,8 m (promedio 4,1 m). Reportan además la existencia de 13 piezómetros y 19 multipiezómetros para el monitoreo de los niveles de agua del acuífero Cuervos principalmente, 13 piezómetros al N, sector de El Descanso, que captan el acuífero cuaternario en el cual el nivel estático se encuentra entre los 4 y 6.5 m de profundidad; en Pribbenow reportan 10 piezómetros y 1 multipiezómetro ubicados en el acuífero Cuervos, presentando profundidades entre los 16 hasta los 121 m y niveles estáticos entre 25.1 y 45.6 m, el multipiezómetro se encuentra ubicado en el acuífero del cuaternario. En Similoa reportan 2 multipiezómetros y 1 piezómetro para medir el acuífero cuaternario y en el sector de La Aurora existen 2 multipiezómetros y 2 piezómetros ubicado en el Acuífero Cuaternario con niveles estáticos entre 3.5 y 4 m de profundidad. En lo referente a aljibes, registran 170, los cuales captan principalmente el acuífero oligoceno-cuaternario y localmente el acuífero Cuesta, con profundidades entre los 4 y 23 m, niveles que oscilan entre los 0.95 y 8.9 m, reportan además un manantial de fractura con un caudal de 0.2 l/s en la finca El Chorro (Acuífero Cuesta). Desde el punto de vista hidrogeológico clasifican las unidades asociadas con los acuíferos según los lineamientos planteados por la Asociación Internacional de Hidrogeología - IAH (1995; En Drummond op.cit.) de mayor a menor orden de importancia en: 1) Rocas y Sedimentos con Flujo Esencialmente Intergranular (Sistema Acuífero de Sedimentos Oligoceno-Cuaternario conformado por el Acuífero Cuesta de edad Miocena y el Acuífero Cuaternario y el Sistema Acuífero de Rocas Eocenas No Definidas las cuales no afloran en el área), 2) Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas (Acuífero Cuervos), y 3) Rocas y sedimentos con limitados recursos de aguas subterráneas (Acuífero Barco, Acuiclidio Molino y Acuiclidio Rionegro).

PRODECO (2008a) elabora informe con el fin de presentar alternativas de desviación del Río Calenturitas - Tramo 3-, en el cual consideran tres (3) alternativas como son: 1) Canal recto, 2) Canal meándrico con sinuosidad mínima (amplitud de onda de 35 m) y 3) Canal meándrico de mayor sinuosidad (amplitud de onda de 95 m); de lo cual concluyen que la alternativa 1 es el modelo más viable debido a que este no presentara revestimientos laterales o estructuras que impidan su migración y pudiendo el drenaje a través del tiempo lograr una divagación natural.

PRODECO (2008b) presenta la actualización al modelo hidrogeológico matemático para el área de influencia del proyecto de explotación minera Calenturitas, dando cumplimiento a los requerimientos establecidos en el Auto 1805 del 6 de junio de 2008 emitido por el MADS (antes MAVDT), documento en el cual definen cuatro (4) unidades geeléctricas como son: I) Depósitos recientes de llanura aluvial, II) Deposito aluvial del río

Tocuy, III) Areniscas semiconsolidadas intercaladas con niveles de arcillolitas y IV) Arcillolitas intercaladas con niveles de areniscas. Determinan que los acuíferos se encuentran entre los 3 y 25 m con resistividades de 12 hasta los 44 Ohm-m (Unidad Geoeléctrica IIB de la Unidad II depósito aluvial del río Tocuy) y mayores a 2.5 m con resistividades entre los 11 Ohm-m y 447 Ohm-m (Unidad Geoeléctrica IIIB de la unidad III Areniscas semiconsolidadas intercaladas con niveles de arcillolitas). Indican además que la recarga potencial del acuífero es de aproximadamente 450 mm/año y mencionan que la recarga real es sustancialmente menor siendo un valor aproximado de 67 mm/año. Realizan para el modelo inventarios de puntos de agua, pruebas de infiltración, de bombeo y el modelo numérico del acuífero usando el software Modflow.

PRODECO (2008c) lleva a cabo el estudio de suelos según el acto administrativo No. 1805 del 6 de junio de 2008, con el fin de determinar las deficiencias y potencialidades de los suelos existentes en la propuesta de ampliación minera del proyecto minero Calenturitas. En este estudio concluyen que el horizonte "A" es en general homogéneo, presenta espesores entre 0.15 a 0.30 m, de tipo franco arenoso variando ligeramente a arenoso limoso, pH neutros a levemente alcalinos y ligeramente ácidos hacia la zona de influencia del Río Calenturitas, salinidad entre 0 y 3 dS/m, valores entre medios y altos en contenidos de materia orgánica, niveles críticos en presencia de potasio, magnesio y sodio; los valores de Cu y Bo se encuentran en niveles inferiores a los críticos y las concentraciones de zinc en niveles críticos e inferiores a éste.

Mediante Convenio 047-2004, el Departamento del Cesar, CORPOCESAR e IDEAM (2007) presentan la evaluación del agua subterránea para riego de los sistemas acuíferos cono aluvial y llanura aluvial de Valledupar, Departamento del Cesar. En dicho estudio señalan que a la fecha se tiene inventariados 442 captaciones de agua subterráneas correspondientes en un 8.60% a pozos profundos, 90.04% a aljibes, 1.13% a aljibe pozos, y 0.22% a manantiales, estando la mayoría de aljibes localizados en los depósitos de llanura aluvial del Cesar (Qlla) y en el cono aluvial de Valledupar (Qcal) donde se realizan la mayor parte de las captaciones. El inventario de 38 pozos en el área, donde el 90% se encuentran en condiciones adecuadas, presentan profundidades en el rango de 5 a 170 m, siendo predominantes los que presentan profundidades entre 10 a 30 m, con caudales entre 1 a 100 lps con niveles piezométricos entre 3 a 10 m. Los aljibes presentan profundidades variables entre los 2.7 a 28 m con caudales entre los 0.1 a 4 lps. Las direcciones de flujo definidas por los aljibes, en el cono aluvial (Qcal) presentan una dirección NS iniciando en la Sierra Nevada de Santa Marta, transitando por el área de interés y recargando en la planicie del Río Cesar, arrojando valores de equipotenciales entre 95 y 160 m. En el depósito de llanura aluvial (Qlla) las direcciones de flujo presentan una tendencia NW-S, iniciando en la Sierra Nevada de Santa Marta, pasando por el área de estudio y recargando en el cauce del Río Cesar, reflejado por los valores equipotenciales entre los 125 y los 80 m en el mes de Octubre. Las capacidades específicas obtenidas en pruebas de bombeo oscilan entre los 12.07 hasta los 0.18 l/s/m. Finalmente plantean que los grupos hidrogeológicos que correspondientes a la zona de estudio son: 1) Sedimentos y Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Muy pequeñas, conformados por cuatro (4) sistemas de acuíferos denominados Llanura Aluvial (Qlla) que conforma acuíferos regionales continuos libres (superior, con espesores entre los 15 a 20 m y una conductividad hidráulica de 1 m/d) a semiconfinado y semiconfinado (inferior, con niveles piezométricos entre 5 y 8 m y conductividad hidráulica de 0.2 a 144 m/d); Abanicos Aluviales (Qcal) con espesores entre los 30 y 50 m que conforman un acuífero de tipo libre a semiconfinado, niveles freáticos entre 1 a 0.8 m en verano, con aljibes presentando caudales entre los 0.5 a 15 lps y una conductividad hidráulica de 15 m/d; Depósitos Aluviales (Qal) que desarrollan acuíferos continuos de carácter local y pequeña importancia hidrogeológica; y Terrazas (Qt) las cuales desarrollan acuíferos libres, niveles freáticos del orden de 3 m y espesores entre los

10 y 25 m. 2) Rocas Fracturadas y Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Pequeña, conformados por rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias de edad jurásico a triásico, con porosidad primaria y secundaria baja y escasa permeabilidad; y 3) Sedimentos y Rocas Porosas o Fracturadas con muy pequeña importancia Hidrogeológica o sin importancia.

CORPOCESAR e IDEAM (2009) en el convenio 097-2003-06-2007, indican que en el inventario realizado en el municipio de Curumaní la mayor parte de captaciones se realizan mediante aljibes y pozos (100), los cuales se encuentran localizados en la tabla de agua de la llanura aluvial (Qlla); los pozos presentan profundidades que varían entre 4 a 100 m, siendo dominantes los pozos entre los 10 y 30 m, que producen caudales entre los 1 a 30 lps, presentando niveles piezométricos entre 2 a 10 m. En cuanto a los aljibes, estos presentan niveles estáticos entre 1.8 a 8 m y profundidades hasta los 30 m con caudales productivos de 0.1 a 5 lps.

La geofísica obtenida, según informe del INGEOMINAS (1995, en: CORPOCESAR e IDEAM, 2009) para esta zona específicamente presenta valores entre 50 a 200 Ohm-m con profundidades 10 a 25 m interpretados como sedimentos arenosos de la llanura aluvial (Qlla); las rocas calcáreas presentan valores de resistividad de 100 Ohm-m hasta los 100 m de profundidad (calizas y lutitas carbonosas del Grupo Cogollo), entre 12 y 15 Ohm-m con profundidades variables entre los 75 a 200 m correlacionables con la Formación Rionegro (areniscas cuarzosas, areniscas conglomeráticas y conglomerados); por último, resistividades entre los 100 y 250 Ohm-m, asociados a sedimentos metamorfoseados (areniscas, limolitas, conglomerados y lodolitas) correlacionadas con rocas del paleozoico (Pzmv), intercaladas con rocas volcánicas piroclásticas (Formación La Quinta, Jq). Finalmente, se tienen para esta zona los siguientes grupos hidrogeológicos: 1) Grupo de Sedimentos y Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a muy Pequeña, conformado por los acuíferos de Llanura Aluvial (Qlla), Aluviones recientes (Qal), Abanicos Aluviales (Qcal), Terraza (Qt), Sedimentitas de Arjona (Tpaa), Formación Cuesta (Tmc) y Formación Barco (Tpib).

Ayala-Calvo et. al. 2009 en el estudio denominado *Estratigrafía y procedencia de las unidades comprendidas entre el Campaniano y el Paleógeno en la subcuenca de Cesar: aportes a la evolución tectónica del área*, concluyen que la subcuenca de Cesar se encuentra desarrollada por unidades predominantemente siliciclásticas de grano fino, variando en ambientes de depósito marinos marginales (distribuidos ampliamente en el Paleógeno) a ambientes aluviales, con sustratos oxigenados bajos permitiendo acumulación de carbones y para el Eoceno temprano, con condiciones oxidantes y predominio de ambientes continentales-aluviales. Indican además que “*Las areniscas estudiadas son líticas a sublíticas, con predominio de líticos sedimentarios y metamórficos entre el Campaniano-Paleoceno medio, metamórficos y volcánicos en el Paleoceno tardío, y líticos sedimentarios en el Eoceno – Oligoceno*”.

CORPOCESAR (2009) presenta el informe de monitoreo de niveles y de calidad de las aguas subterráneas en la Plantación Palmeras de Alamosa, jurisdicción del municipio de Becerril. Las mediciones fueron tomadas entre los meses de abril y noviembre de 2009. El informe señala que los niveles han variado entre 4.048 y 0.833 m marcando una tendencia al descenso de los niveles en la zona entre los meses de mayo y septiembre de 2009. Los pozos localizados en los lotes A-13, A-11, C-11 y A-16 (en este orden), presentan no solo los mayores valores de variación de nivel estático sino también los niveles estáticos más bajos debido a que estos son los más cercanos al proyecto minero de El Descanso. El menor valor de nivel hidrostático obtenido luego de la compensación por presión atmosférica es de 16.5197 m, registrado el 14 de octubre de

2009 a las 7 p.m. y el de mayor valor de nivel hidrostático obtenido luego de la compensación por presión atmosférica es de 18.5428 m, registrado el 12 de noviembre de 2009 a las 5 a.m.

Posteriormente, CORPOCESAR (2011) realiza el informe de monitoreo de aguas subterráneas en la plantación Palmeras de Alamosa, en jurisdicción del municipio de Bécerril, entre noviembre de 2009 a abril de 2011, y determinan que el valor de nivel máximo registrado fue de 19.2734 m, correspondiendo a la lectura del 11/Nov/2009 a las 10 horas y el valor mínimo fue de 9.9761 m, correspondiendo a la lectura del 14/Abr/2011 a las 1 horas.

CORPOCESAR (2013) realiza el informe de monitoreo de aguas subterráneas en la plantación Palmeras de Alamosa, en jurisdicción del municipio de Bécerril, entre los meses de abril de 2011 a noviembre 2012, mencionando que el monitoreo realizado “...del 06 de octubre de 2009 al 22 de noviembre de 2012 se tiene que, de manera general, los niveles del agua subterránea (dados por la columna de agua ubicada sobre los equipos de medición instalados por Corpocesar), han descendido en magnitudes que son del orden de los 9 a 10 metros, aunque también se observaron ascensos de dicho nivel que oscilaron entre 3 y 6 metros que, sin embargo, no fueron duraderos ya que se tuvo el descenso inmediato posterior”.

La Contraloría Municipal de Valledupar (2010) realiza el informe del estado de los recursos naturales y del ambiente del municipio, en el menciona que de los 770 puntos inventariados en el 2010 solo 17 presentan permiso de aprovechamiento (ver Cuadro No. 4 Relación de beneficiarios de aprovechamiento de aguas subterráneas, folios 20 al 22 de dicho informe).

CORPOCESAR y La Universidad del Magdalena (2010a) mediante contrato interadministrativo No. 19-6-0061-0-2010 realizan la formulación del plan de ordenamiento y manejo ambiental de la sub-cuenca hidrográfica del Río Casacará, municipios de Agustín Codazzi y Bécerril. El informe señala que el drenaje asociado a la subcuenca es de tipo dendrítico con predominio de corrientes NE-SW hasta la desembocadura en el Río Sicarare, formada por un relieve moderadamente escarpado, considerado como valle de subcuenca, donde la parte media y alta se encuentra en equilibrio y geológicamente madura, a diferencia de la parte baja que es clasificada como una subcuenca en estado de vejez. La geología que conforma esta subcuenca está definida por la presencia de unidades como la Formación la Quinta o Girón (Jq), Río Negro (K1r), Grupo Cogollo (K1c), Llanuras Aluviales (Qlla; con espesores entre 5 a 25 m), Abanicos Aluviales (Qcal; espesores en el rango de 30 a 60 m) y Aluviones Recientes (Qal). Mencionan además que la precipitación de dicha cuenca es de carácter bimodal, que durante el período lluvias se tienen precipitaciones que van desde los 235.8 en octubre hasta los 35.4 mm en febrero y un segundo periodo de lluvia con 154.8 mm en abril hasta los 194.2 mm en mayo, los excesos de agua en el suelo son abundantes en la zona media y alta de la subcuenca con valores de 700 a 1700 mm/año, mientras que la parte baja presenta valores bajos reducidos hasta 0 mm/año. Desde el punto de vista de aguas subterráneas consideran los siguientes sistemas: 1) Sistema acuífero de llanura aluvial (Qlla), 2) Sistema acuífero de aluviones recientes (Qal), 3) Sistema acuífero de abanicos aluviales (Qcal) 4) Sistema acuífero Grupo Cogollo, y 5) Sistema acuífero Formación Río Negro; hidrogeológicamente se refieren a estos de la siguiente manera: 1) Grupo de Sedimentos y Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Muy pequeñas (Sistema acuífero Llanura aluvial, en el cual incluye el Bloque del río Cesar y Codazzi-Sicarare, Sistema Acuífero Aluviones Recientes, Sistema Acuífero Abanicos Aluviales, en el que incluye el Abanico de Codazzi, de Casacará y el de La Jagua de Ibirico), 2) Grupo de Rocas Fracturadas y Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a

Pequeña (Sistema Acuífero Grupo Cogollo y Sistema Acuífero Formación Río negro), por ultimo 3) Grupo de Sedimentos y Rocas Porosas o Fracturadas con muy pequeña Importancia Hidrogeológica o sin importancia.

CORPOCESAR y La Universidad del Magdalena (2010b) en la formulación del plan de ordenamiento y manejo ambiental de la subcuenca hidrográfica del Río Manaure, municipio de Manaure, describe de acuerdo a información secundaria, que la litología presente en la cuenca está definida por las Metasedimentitas de Manaure (Pzm, VOMS), Sedimentitas Devónicas de La Cuchilla Carbona (DCc), Grupo Cachirí (PzC; conformado por conglomerado basal, areniscas ferruginosas y subgrawacas, areniscas micáceas y acillas, lutita arenosa calcárea, conglomerado y arcillolita arenosa y finalmente un conjunto calcáreo), Formación La Quinta (Jq; ocupa el 47% de la cuenca), Sedimentitas Pérmicas (P; conglomerado basal de 2 a 15 m, areniscas de grano fino, shales, areniscas calcáreas, margas arenosas de 40 m de espesor, calizas silicificadas), Formación Río Negro (Krn; conformada por areniscas feldespáticas, conglomerados, arenitas de grano fino y lodolitas interestratificadas), Shales y calizas indiferenciadas (Kcsi; compuesta por calizas, lodolitas calcáreas, arenitas calcáreas, arenitas cuarzosas y concreciones calcáreas), Formación Cogollo (K1c; constituida por shales, calizas fosilíferas) dividido en tres (3) miembros: Cogollo inferior (shale bituminosa y calcárea y caliza oscura, ambas con foraminíferos), Miembro medio (constituido por shale oscura no calcárea y unos pocos bancos de caliza arcillosa, fosilífera), y Miembro Guayacán o Superior (consta de calizas fosilíferas con limos y lutitas oscuras interestratificadas); Depósitos Coluvio-aluviales y Depósitos de Llanura aluvial. Estas unidades en general conforman unidades del paisaje o geomorfológicas como: Paisajes Fluvioerosionales (Laderas denudacionales en metasedimentitas, Vertientes erosionales y Vertientes fluvioerosionales), Paisajes Estructurales – Erosionales, Relieve Estructural Disolucional (Vertientes estructurales muy escarpadas), Paisajes Agradacionales, Cono Aluvial Antiguo Disectado, Cono Aluvial Reciente y Vallecito Aluvial. Las características morfométricas sugieren una subcuenca rectangular alargada oval oblonga, erosiva en la parte baja y con menor intensidad en la parte media, con patrón de drenaje detrítico y pendiente moderada, de tipo sedimentaria o en fase de vejez en la parte alta y madura en la parte media.

CORPOCESAR y La Universidad de Magdalena (2010c) según contrato interadministrativo No. 19-6-0061-0-2010, realizan la Formulación del modelo hidrogeológico e hidrológico, conceptual y numérico, en el área donde se ubican proyectos de explotación de carbón, tanto actuales como futuros, en la parte central del valle del Río Cesar, en jurisdicción de los municipios de Agustín Codazzi, Bucaramanga, La Jagua de Ibirico, Curumaní, Chiriquáná y El Paso. Concluyen que el comportamiento de la precipitación es de tipo bimodal con dos máximos y dos mínimos representados en los meses de abril, mayo y junio (primer semestre) y en los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, separados por una época de bajas lluvias a finales del mes de junio y el mes de julio (segundo semestre). Geológicamente describen las unidades presentes en los polígonos de referencia, en los cuales se refieren a la Unidad Metasedimentaria de La Virgen (Pzmv), Formación Río Negro (K1r), Formación La Quinta (Jq), Grupo Cogollo (K1c), Formación La Luna (K2l), Formación Barco (E1b), y depósitos recientes en los cuales incluyen Terrazas (Qt), Abanicos aluviales (Qcal), Coluviones (Qp), Llanuras aluvio-torrenciales (Qlla) y aluviones recientes (Qal); formaciones que presentan plegamientos (Anticlinorio Serranía del Perijá, anticlinal y sinclinal al W de Manaure, anticlinal y sinclinal al E del corregimiento de Casacara, sinclinal al N del río Tocuy, anticlinal al W de Bucaramanga y La Jagua de Ibirico. También se destacan los sinclinales de La Jagua de Ibirico y La Loma, los anticlinales que los acompañan y fallamientos (Sistemas de fallas NE-SW y Falla Arenas Blancas). En cuanto al acuífero del río Cesar y sus afluentes mencionan que éste puede ser considerado como de tipo detrítico no consolidado libre (hacia la

superficie) y de tipo detrítico no consolidado semiconfinado (zona profunda), siendo los acuíferos detríticos de pie de monte las principales fuentes de recarga el Río Cesar, Río Garupal, río Fernanbuco, río Sicarare, río Cascara o Platanal, río Calenturitas, río Tucuy, arroyo San Antonio, arroyo La Europa, arroyo San Bernardo, arroyo La Estancia, arroyo Don Pedro, arroyo Los Campanarios, arroyo San José, entre otros. Indican que el acuífero del Río Cesar presenta profundidades, hacia la parte central, por encima de los 200 m favoreciendo sus condiciones hidrogeológicas concordantes con los los municipios de Chiriguana, La Jagua, Becerril y El Paso, donde es utilizado con fines agrícolas (generando en época de verano problemas de sobre-explotación). Geofísicamente ejecutan una campaña de prospección geoeléctrica de docientos (200) Sondeos Electricos Verticales distribuidos de manera aleatoria en la zona de estudio, información que fue usada para para la elaboración de los mapas de resistividad a los 50, 100 y 200 m; las resistividades encontradas sugieren la presencia de una capa de suelo seco con resistividades entre los 17 y los 1020 Ohm-m con espesores entre los 1.15 a 8.7 m, posteriormente aparecen unidades no saturadas con resistividades entre 4.7 a 43 Ohm-m variando ocasionalmente a 450 Ohm-m; adicionalmente, unidades saturadas de aguas duras presentan resistividades superiores a los 50 Ohm-m. Arenas saturadas intercaladas con arcillas son la siguiente asociación, presentando resistividades entre los 20 Ohm-m a 48 Ohm-m que varía según el contenido de arcilla (resistividad de 7.7 Ohm-m), estratos con bajas resistividades se consideran como arenas saturadas de agua salobre (>6 Ohm-m) intercaladas esporádicamente con arcillas asociadas a sedimentos marinos terciarios. En referencia al inventario de puntos de agua, localizan 402 PAS ((Pozos, Aljibes, Piezómetros, entre otros) en el área de influencia de la zona minera del departamento del Cesar, la cual incluyó la cabecera y área de influencia rural de los municipios de Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, Curumaní, Chiriguáná y El Paso.

En la Open Round (2010) realizada en Colombia, se señala que existen pozos exploratorios perforados desde el año 1947, adquisición sísmica desde el año 1979 y 57 pozos perforados al presente, de los cuales cuatro (4) se encuentran sin producción comercial de hidrocarburos. El pozo El Paso-3 presentó producción en la Formación Molino, Cesar F-1X del año 1980 produjo gas en cantidades no comerciales en la Formación Aguas Blancas. Describen además como rocas generadoras a las formaciones Molino, La Luna y Aguas Blancas y reservorios a las calizas de la Formación La Luna y el Grupo Cogollo (formaciones Aguas Blancas y Lagunitas), y las formaciones del Paleógeno Cuervos y Cerrejón con potentes mantos de carbón los cuales constituyen un importante reservorio de metano (CBM). Las rutas de migración identificadas son principalmente fallas de cabalgamiento que cortan la cobertura cretácica. Como roca sello se tienen las formaciones Molino, Cerrejón y Los Cuervos, de carácter regional, localizados sobre la Formación La Luna; y localmente se presentan sellos como las formaciones Aguas Blancas, Lagunitas y La Luna. Según la sísmica, las trampas para hidrocarburos se encuentran en pliegues asociados a fallas de cabalgamiento y trampas estratigráficas en las discordancias presentes entre las formaciones La Luna-Molino y Molino-Cerrejón, para petróleo y gas.

IDEAM (2010) en el Estudio Nacional de Agua, refiere en el Capítulo 4: Oferta y Uso de Agua Subterránea en Colombia, que la Provincia hidrogeológica de Cesar-Ranchería se encuentra conformada por una sucesión de areniscas, lutitas y calizas que fueron depositadas durante el Paleozoico sobre rocas metamórficas de basamento; ésta a su vez es suprayacida por rocas cretácicas (1.000 m de espesor, conformada por arenitas, lutitas y calizas comúnmente ricas en materia orgánica depositadas en un ambiente marino) y terciarias (1.000 m de espesor y conformada por una secuencia clástica de arenitas y lodoletas con mantos de carbón depositados en ambientes continentales a transicionales), y discordantemente depósitos recientes.

Mencionan además, que las formaciones geológicas con potencial hidrogeológico en la cuenca de Cesar-Ranchería son: Formación Aguasblancas, Formación Molino, Formación Barco, Formación Cuesta, Terrazas altas, Terrazas medias, Depósitos lacustres y cenagosos, Unidades recientes de llanura aluvial (Valle del río Cesar, Los Venados, Ariguaní, Codazzi-Sicarare, Bucaramanga-La Loma, Rincón Hondo, Astrea-San Alberto), de aluviones recientes (Planicie del Río Cesar), de abanicos aluviales (Abanicos de Valledupar, de Manaure, de Codazzi, de La Jagua, de Pailitas y de Aguachica) y de terrazas en la esquina nororiental del departamento y las Formaciones La Luna y Cogollo; presentando acuíferos de tipo libres en unidades recientes de llanura aluvial, aluviones recientes y terrazas, y Formación Cuesta. En el resto de unidades se conforman acuíferos confinados.

PRODECO (2010) realiza la caracterización geotécnica de los tramos 1 y 2 para la relocalización del Río Calenturitas, como consecuencia del plan de minado de la mina Calenturitas en el cual las trazas explotables C199 y C130 concuerdan con la zona de seguridad establecida para las paredes del pit, solicitando la relocalización del río en un tramo de 150 m en el área de influencia de la traza del manto C130 con el fin de evitar filtraciones que pongan en riesgo la operación minera. Geológicamente mencionan que el área de influencia de la relocalización esta conformado por el cuaternario (conformado por arcillas amarillas plásticas y arenas cuarzosas, localmente conglomeráticas y gravas basales, con espesores hasta los 24 m), Formacion Cuesta (constituida por un conglomerado basal, limolitas, arcillolitas y areniscas abigarradas), Formacion Los Cuervos la cual es dividida en tres miembros 1) Miembro Cuervos Superior (con arcillolitas, intercalaciones de limolitas y areniscas verdes localmente conglomeráticas, sin capas de carbón explotables y un espesor de 300 m), 2) Miembro Cuervos Medio (espesor de 350 m, conteniendo los principales mantos de carbón, intercalados con arcillolitas limosas, limolitas y areiscas), y 3) Miembro Cuervos Inferior (constituido por arcillolitas, limolitas arreniscas grises y capas delgadas de carbón con un espesor de 200 m); por último describen la Formacion Barco, la cual se encuentra constituida por areniscas de grano fino a medio con intercalaciones menores de limolitas y arcillolitas gris claro, presentando un espesor promedio de 200 m. Estructuralmente presentan dos familias de diaclasas con direcciones N 30°E / 60°-75°SE y N 65° W / 50°-60° NE, y estratificaciones con tendencias N45°E / 20 – 65°NW. Adicionalmente, durante el estudio realizaron siete (7) perforaciones (34C, PR2036, PC1033, PR2035, PR2042, PR2044 y PC1027) con el fin de determinar el comportamiento del buzamiento a profundidad a través de registros dipmeter. Geomorfológicamente describen tres (3) unidades: la Terraza Deposicional Nivel 1 (morfología de llanura aluvial), Plano Inundable (depósitos recientes de los valles intramontanos de los cauces mayores y sus afluentes) y Terraza Deposicional Nivel 2 (complementa la llanura aluvial). Para la caracterización geotécnica tomaron diecisiete (17) perforaciones de las cuales once (11) fueron hechas con recuperación de testigo (34C, 35C, 37C, PC1027, PC1028, PC1030, PC1033, PC1042, PC1101, PC1102 y PC1103) y siete (7) triconadas (PR2035, PR2036, PR2039, PR2042, PR2044, PR2047 y PR2048), determinando un comportamiento plástico medio a alto, cohesivas a plásticas, saturadas y compacidad media a baja de los cuaternarios; entre los 18 y 25 m encuentran presencia de material meteorizado desarrollado en arcillolitas, limolitas y areniscas, y material rocoso distribuido en tres (3) sectores: 1) Sector I conformado por materiales asociados con la Formacion Barco (RQD medio a alto, predominante areniscas según la perforación PC1102), 2) Sector II, correlacionado con la Formacion Los Cuervos y el interburden conformado por arcillolitas, limolitas y areniscas, presentando un mayor grado de fracturamiento (roca de calidad media a baja), y 3) Sector III, correlacionado con el miembro medio e inferior de la Formación Cuervo, con características similares al Sector I; mencionan además que los niveles freáticos, según trincheras exploratorias realizadas en el 2009,

se encuentran entre los 3 a 4 m de profundidad con un comportamiento discontinuo producto de los cambios de las faces del depósito aluvial.

Ruiz (2011) realiza el modelamiento de la falla La Victoria en el sector de Cerro Piedra, Proyecto La Jagua, Municipio de La Jagua de Ibirico, donde concluye que la falla La Victoria es de carácter normal con rumbo y buzamiento promedio de N70°E/48°NW, con desarrollo de estructuras ramificadas producto de la propagación del plano principal presentando fallas sintéticas con dirección promedio N82°E/52°NW.

Rivas (2011) en la pasantía realizada en Carbones de La Jagua presenta la actualización y reestructuración de la información para mejorar el modelo geológico en la mina de carbones de La Jagua S. A, concluyendo que las formaciones terciarias (Paleoceno a Eoceno) presentes en la zona son las que contienen los mantos de carbón identificadas (24 en total, 11 mayores a 1 m y máximos de 6 m) en un sinclinal con buzamientos entre los 5° a los 24° al oriente y ángulos máximos a de 53° al occidente, conformado por las formaciones Los Cuervos y Barco.

INGEOMINAS (2011) realiza el Mapa de Permeabilidad de Colombia, en la Plancha 5-04 a escala 1:500.000 y presenta la memoria explicativa del mapa, considerando los depósitos de llanura aluvial y las demás rocas presentes en el área de influencia del sistema acuífero Cesar como: a) unidades geológicas intergranulares constituidas por sedimentos aluviales, de costas, volcanoclásticos y rocas sedimentarias poco consolidadas de ambiente continental (Sedimentos, rocas sedimentarias y volcanoclásticas de alta a media permeabilidad); b) unidades geológicas fracturadas o con disolución constituidas por rocas sedimentarias y volcanoclásticas de ambiente marino, transicional y continental, rocas ígneas y metamórficas localizadas en la Sierra Nevada de Santa Marta y en la Serranía del Perijá (Rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas con disolución o fracturamiento de alta o media permeabilidad); c) unidades geológicas que pueden almacenar agua pero la transmiten lentamente, constituidas por sedimentos paludales, morrenicos y de dunas y por rocas sedimentarias poco consolidadas a muy consolidadas, de origen continental, transicional y marino (Sedimentos y rocas de baja permeabilidad) y d) rocas terciarias y algunas de las unidades aflorantes en parte del pie de monte de la Serranía del Perijá y de la Sierra Nevada de Santa Marta, como unidades geológicas sin capacidad de absorber o transmitir agua, complejo de rocas sedimentarias, ígneas y metemorficas muy compactas (Sedimentos, rocas sedimentarias muy compactas, ígneas y metamórficas de baja permeabilidad).

Baquero (2012) realiza el análisis de lineamientos en la cuenca Cesar-Ranchería y áreas adyacentes mediante la interpretación de imágenes Lansat y de modelos de elevación SRTM, así como diferentes técnicas de segmentación utilizados para agrupar los lineamientos y reconocer patrones y distribución de orientaciones. El autor concluye que los lineamientos de la cobertura sedimentaria de la Cuenca Cesar-Ranchería guardan una relación con los de la Sierra Nevada de Santa Marta y de la Serranía del Perijá.

Márquez et al., 2012 realiza la caracterización microbiológica y fisicoquímica de aguas subterráneas de los municipio de La Paz y San Diego, concluyendo que las características microbiológicas y fisicoquímicas de los aljibes muestreados localizados en zonas rurales sobrepasan los rangos aceptables para consumo humano; mencionan que en el 4.3% de los aljibes muestreados su agua puede ser usada para riego, 76.3% podría utilizarse para riego pero con riesgos de incremento en salinización de los terrenos regados, disminución de la permeabilidad del suelo y de la productividad del cultivo, y un 12.9% arrojó aguas no aptas para riego y

pastoreo. Citan a Gómez y Capachero (2008) quienes concluyen que el 32% del departamento del Cesar presenta vulnerabilidad alta respecto al uso de las fuentes hídricas, impactos ambientales importantes al recurso hídrico subterráneo por actividades mineras e infiltración de fluidos contaminados con patógenos o tóxicos más severos. En ese orden de ideas, se puede pensar que, entre los municipios de La Paz y San Diego, existe un vector de contaminación de las aguas subterráneas según el estudio realizado, debido a que existe interacción de las aguas subterráneas con elevados contenidos de nitratos y nitritos y excesos de sales totales como cloruros, sodio, magnesio.

Ortega, Rojas y Martínez (2012) realizan un estudio referente a los depósitos estrato confinados de cobre presentes en el municipio de San Diego-Cesar, en la Serranía del Perijá, concluyendo que existe un sistema de fracturamiento mayor NE-SW causado por las fallas regionales San Diego y Media Luna, afectando toda la secuencia estratigráfica aflorante en el área de trabajo; además, las mineralizaciones presentes en esta área están restringidas a las rocas volcánicas (Basaltos-andesitas, riolitas y dacitas) de la Formación La Quinta la cual presenta impregnaciones de cobre altamente oxidados (malaquita, azurita, cobre nativo, crisocola).

Díaz, Arranz y Peñuela (2013) en el estudio denominado caracterización físico-química y mineralógica de suelos en zona carbonífera del Cesar, concluyen que es de gran utilidad evaluar el significado del carbón orgánico y la salinidad de los materiales, como también de la presencia de algunos elementos tóxicos como el Se, el Zn y las carencias de nutrientes como el P; mencionan además que los estériles son de color muy oscuro dificultando la colonización vegetal por su susceptibilidad al calentamiento excesivo, problemas importantes de salinidad, que los estériles no son potenciales generadores de acidez debido a la baja concentración de azufre piritico, sin ser el pH excesivamente ácido ni con presencia de oxihidroxilos ni droxisulfatos de hierro. Resaltan que la existencia de sulfatos en las vías de drenaje pueden coprecipitar elementos potencialmente tóxicos.

IDEAM (2013a) en la zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, menciona que el sistema acuífero del valle del Río Cesar (SAC 4.1), se encuentra asociado a los depósitos aluviales del Río Cesar y por secuencias detríticas del Paleógeno-Neógeno; siendo este recurso utilizado para uso doméstico y agropecuario y para la explotación del carbón a cielo abierto por mediana y gran minería (CORPOCESAR e IDEAM, 2007). Menciona además, que la subzona hidrográfica, en la zonificación hidrográfica de Colombia para el área de Magdalena-Cauca, se encuentra conformada por las subzonas hidrográficas de el Alto Cesar (2801), Medio Cesar (2802), Río Ariguani (2804) y Bajo Cesar (2805).

En la clasificación de zonas hidrográficas de Colombia realizada por el IDEAM (2014a) se considera, en términos generales, como cuenca Cesar-Ranchería, la conformada principalmente por el Valle del Río Cesar en el departamento del mismo nombre, presentando límites geológicos como la Falla de Oca y Sierra Nevada de Santa Marta al Norte, al este por la Serranía del Perijá y al oeste por la Falla de Bucaramanga. Esta área está conformada por unidades hidrogeológicas como abanicos y terrazas aluviales, generando acuíferos libres a confinados y rocas sedimentarias que forman acuíferos libres y confinados; donde se tienen inventariados 2800 aljibes y 475 pozos con profundidades entre los 20 y 300 m, caudales entre 0.1 y 50 l/s, transitividades entre 6 y 5000 m²/d y capacidades específicas hasta de 4 l/s/m.

Ojeda y Sánchez (2013) realizan la petrografía, petrología y análisis de procedencia de unidades Paleógenas en las cuencas Cesar-Ranchería y Catatumbo, indicando que las rocas del Paleoceno tardío son

predominantemente inmaduras composicionalmente debido a la alta proporción de feldespatos y líticos (litoarenitas y litoarenitas feldespáticas), evidenciando retrabajamiento de rocas sedimentarias y del basamento metamórfico. Para el Eoceno en dicha cuenca se presenta un incremento en líticos metamórficos con escasez de líticos volcánicos de composición similar a las rocas Paleógenas. Finalmente concluyen que las areniscas de la Formación Barco presentan madurez composicional media disminuyendo transicionalmente hasta los sedimentos asociados con la Formación Cuervos y que la similitud de los constituyentes de las areniscas relaciona la parte sur y norte de la Cuenca Cesar – Ranchería determinando a la Sierra Nevada de Santa Marta como principal área fuente.

CORPOCESAR y Universidad del Atlántico (2014) según contrato interadministrativo No. 19-7-002-0-2013, en el estudio denominado Plan de ordenamiento del recurso hídrico del Río Cesar, mencionan que la geología de la cuenca del Río Cesar se encuentra definida por la presencia de la Formación Guatapurí (Basal predominantemente volcánico, con basaltos porfiríticos, basaltos andesíticos, amigdaloides, andesitas, andesitas porfiríticas, volcánicos piroclásticos, queratófidos, espilitas y ocasionalmente brechas y conglomerados); y superior con limolitas rojizas a moradas intercalado con rocas volcánicas, Volcánico Riolítico (Rolitas de Los Tábanos y El Golero, Vitrófiro Riolítico de Río Negro), Grupo Cogollo (Caliza, caliza arcillosa y lutitas al tope) y los depósitos de Llanuras Aluviales, este último localizado hacia el municipio de Bosconia y conformado por las llanuras aluviales generadas por el Río Cesar y el Ariguání, con intercalaciones de gravas, arenas y arcillas de espesor variable, desde poco espesor en el pie de monte y de 100 m hacia la zona sur, en cercanías al Río Cesar. Las geoformas descritas en esta cuenca corresponden a Sistema montañoso y sistema plano principalmente.

Manco, Rojas y Gómez (2014) en el estudio petrográfico del yacimiento de caliza presente en el municipio de La Paz, describen secuencias estratigráficas de rocas sedimentarias carbonatadas (carbonatos de calcio 95%, sílice 0.6% y otros 4.40%), constituida por alternancia de calizas biomícriticas a micríticas y dismícriticas con intercalaciones finas de shales y venillas de calcita asociadas al Grupo Cogollo de edad Aptiano-Coniaciano, formadas en ambientes marinos nerítico y batial. Es de resaltar que estas rocas se encuentran en la parte media baja del sistema acuífero Cesar permitiendo inferir la existencia de zonas con porosidades secundarias importantes en dichas zonas.

Mediante Resolución No. 1140 del 02 de octubre de 2014, la Agencia Nacional de Licencias Ambientales prorroga la concesión de aguas subterráneas a la mina la Francia de la actual compañía Colombian Natural Resources -CNR-; en dicho acto administrativo cita lo siguiente: 1) durante los meses de enero a diciembre de 2010, reportaron un consumo diario promedio de 128.44 m³ equivalentes a 1.783 l/s, 2) el periodo comprendido entre los meses de enero a diciembre de 2011, reportaron un consumo diario promedio de 133.6 m³ equivalentes a 1.546 l/s, 3) durante los meses de enero a diciembre de 2012, reportaron un consumo diario promedio de 170.9 m³ equivalentes a 1.978 l/s, 4) durante los meses de enero a junio de 2013, reportaron un consumo diario promedio de 132.4 m³ equivalentes a 1.532 l/s y entre julio diciembre del mismo año no se habían reportado valores; caudal que no supera los valores permitidos por Resolución No. 1396 del 06 de agosto de 2008 correspondiente a 6 l/s.

Martínez, Fortich y Pavajeau (2014) en la investigación denominada determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena) mencionan que las aguas termales son de origen geotérmico, proceso en el cual intervienen principalmente

las aguas de infiltración originadas por precipitación y aportadas por el cauce de los ríos. Estas aguas son clasificadas como hipotermales, con temperaturas que van entre los 20 a los 35°C, para el caso de Becerril, correspondiente a afloramientos de aguas sulfuradas, con altas concentraciones de cloruros y con valores mayores de 1 mg/l de azufre bivalente, en las formas de ácido sulfídrico y ácidos polisulfídicos, asociados a materia orgánica como aporte de azufre (algas y bacterias).

CONSULCIVIL (2014) realiza diez (10) perforaciones con profundidades entre los 4.9 y los 8 m para un proyecto de construcción de una institución educativa en el municipio de Valledupar, sobre el cono o abanicos de Valledupar “...constituido por un depósito aluvial matriz - soportado compuesto por una matriz arenolimosa con fracciones limo arcillosas, la cual envuelve gravas redondeadas a subangulares de diferente composición. Permitiendo caracterizar una compacidad relativa densa a muy densa predominantemente. El estrato presenta tonalidades pardas, ocres, blancas y cremas”. La posición del nivel freático para dicha locación no fue determinada debido a que “...Durante la época de realización de la exploración de campo no se detectó el nivel freático. Sin embargo, se resalta que esta superficie fluctúa estacionalmente dependiendo de la intensidad de los períodos invernales y/o verano”.

Ordoñez y Serna (2015) llevan a cabo el análisis superficial y multitemporal de imágenes Lansat 7 ETM+ y Lansat 8 OLI TIRS en el proyecto carbonífero La Luna entre los años 2001 y 2015. Allí, mencionan que luego de realizar el procesamiento de las imágenes se pueden observar cambios en los usos del suelo por actividades antropogénicas generando perdida de bosque nativo por actividades agropecuarias o por operaciones mineras. Determinaron a través de la metodología Band Ratio la composición mineralógica y la relación de los suelos (depósitos cuaternarios) con las diferentes formaciones geológicas. Lo anterior, permitió clasificar las zonas de mineralización ferrosa relacionados con la unidad informal Cuesta y las zonas de transición que contienen minerales ferrosos con material arcilloso y limo-arcilloso re-trabajado de la formación Los Cuervos, la cual alberga los mantos de carbón de la zona.

Cardeño et al. (2015) realizan un estudio para la identificación de las mineralizaciones de cobre aflorantes en el corregimiento de San José de Oriente, La Paz. Concluyen que las mineralizaciones de cobre poseen una concentración de 1.45% están presentes principalmente en la Formación La Quinta. Adicionalmente, se observan formaciones metamórficas de edad pre-devoniana, intrusivos hipoabisales, una secuencia sedimentaria clástica, volcanogénica jura-triásica y una secuencia marina del cretáceo de diversos ambientes de formación.

El Servicio Geológico Colombiano -SGC- (2015) presenta el estado de la Cartografía Geológica de Colombia a escala 1:100.000, realizados entre los años 2003 y 2015. Allí, presenta los planos y memorias explicativas de las planchas 19 (Sierra Nevada de Santa Marta), 20 (San Juan del Cesar), 26 (Pueblo Bello), 27 y 28 (Valledupar y Villanueva), 33 (El Copey), 34 (Agustín Codazzi) y 35 (Agustín Codazzi y Río Espíritu Santo), 40 (Sierra Nevada de Santa Marta), 41 y 42 (Becerril), 46 (Santa Ana), 47 (Chiriguaná) y 48 (La Jagua de Ibirico), 55 (El Banco) y 56 (San Roque), 65 (Tamalameque) y 66 (Miraflores), 75 (Aguachica) y 76 (Ocaña), 85 (Simití) y 86 (Abrego), 96 (Bocas del Rosario) y 97 (Cachira).

Hincapié (2015) realiza la caracterización geológica y geotécnica del material que compone los depósitos de estéril de la Mina La Jagua, sugiriendo que las rocas in situ poseen una mayor resistencia a la compresión uniaxial, la cual disminuye en las partículas que conforman los botaderos por procesos de voladura,

transporte y depositación; donde las lodoletas y areniscas, según los análisis, son rocas que van desde duras hasta blandas y muy blandas en las arcillolitas.

Armenta y Gallardo (2016) llevan a cabo la caracterización del agua subterránea en el Valle superior del Río, para lo cual actualizan el inventario de 485 puntos de aguas subterráneas en el área de interés. Reportan disminuciones generalizadas en las conductividades eléctricas de las aguas subterráneas debido probablemente a la disminución de los cultivos de algodón y sorgo a los que se les aplicaba históricamente grandes cantidades de agroquímicos; además, mencionan que el cambio periódico de la calidad del agua es en función del régimen hidrológico de la zona, los usos del suelo, los métodos de extracción del recurso y del manejo ambiental del mismo. Finalmente, en cuanto a las aguas subterráneas, indican que el modelo de flujo persiste hacia el Río Cesar, pero con un gradiente menor.

Aristizábal (2016) en el estudio denominado morfometría de los abanicos aluviales del Río Chiraimo-San José de Oriente, Río Guatapurí-Valledupar y Río Jerez-Dibulla y su relación con la tectónica, concluye que entre mayor sea el grado de circularidad de la cuenca, mayor será la capacidad de transportar y depositar sedimentos hacia su parte baja, los cuales son más vulnerables por amenaza fluvial como eventos de avenidas torrenciales, además de tener una gran capacidad erosiva y de arrastre de sedimentos (Zona 1, Río Chiraimo). La zona 2 presenta mayor grado de basculamiento sugiriendo un abanico de mayor extensión, reflejado en la intensa eficacia de deposición de sedimentos sobre el abanico aluvial, debido a su alta capacidad para erosionar y transportar materiales hacia las zonas más bajas. Estructuras, lineamientos o fallas tienen influencia en los abanicos de las zonas 1 (Río Chiraimo) y 2 (Abanico de Valledupar) presentando tenencias NE-SW para la primera y NE-SW para la segunda zona, compartiendo direcciones preferenciales, posiblemente asociadas a nivel regional, a la interacción de las Placas Caribe y Suramericana que afectan gran parte del área estudiada. Finalmente menciona que el ambiente tectónico de la zona 1 está conformada por cabalgamiento y la zona 2 por basculamiento leve.

Anaya y Diaz (2016) en el proyecto de investigación denominado análisis de la fragmentación de coberturas naturales producida por la minería a cielo abierto en el municipio La Jagua de Ibirico; concluyen que la actividad minera es una actividad altamente impactante generando cambios socioeconómicos y culturales que se traducen en ampliaciones en las fronteras agrícolas causando la pérdida progresiva de coberturas naturales. Las áreas de explotación minera han aumentado once veces (11) su tamaño inicial desde 1989, afectando zonas destinadas para la agricultura (27.63%) y ganadería (43.40%) y en cuanto a coberturas naturales, la actividad se asentó en un 11.33% sobre los bosques de galería y en un 8.99 % sobre los bosques abiertos. Sugieren que, si se incrementan las zonas de explotación se podría en riesgo los servicios ecosistémicos que brindan las coberturas naturales acelerando la dinámica socioeconómica local. En términos generales los procesos mineros han aportado grandemente a la fragmentación de los ecosistemas producto de la ampliación de las zonas de explotación y desviación de cauces, lo cual puede generar una grave afectación a la supervivencia de especies animales y vegetales.

SLOANE (2016) en el estudio de impacto ambiental para el proyecto de explotación subterránea de carbón en la mina La Luna, determina que la estratigrafía de la zona está conformada, de base a techo, por la Formación Cuervos (unidad Carbonífera con 8 mantos de carbón de 0.3 cm de espesor mínimo), unidad informal Cuesta (2220 m aprox. de espesor) y el cuaternario (22.34 m de espesor, 15 m en promedio); esta última unidad se encuentra conformada por arcillolitas, arcillolitas limosas, areniscas finas a gruesas y

conglomerados matriz soportados (a la base) denominados Depósitos Aluviales (Qal). Depósitos de Llanura Aluvial (QIla) conformados de base a techo por arcillas y limos rojos, arenas medias a gruesas bien seleccionadas, con espesores entre los 5 y los 12 m. Formación Cuesta (N2c) conformada por alternancias no homogéneas de areniscas muy gruesa, areniscas finas a medias, conglomerados, limolitas y arcillolitas rojizas, con un espesor máximo estimado de 800 m. La Formación Los Cuervos (E1c) con un espesor de 300 m en promedio, según el estudio, muestran que en la zona se ha erosionado el miembro superior y parte del miembro medio, esta erosión es variable y se acentúa hacia el norte, dejando solo el miembro inferior en contacto con las rocas de la formación Cuesta, el miembro medio se encuentra constituido por capas de limolita, areniscas muy finas de color gris, arcillolitas grises, lutitas carbonosas y potentes mantos de carbón. La Formación Barco (E1b) conformada por capas de areniscas de grano fino, arcillolitas entre micáceas carbonosas y lutitas, poseen nódulos ferruginosos y al techo de la formación es común encontrar delgados mantos de carbón, espesores locales entre los 150 y 280 m a 1000 m en general en el departamento del Cesar. Formación Molino (K2m) constituida por una secuencia de lutitas negras con intercalaciones de arenitas muy finas, con un espesor de 1380 m para la cuenca del Cesar en general, adelgazándose hacia NW donde presenta un espesor de 442 m. Según el perfil de la Figura 5. 1-4 “Perfil geológico este-oeste de la zona de estudio” presentado en dicho documento, se puede concluir que el cuaternario se encuentra en algunas partes en contacto discordante con la Formación Cuesta a localmente en contacto discordante con las rocas Cretácicas de la Formación Molino, lo cual sugiere una posible interacción del acuífero con dichas unidades. Los SEVs realizados (6 para este caso) presentan zonas saturadas en los depósitos aluviales recientes y areniscas saturadas de la Formación Cuervos y Cuesta (SEV-1, SEV-2, SEV-3), arenas saturadas (QIla) y areniscas saturadas de la Formación Cuesta (SEV-4 y SEV-5), arenas saturadas (SEV-6), presentando resistividades y profundidades variadas, definiendo cinco (5) zonas de acuerdo a las propiedades geoeléctricas en Z1 (Depósitos aluviales recientes y de llanura de inundación), Z2 y Z2A (Formación Cuesta), Z3 (Formación Los Cuervos) y Z4 (Formación Molinos).

WSP Parsons Brinckerhoff (2017) determinan la existencia de cinco (5) unidades hidrogeológicas de origen primario y una de origen secundario, las primeras corresponden a los acuíferos Cuaternario, Cuesta, Cuervos, Acuitardo Barco y Acucludo Molino (hacia el centro de la zona de estudio éstas se profundizan por lo cual la formación Molino es de difícil monitoreo por la profundidad a la que se encuentra). La segunda pertenece a la unidad hidrogeológica denominada Sustrato Cretácico que corresponde a la unión de las formaciones cretácicas La Luna, Río Negro y Grupo Cogollo, rocas con características granulométricas variables que controlan el comportamiento hidráulico del acuífero o Acuitardo. Además, proponen como límite abierto para el acuífero la unidad cuaternaria y consideran las fallas Arenas Blancas, La Aurora, Perijá y Bucaramanga-Santa Marta como límites cerrados del mismo, tomando como punto de partida los saltos en los niveles piezométricos en donde en el Río Tucuy se tienen promedios de 1.2 y 2.26 m, la falla Bucaramanga - Santa Marta entre 2.06 y 9.5 m y en la falla Arenas Blancas promedios entre 1.47 y 6.8 m. Concluyen además, que las direcciones de flujo son concordantes con las corrientes de agua principales que a su vez son controlados por la topografía, presentando una tendencia este-oeste; la recarga para esta zona está determinada por la infiltración directa que proviene de las precipitaciones y aportes de los ríos principalmente en el acuífero cuaternario y para el acuífero profundo se da por medio de fracturas. Por último, mediante la metodología DRASTIC (Aller et al., 1987) para la evaluación de la vulnerabilidad, determinan zonas de grado bajo con una superficie de 18032 Ha equivalentes al 12.4% del área de estudio, zonas de grado moderado con superficie de 106728 Ha, con un 73.3% y zonas de grado alto con superficie de 20870 Ha, equivalentes al 14.3% del área.

Realizada la compilación, revisión y evaluación de la información secundaria se pudo determinar el estado del arte en general sobre aspectos técnicos geológicos, hidrogeológicos, económicos (mineros), calidad de agua, entre otros en el acuífero priorizado.

En ese orden de ideas, es importante resaltar que en general el departamento del Cesar cuenta con cartografía geología principalmente a 1:100.000 y de manera local trabajos cartográficos a otras escalas. De acuerdo a la Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (MADS, 2014) esta información es adecuada como instrumento de planificación de los recursos hídricos a nivel de Zona Hidrográfica (Ver Tabla 1, pág. 10 de la Guía Metodológica del MADS, 2014). Por otro lado, el mapa sintetizado escala 1:100.000 pero levantado a escala 1:25.000 por el INGEOMINAS (1995) es adecuado para estudios a nivel de acuíferos (Nivel 4), según la Política Nacional de Gestión Integral del recurso Hídrico, en los cuales el instrumento de planificación es el Plan de Manejo Ambiental; por lo tanto, se acoge la cartografía para el sistema acuífero Cesar.

Es importante resaltar que debido a la importancia que la cuenca Cesar-Ranchería presenta desde el punto de vista de hidrocarburos se cuentan con perforaciones profundas en la región y de estudios específicos propios de la prospección de hidrocarburos, que permiten conocer de manera detallada la información sobre las rocas generadoras en las formaciones Molino, La Luna y Aguas Blancas y reservorios a las calizas de la Formación La Luna y el Grupo Cogollo (formaciones Aguas Blancas y Lagunitas); sin embargo, solo se accedieron a algunos documentos los cuales fueron obtenidos a través de la web, información que es incluida para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual -MHC- del sistema acuífero Cesar.

En lo referente al recurso hídrico subterráneo, se cuentan con algunos trabajos en diversas áreas del acuífero pero desarticulados, por lo tanto, no han sido integrados al modelo hidrogeológico conceptual del acuífero priorizado; sin embargo, es de resaltar que actualmente se ejecuta el modelo hidrogeológico conceptual para la zona minera en la cual se incluyen a las compañías Drummond, PRODECO y CNR, ejecutado por WSP Parsons Brinckerhoff (2017), el cual se encuentra en revisión y se tendrá en cuenta para el análisis e incorporación en el modelo hidrogeológico regional para el sistema acuífero Cesar.

De igual forma, según la información suministrada por CORPOCESAR referente a los licenciamientos ambientales para los títulos mineros en los municipios contenidos en el sistema acuífero Cesar, no se cuenta con la suficiente profundización en temas relacionados con las aguas subterráneas. Desde el punto de vista minero y según los términos de referencia señalados por el Ministerio de Minas y Energía para los Trabajos de Exploración (LTE) y Programa de Trabajos y Obras para Materiales y Minerales Distintos del Espacio y Fondo Marino (2001), en el numeral 6.4.3. Estudio Hidrogeológico establece que “...se debe permitir el conocimiento de las condiciones naturales del agua subterránea, su relación con las aguas de infiltración y corrientes superficiales, tanto en verano como en invierno, los parámetros y constantes hidráulicas del macizo rocoso, el nivel freático, la localización y característica de los acuíferos presentes en el área y los efectos que produciría el agua subterránea sobre la explotación minera”. Por lo anterior, es de vital importancia la articulación tanto de la autoridad minera como de la ambiental para abordar el conocimiento de las aguas subterráneas cuando se otorgan licenciamientos para títulos mineros.

Es de resaltar que, de manera regional, las unidades hidrogeológicas de mayor importancia en la zona están definidas por los depósitos de llanura aluvial (Qlla), Abanicos Aluviales (Qcal) o Conos aluviales y terrazas aluviales (Qt) las cuales, en términos generales, son incluidas en el grupo de sedimentos y rocas con importancia hidrogeológica relativa grande a muy pequeña determinadas específicamente en los municipios de Bosconia, Codazzi-Casacara; las Formaciones Cuestas, Barco y Cuervos son consideradas como los acuíferos del terciario. Otros grupos definidos para el acuífero en general son 1) Rocas Fracturadas y Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Pequeña, conformados por rocas sedimentarias y volcánicas-sedimentarias de edad jurásico a triásico, con porosidad primaria y secundaria baja y escasa permeabilidad (en este se incluyen el Grupo Cogollo y la Formación Río Negro); y 2) Sedimentos y Rocas Porosas o Fracturadas con muy pequeña importancia Hidrogeológica o sin importancia, clasificaciones que se acogen en el presente modelo hidrogeológico.

La información geofísica analizada permite identificar resistividades variables que se encuentran en rangos desde los 1 hasta los 300 Ohm-m en la Formación Cuesta y localmente de 447 Ohm-m obtenida en un SEV en los alrededores del Río Tocuy. La información geoeléctrica se tendrá en cuenta para el presente modelo hidrogeológico con el fin de determinar patrones locales o regionales.

Desde el punto de vista minero se cuentan con trabajos de investigación sobre manifestaciones de Cobre hacia la Serranía del Perijá, las cuales pueden tener incidencia posiblemente en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Adicionalmente, se cuentan con 85 licenciamientos ambientales en el área de estudio (84 vigentes a la fecha), de la cuales 78 fueron otorgadas por la autoridad ambiental, pero que no presentan suficiente información relevante para el MHC del sistema acuífero Cesar y 7 son competencia de la Agencia Nacional de Licencia Ambientales -ANLA- y presentan información de carácter puntual sobre el modelo hidrogeológico de la zona en la cual se desarrollan los proyectos mineros.

2.1.1.1 Cartografía y estudios

En el Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC- se encuentran las siguientes planchas topográficas base para el departamento del Cesar en Sistema de coordenadas Magna-Colombia-Bogotá:

- Plancha 5-01 (Zona Norte del Departamento del Cesar), Plancha 5-04 (Zona Centro del Departamento del Cesar) y Plancha 5-06 (Zona Sur del Departamento del Cesar) a escala 1:500.000, del año 2007.
- A escala 1:100.000 se cuentan con la Plancha No. 19 de los años 1959 y 2008 (Sierra Nevada de Santa Marta), Plancha No. 20 de los años 1961, 1982 y 2008 (San Juan del Cesar), Plancha No. 26 de los años 1959, 1982 y 2008 (Pueblo Bello), Plancha No. 27 de los años 1961, 1978 y 2008 (Valledupar), Plancha No. 28 de los años 1963 y 2008 (Villanueva), Plancha No. 32 de los años 1960 y 2008 (Chivoló), Plancha No. 33 de los años 1960 y 2008 (El Copey), Plancha No. 34 de los años 1960, 1982 y 2008 (Agustín Codazzi), Plancha No. 35 del año 2008 (Río Espíritu Santo), Plancha No. 40 de los años 1959, 1978 y 2008 (Bosconia), Plancha No. 41 de los años 1979 y 2008 (Becerril), Plancha No. 42 del año 2008 (Serranía del Perijá), Plancha No. 46 de los años 1960, 1998 y 2008 (Santa Ana), Plancha No. 47 de los años 1960, 1979 y 2008 (Chiriguaná), Plancha No. 48 de los años 1979 y 2008 (La Jagua de Ibirico), Plancha No. 55 de los años 1961, 1979, 1998 y 2008 (El Banco), Plancha No. 56 de los años 1972, 1998 y 2008 (San Roque), Plancha No. 65 de los años 1961, 1982, 1998 y 2008 (Tamalameque), Plancha No.

66 de los años 1970, 1998 y 2008 (El Tarra), Plancha No. 75 de los años 1961, 1998 y 2008 (Morales), Plancha No. 76 de los años 1972, 1998 y 2008 (Ocaña), Plancha No. 85 de los años 1962, 1998 y 2008 (Simití), Plancha No. 86 de los años 1973, 1989, 1998 y 2008 (Abrego), Plancha No. 96 de los años 1962, 1998 y 2008 (San Rafael) y Plancha No. 97 de los años 1965, 1998 y 2008 (San Alberto).

Las planchas a escala 1:25.000 contenidas en los municipios donde se localiza el acuífero priorizado y el área definida para la prospección geofísica en términos generales son:

- **Municipio de Valledupar:** Se tienen las Planchas No. 19-IV-B, 19-IV-D, 20-II-A, B, C y D; 20-IC-C, 26-II-B, 27-I-A, B, C y D; 27-II-A, B, C y D; 27-III-A, B, C y D; 27-IV-A, B y C; 33-I-D, 33-II-A, B, C y D; 33-III-D, 33-IV-A, B, C y D; 34-I-A, B, C y D; 34-II-A, 34-III-A, B y C; 40-II-A, B, C y D; 40-IV-A y B; y la Plancha No. 41-1-A.
- **Municipio de Bosconia:** Se tienen las Planchas No. 33-II-C y D, 33-IV-C, 40-I-A, B, C y D, 40-II-A y C, 40-III-B y 40-IV-A.
- **Municipio de El Paso:** Se tienen las Planchas No. 40-II-C y D, 40-III-B y D, 40-IV-A, B, C y D; 41-III-C, 47-I-B, 47-II-A, B, C y D; y la Plancha No. 48-I-A.
- **Municipio de Chiriguaná:** Se tienen las Planchas No. 47-II-B, C y D, 47-IV-A, B, C y D; 48-I-A y C, 48-III-A, B, C y D; 48-IV-A y C; y las Planchas No. 55-II-A y B.
- **Municipio de Curumaní:** Se tienen las Planchas No. 47-IV-D, 48-III-A, B, C y D; 55-II-A, B, C y D; 55-IV-B, y las Planchas No. 56-I-A, B, C y D.
- **Municipio de La Jagua de Ibirico:** Se tienen las Planchas No. 41-III-C y D, 48-I-A, B, C y D; 48-II-A, B, C y D; 48-II-A y B; y la Plancha No. 48-IV-A.
- **Municipio de Becerril:** Se tienen las Planchas No. 40-IV-B y D, 41-II-D, 41-III-A, B, C y D; 41-IV-A, B, C y D; 42-I-C, 42-III-A, 47-II-B, 48-I-A y B; y las Planchas No. 48-II-A y B.
- **Municipio de Agustín Codazzi:** Se tienen las Planchas No. 34-III-C y D, 34-IV-A, B, C y D; 35-I-C, 35-III-A y C; 40-IV-B y D, 41-I-A, B, C y D; 41-II-A, B, C y D; 41-III-A, B y C; 41-IV-A y B; y la Plancha No. 42-I-A.
- **Municipio de San Diego:** Se tienen las Planchas No. 34-I-B y D, 34-II-A, B, C y D; 34-III-A, B, C y D; 34-IV-A, B y C; 40-II-B y D; y la Plancha No. 41-I-A.
- **Municipio de La Paz:** Se tienen las Planchas No. 27-IV-C y D, 34-II-A, B y D; 34-IIIB, C y D; 34-IV-A, B, C y D; 35-I-A y C, 35-III-A, 40-II-B y D, 40-IV-B, 41-I-A y C; y la Plancha 41-II-A.
- **Municipio de Manaure Balcón del Cesar:** Se tienen las Planchas No. 27-IV-C y D, 28-III-C, 34-II-B; y la Plancha No. 35-I-A.

Es de anotar que las compañías mineras cuentan con cartografía y topografía detallada de los open pits, lo que favorece la realización de estudios locales del comportamiento de las aguas subterráneas en el sistema acuífero Cesar.

De lo anterior se concluye, que en el área donde se localiza el sistema acuífero Cesar y circundantes cuenta con la cartografía base necesaria como soporte para el mapeo geológico de las unidades presentes en el territorio evaluado, siendo acorde con la Política Nacional de Gestión Integral del recurso Hídrico.

a) Cartografía geológico-estructural

Las fuentes consultadas para la descripción generalizada de las unidades geológicas del sistema acuífero Cesar son: Estudios técnicos de la Corporación Autónoma Regional del Cesar -CORPOCESAR-, Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) y Esquemas Básicos de Ordenamiento Territorial (EBOT) realizados por las Alcaldías de los Municipios de Valledupar, Bosconia, El Paso, Chiriguaná, Curumaní, La Jagua de Ibirico, Becerril, Agustín Codazzi, San Diego, La Paz y Manaure Balcón del Cesar; trabajos de grado realizados en convenios con Universidades o propios de la universidad, artículos de investigación, publicaciones de la Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH- y los trabajos realizados por parte del INGEOMINAS, actualmente el Servicio Geológico Colombiano.

b) Cartografía Geología regional del sistema acuífero Cesar

Las características geológicas del departamento del Cesar se encuentran enmarcadas en un contexto lito-tectónico diverso dada la importante interacción tectónica (fallas, suturas, pliegues) presente, que ha permitido diversificar sus ambientes geológicos y su evolución a través del tiempo; en ese orden de ideas, en el área afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edades que varían entre el Precámbrico y el reciente. Las unidades geológicas son agrupadas convencionalmente en tres regiones principales: Región Sierra Nevada de Santa Marta, Región Serranía del Perijá, Región Norte de la Cordillera Oriental y Planicie del Cesar; otras cogniciones se le han asignado desde el punto de vista de hidrocarburos como es el de la Cuenca Cesar-Ranchería (Perijá). Las rocas se encuentran distribuidas estratigráficamente en 51 unidades geológicas, sin embargo, en el Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Cesar a escala 1:250.000, se describen los siguientes grupos de rocas: "Precámbrico: *Granulitas de Los Mangos y Neis de Los Muchachitos, Ortoneis y Neis de Bucaramanga; Paleozoico: Metasedimentitas de Manaure, de la quebrada La Virgen, Grupo Cachiri, Diorita, Formación Floresta y Secuencia de la Cuchilla del Carbonal; Triásico: Formaciones Corual y Los Indios, Pórfitos Keratofídicos Verdes, Espilitas, Tonalitas y Guatapurí; Jurásico: Granitoides del Batolito de Atanques y de La Sierra Nevada de Santa Marta, Ignimbritas, Plutón Nueva Lucha, Riolitas, La Quinta , Granito Cuarzo Mozonítico, Unidad Intrusivo - Efusiva, Unidad Conglomerática del Arenal; Cretáceo: Formaciones: Umir, La Luna, Simití, Tablazo, Molino, Río Negro, Grupo Cogollo; Terciario: Formaciones: Barco, Los Cuervos, La Cuesta, Algodonal, Grupo Real, Sedimentitas de Zambrano y Lacolito Atanques; Cuaternario: Depósitos Cuaternarios. Fallas: Atiquimaqueo, Tierra Nueva, San Diego, Media Luna, Sardinata, Caracolosoto, Chorro Pital, Arenas Blancas, Golero, Ariguanisito, Palmarito, El Silencio, Pan de Azúcar, Pica, Bucaramanga, del Alto, Punta Bravo, El Carmen, Piedra Rica, Besote, de Norean, Morena, Talamaque, San Bernardo, La Gloria. Anticlinales: Becerril, de la Jagua. Sinclinal de la Jagua. Fisiográficamente, el Departamento está conformado por tres zonas principales: la Sierra Nevada de Santa Marta, al Norte, la Serranía de Perijá, al Oriente, y las grandes extensiones planas o de llanura al centro y occidente del Departamento. Estructuralmente, el Departamento del Cesar presenta dos sistemas de fallas principales que marcan el zócalo de la Sierra Nevada de Santa Marta, al Norte, y el de la Serranía de Perijá, al Oriente, fallas caracterizadas por altos ángulos de inclinación e importantes desplazamientos laterales. Los dos sistemas de fallas enmarcan amplios pliegues, poco tectonizados (INGEOMINAS, 2003b)".* (Figura 2).

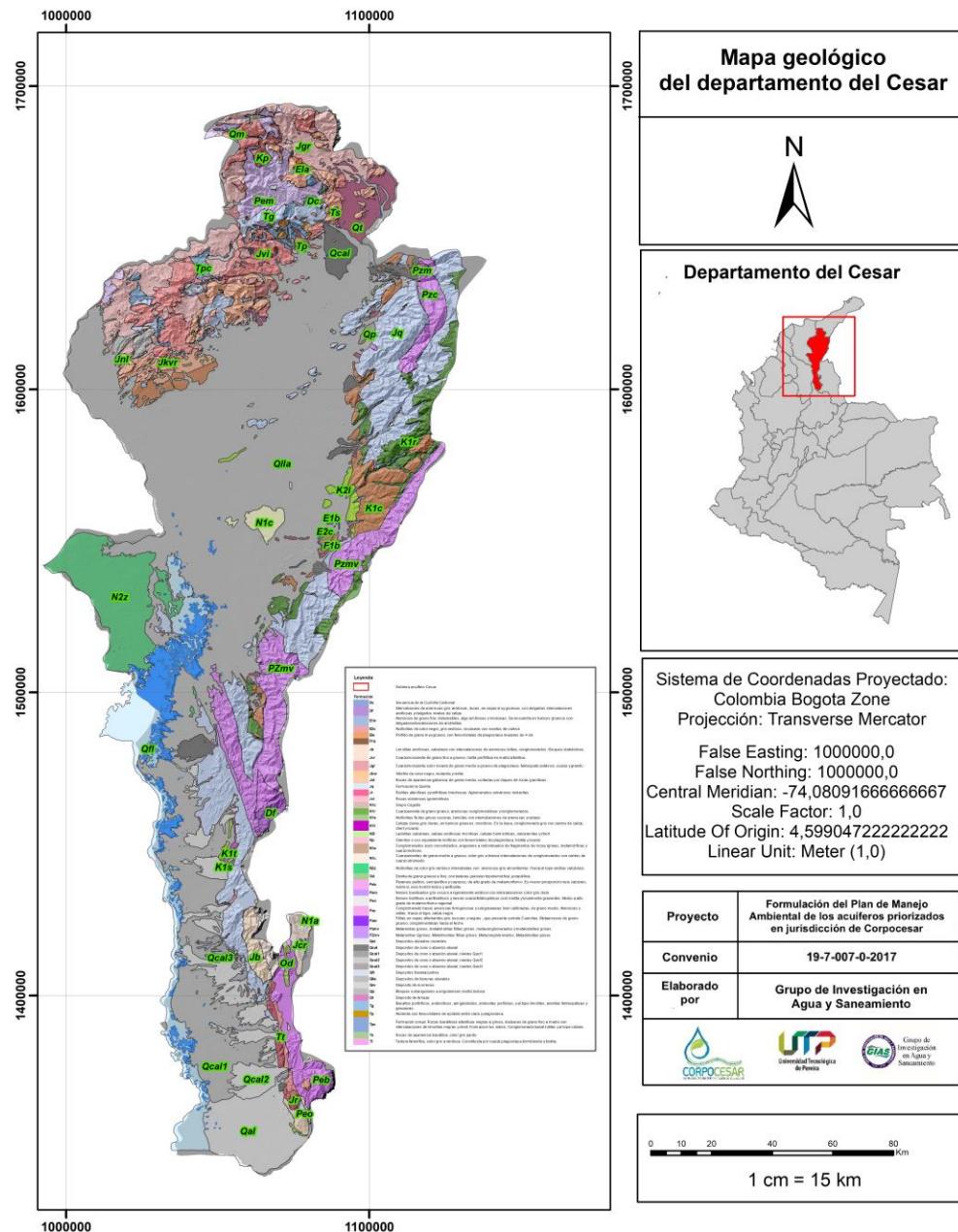


Figura 2. Mapa Geológico del Departamento del Cesar
 Fuente: INGEOMINAS (2003b). Leyenda Anexa a este documento (Anexo 1)

Drummond (2007) sintetiza la geología regional e indica que las unidades de rocas más antiguas en la cuenca Cesar-Ranchería son La Granulita de Los Mangos (neises granulíticos) de edad Proterozoica, que aflora en la Sierra Nevada de Santa Marta (Ecopetrol/Geopetrocol, 1998. En Drummond op. cit.). El Paleozoico está bien representado en la Sierra de Perijá, donde hay ocurrencias de filitas, esquistos y cuarcitas, así como de rocas sedimentarias. Las unidades del Triásico–Jurásico comprende rocas vulcanito-sedimentarias en la Sierra Nevada de Santa Marta y las capas rojas continentales y vulcanitas de la Formación La Quinta (Figura 2), la cual constituye el basamento pre-Cretácico en la Cuenca y en el Bloque de La Loma, y es conformada por

arcosas rojizas, limolitas y conglomerados intercalados con tobas, lavas de diferente composición (riolitas, dacitas, basaltos) y piroclastitas. La estratigrafía del Cretáceo está relativamente definida, conformada por una secuencia de sedimentitas clásticas denominada por Hedberg & Sass (1937. En: Drummond op. cit.) como Formación Rionegro (Figura 3).

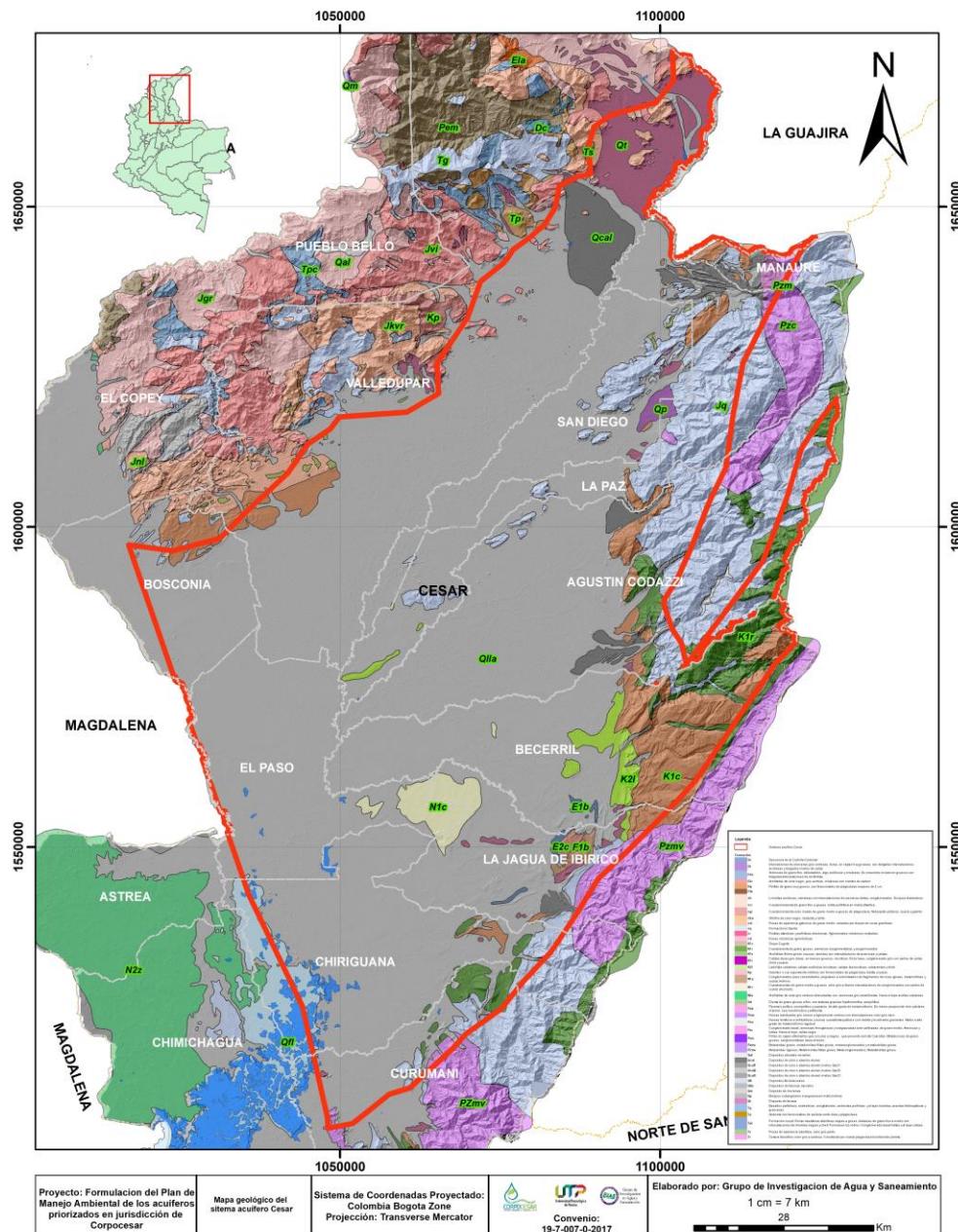


Figura 3. Mapa Geológico del sistema acuífero Cesar. Modificado del Mapa Geológico del Departamento del Cesar.
Fuente: INGEOMINAS (2003b).

2.1.1.2 Sensores Remotos

a) Procesamiento de Imágenes de Satélite

En la revisión documental fueron suministradas por CORPOCESAR dos (2) imágenes LandSat: la primera de fecha febrero 5 de 2017, de diez (10) bandas de tipo multiespectral y la segunda de fecha febrero 24 de 2016, de diez (10) bandas de tipo multiespectral (Figuras 4 y 5), las cuales no cuentan con ningún informe en el cual se plasme la información referente al análisis de las mismas.

Es importante resaltar que las imágenes LandSat permiten entre otros, realizar monitoreo de la vegetación, de las aplicaciones geológicas y hacer estudios de los recursos naturales mediante la combinación de bandas, como la 2, 3 y 4, 3, 4 y 5, las cuales permiten diferenciar los límites entre suelo y agua. De manera puntual Ordoñez y Serna (2015) realizan un análisis mediante imágenes LandSat en el proyecto carbonífero La Luna entre los años 2001 y 2015 e indican que se pueden observar cambios en los usos del suelo por actividades antropogénicas generando perdida de bosque nativo por actividades agropecuarias o por operaciones mineras. Se recomienda su análisis.

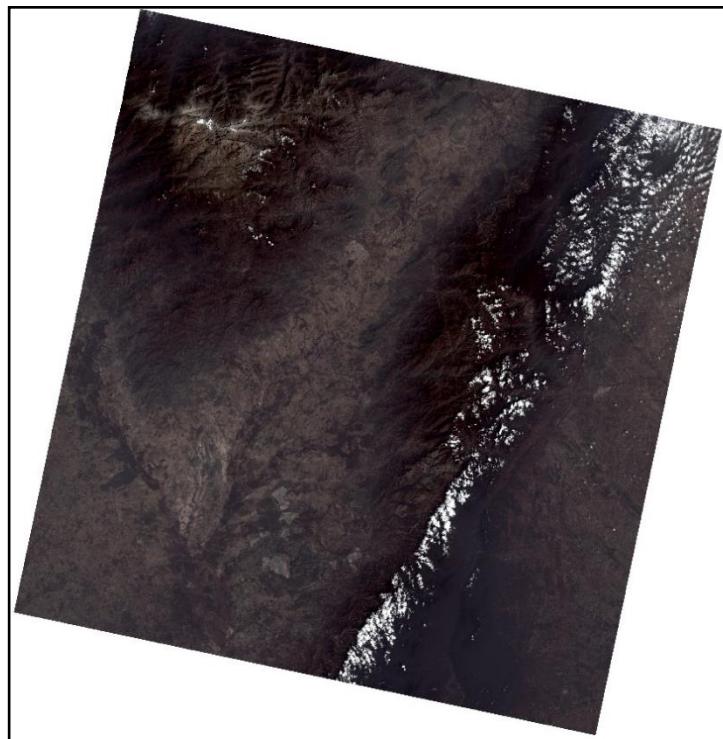


Figura 4: Imagen LandSat del 5 de febrero de 2015.

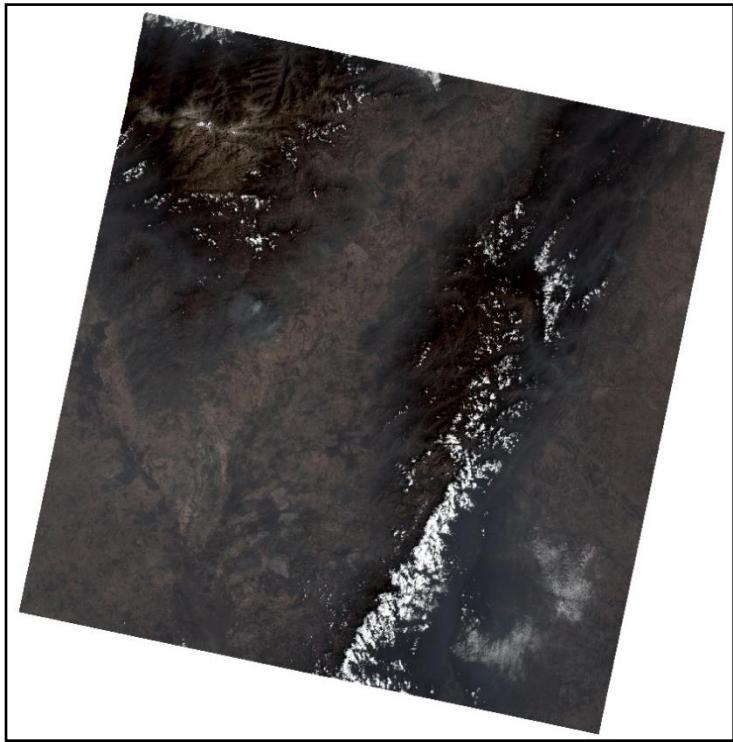


Figura 5: Imagen LandSat del 24 de febrero de 2016.

b) Radar

No se evidencia, en la información suministrada, análisis o estudios en los cuales se aplique el análisis de imágenes de radar en estudios generales o específicos en el sistema acuífero Cesar; es de resaltar que esta es igualmente una herramienta que puede aportar información en lo referente a las aguas subterráneas sumado a las imágenes LandSat.

c) Fotografías Aéreas

No se evidencia información relacionada con análisis detallados de fotografías aéreas en el acuífero priorizado que permitan construir un mapa fotogeológico a una escala adecuada como soporte de campo para la evaluación de la zona de influencia del sistema acuífero Cesar. La existencia de dicha información permite determinar contactos y zonas de posibles manantiales, morfología de cauces, modificaciones a los mismos, entre otros. Sloane (2015) realiza un análisis de fotografías aéreas (vuelo 205 y 206 C-2498 a escala 1:25.000) determinando algunos rasgos importantes como dinámica del Río Cesar, entre otros.

d) Altimetría

En términos generales el departamento del Cesar presenta alturas desde los 0 m.s.n.m. hasta los 5200 m.s.n.m., este último correspondiente al pico Colón que se encuentra asociado a la Sierra Nevada de Santa Marta.

La extensión de la Serranía de Perijá es de 425 km, con un área aproximada de 556000 hectáreas, en un rango altitudinal de 500 a 3550 msnm. Las mayores alturas son Cerro Pintao (3300 msnm), Sabana Rubia (3250 msnm), el Cerro El Avión (3550 msnm), y el Cerro Tres Tetas (3450 msnm). Además, el 66% equivalente a 370000 hectáreas del área de la Serranía está en la zona de Reserva Forestal los Motilones (Gómez et al., 2010; en Aristizábal, 2016).

2.1.2 Geología General

A continuación, se realiza una breve descripción de las diferentes unidades geológicas y de mayor relevancia presentes en el sistema acuífero Cesar, las cuales son citadas según la bibliografía disponible.

Formación Guatapurí (TRg-Tg)

Aflora en la parte media del río Guatapurí, de donde toma su nombre, y desde el sitio conocido como La Estación hasta el arroyo Lajas cerca de la carretera Valledupar -Bosconia. La unidad está dividida en dos miembros: La parte basal está conformada por basaltos porfiríticos, basaltos andesíticos amigdaloides, andesitas, andesitas porfiríticas, volcánicos piroclásticos, keratófidos, espilitas y, ocasionalmente, brechas y conglomerados con fragmentos subangulares, este conjunto presenta colores de gris verdoso a gris claro que por meteorización se tornan anaranjados a rojizos, con algunas intercalaciones sedimentarias; y la parte superior está compuesta por limolitas rojas a moradas, con intercalaciones de rocas volcánicas, areniscas feldespáticas, arcosas y grauvacas, con intercalaciones tobáceas y de otras rocas volcánicas. La secuencia posee un espesor de 3000 a 5000 m. Aflora al NW – NE del municipio de Bosconia (CORPOCESAR e IDEAM, 2006).

Formación La Quinta (Jqv)

Conformada por depósitos clásticos, areniscas arcósicas, lutitas y conglomerados rojos; hacia la parte media por flujos andesíticos, basálticos, brechas y tobas; en el municipio de Codazzi, se encuentra definida por la presencia de limolitas rojas silíceas, ocasionalmente arenosas y comúnmente fracturadas; en el Cerro Porrilla se presentan intercalaciones de arena fina, con venas de calcita, areniscas blancas, pardas y rojas, con niveles conglomeráticos (Olarte y Hernández, 2005).

El INGEOMINAS (2010), hoy Servicio Geológico Colombiano, subdividen en dos segmentos dicha unidad, la primera en una basal (Segmento A, 400 m de espesor, en Manaure) conformada por sucesiones de rocas volcánicas efusivas (flujos de lava traquíticos a andesíticos) de composición máfica a intermedia, rocas piroclásticas (tobas), conglomerados, paquetes de conglomerados volcanoclásticos, arenitas gruesas y limolitas rojas arcósicas a subarcósicas; localmente se presentan intrusiones de pequeños cuerpos hipoabisales porfiríticos (filones) de composición gabróica (diabasas); por último, se presenta al tope (Segmento B, 1250 m de espesor, en Manaure) una sucesión monótona de rocas siliciclásticas finas (arenitas y limolitas generalmente arcósicas, arcósicas líticas y líticas feldespáticas), de color rojo, de composición arcósicas, intercaladas localmente con rocas volcánicas efusivas acidas (piroclásticas y diabasas), shales, limolitas calcáreas y calizas; y finalmente la conforma una sucesión siliciclásticas conglomerática arenosa de colores

rojizos, de 600 m de espesor intercalados con lentes de arenitas conglomeráticas, marcando la acumulación de La Quinta.

CORPOCESAR y la Universidad del Magdalena (2011) la describen como una secuencia de tobas cristalinolíticas, lodolitas y arenitas tobáceas, arenitas rojo grisáceas, tobas cristalinas alternadas con lapillitas, aglomerados, aglomerados lodosos y lavas (dacíticas a andesíticas); silos pseudoestratiformes, macizos, sin estructura de flujo (andesita a andesita basáltica y basalto). En ocasiones, esta unidad es atravesada por ignimbritas oscuras y hacia el tope se encuentran localmente intercalaciones de tobas líticas que meteorizan a colores blanco o blanco amarillento, comúnmente intercaladas con estratos medianos a gruesos de areniscas blancas, pardas y rojizas de grano fino a grueso, y niveles conglomeráticos que tienen guijos de cuarzo lechoso, con estratificación inclinada y cruzada y capas que se acuñan. Concluyen además que el ambiente para esta unidad es continental-epicontinental influenciado por vulcanismo explosivo andesítico (Clavijo, 1996; En: CORPOCESAR y la Universidad del Magdalena, 2011).

Grupo Cogollo (K1c)

Se extiende en la región sur de la Sierra Nevada de Santa Marta, sobre los cerros y estribaciones ubicados sobre el piedemonte al nororiente de Bosconia, al norte de la Hacienda Chimalaima y de la Inspección de Policía de los Venados. Se encuentra constituida por caliza en un 60%, caliza arcillosa en un 15% y de lutita en un 25% que es más abundante hacia el techo donde la cantidad de caliza decrece. La caliza es de color gris claro, en bancos delgados a medios, algunos presentan abundantes fósiles de bivalvos, atravesados por venillas de calcita (CORPOCESAR e IDEAM, 2006).

CORPOCESAR y La Universidad del Magdalena (2011) indican que litológicamente se encuentra constituido, de base a techo, por una potente sucesión de calizas grises azuladas y grises oscuras, mayores de 5 m de espesor, que varían de mudstone a grainstone con intercalaciones ocasionales de lutitas negras carbonosas y abundante contenido de fósiles; son frecuentes en esta parte la presencia de dolinas y algunas cavernas con stalactitas y stalagmitas.

Para INGEOMINAS (1995) esta unidad está confirmada por calizas en 60%, caliza arcillosa en un 15% y en un 25% por lutitas hacia el tope; siendo la caliza de color gris claro; además, de la parte media hacia el techo se distingue un nivel lodolítico carbonoso y moscovítico, otro arenito arcilloso y uno más superior calcáreo, con calizas lumaquélidas de color gris claro con abundante paleofauna. Es de resaltar que, para la cuenca del Río Cesar, esta unidad cuenta con un espesor que varía entre los 1200 y 3000 m y se encuentra concordante con la Formación La Luna y transicional sobre la Formación Río Negro a localmente discordante sobre la Formación La Quinta (CORPOCESAR y La Universidad del Magdalena, 2011).

Formación Lagunitas

Conformada por calizas macizas fosilíferas con intercalaciones de “shale” negro; yace concordantemente sobre las arenitas de la Formación Río Negro, pero al norte, yace discordantemente sobre la Formación La Quinta. La edad considerada para esta unidad es Barremiano a Aptiano, la cual fue depositada en un ambiente que varía de rampa interna a rampa media, oscilando el espesor entre 180 y 138 m, respectivamente. G&G (2001: en Drummond, 2007) midió 161 m de esta unidad en el área de Bosconia

yaciendo sobre un conglomerado basal delgado de la Formación Río Negro. Algunos pozos en la Subcuenca del Cesar perforaron la Formación Lagunitas y el espesor considerado varía entre 342.6 y 198.5 m. (Drummond, 2007).

Esta formación por sus características composicionales es potencial como acuífero debido a la porosidad primaria generada por disolución que genera importantes cavernas o cavidades, además de ser potenciales para la ocurrencia de porosidades secundarias por fracturamiento y posterior interacción con aguas subterráneas o meteóricas.

Formación Aguas Blancas

Esta unidad, se encuentra conformada por tres miembros denominados de base a techo Áimas, Tocuy y Guayacán. El Miembro Las Áimas se encuentra conformado por calizas negras intercaladas con "shales" negros fosilíferos con concreciones calcáreas. El Miembro Tocuy está constituido por areniscas de grano medio glauconíticas con intercalaciones de calizas arenosas y "shale". Por último, al Miembro Guayacán (Maracas) lo componen calizas negras, macizas. La edad de la unidad es Aptiano Tardío a Cenomaniano. G&G (2001. En: Drummond, 2007) describió las facies más abundantes como "mudstones", "wackestones", las cuales son las más abundantes, y algunos shales terrígenos presentes en los Miembros Guayacán y Áimas, relacionados con deposición en una rampa externa a media de carbonatos. El Miembro Tocuy conformado por sedimentos de facies de grano grueso tales como "packstone" y "grainstone:", y en la parte más Oriental de la subcuenca por arenitas glauconíticas y calcáreas, permitiendo de manera general considerar un ambiente deposicional puede variar de rampa interna de carbonatos a marino somero siliciclástico (Drummond, 2007).

En superficie, esta formación se ha medido parcialmente y el espesor estimado puede llegar a los 750 m. El espesor medido por G&G (op. cit.) varía entre 50 m en el área de Bosconia al Oeste, 134.5 m en la sección La Jagua-Animitas y 349 m en las secciones La Jagua-Palmita, Áimas-Caño Hondo (Drummond, op. cit.).

Formación La Luna (K2I)

Al Grupo Cogollo le suprayacen concordantemente calizas bituminosas finamente laminadas, alternando con lutitas negras bituminosas sobre las cuales descansan algunos niveles de chert, que según Cáceres y Camacho (1980) fueron depositados entre el Turoniano y el Coniaciano, denominada Formación La Luna. Esta formación consiste de iodolitas calcáreas negras, "shales", calizas y algunas limolitas silíceas ("cherts"?) hacia la mitad inferior de la unidad (Drummond, op. cit.).

De acuerdo a lo que describe G&G (2001: En: Drummond, 2007), la Formación La Luna está conformada por iodolitas, limolitas silíceas y algunas arcillolitas terrígenas que se interpretan como depositadas en un ambiente de rampa externa de carbonatos, presentando un espesor de 69 m en la sección La Jagua-Codazzi/Fernambuco. En los pozos realizados en el área, se han reportado espesores de la Formación La Luna variando entre 131.6 m en el pozo Cesar H1X a 355 m en el pozo El Paso 3.

Formación Molino (K2m)

Secuencia de lutitas arenosas con intercalaciones finamente laminadas de calizas y areniscas glauconíticas de grano fino, conforman esta unidad, que es a su vez dividida en el Miembro Tres Esquinas presentando un horizonte rico en fósiles que también se observa hacia el tope de la Formación La Luna en el Valle Medio del Magdalena (Geotec, 1994: En: Drummond, 2007). Sobre el Miembro Tres Esquinas, se describe una sección de 30 m de espesor compuesta por calizas y margas que se ha denominado Miembro Tocuy. Sobre el Miembro Tocuy descansa una sucesión de lodoletas carbonosas grises, pobremente laminadas, intercaladas con capas delgadas de calizas y arenitas. La edad de la Formación Molino es Paleoceno Inferior para la parte superior, a Campaniano hacia la base (Intera/Bioss, 1995: En: Drummond, op. cit.). La sección tipo de la Formación Molino mide 500 m. La mayoría de los pozos han perforado parcialmente dicha formación, variando el espesor reportado entre 1136 m en el pozo El Paso-3 a 501 m en el pozo Los Venados (Drummond, 2007).

Formación Barco (E1b)

Está compuesta por areniscas grises, lutitas y arcillolitas intercaladas. El espesor varía entre 0,3 y 20 m, con estratificación cruzada. Localmente se encuentran láminas de micas carbonáceas y lutitas. El espesor de la formación, según la literatura, varía entre 76 y 278 m (INGEOMINAS, 2003b).

El tope de la Formación Molino está marcado por el cambio de lodoletas marinas grises glauconíticas, fosfáticas y areniscas de grano fino a lodoletas transicionales carbonáceas color gris oscuro del Miembro Inferior de la Formación Barco, el cual a su vez, presenta altas lecturas de radiación gamma y bajas resistividades, lo que evidencia litologías de grano fino. La descripción de los núcleos indica que estas rocas fueron depositadas en ambientes estuarinos de baja energía (PRODECO, 2006-2007).

Formación Los Cuervos (E2c).

Esta es considerada como la principal formación carbonífera de la cuenca del Cesar y está constituida por arcillolitas, limolitas, areniscas, mantos de carbón y algunos lentes de calizas. Es común encontrar restos de plantas, por lo que se asigna una edad entre el Paleoceno y Eoceno Inferior. El espesor de los mantos de carbón varía desde unos pocos centímetros hasta unos 4 m (Figura 6).

Las características generales de los carbones son las siguientes: tabulares con respaldos de arcillolitas shales, bandeados, que varían en espesor y litotipo a través de la secuencia, según el manto y el sector, los cuales presentan niveles de shales carbonosos, lentes de óxidos y carbonatos de hierro, con impurezas de azufre como elemento nativo y como sulfuros, pirita diseminada (INGEOMINAS, 2003b).

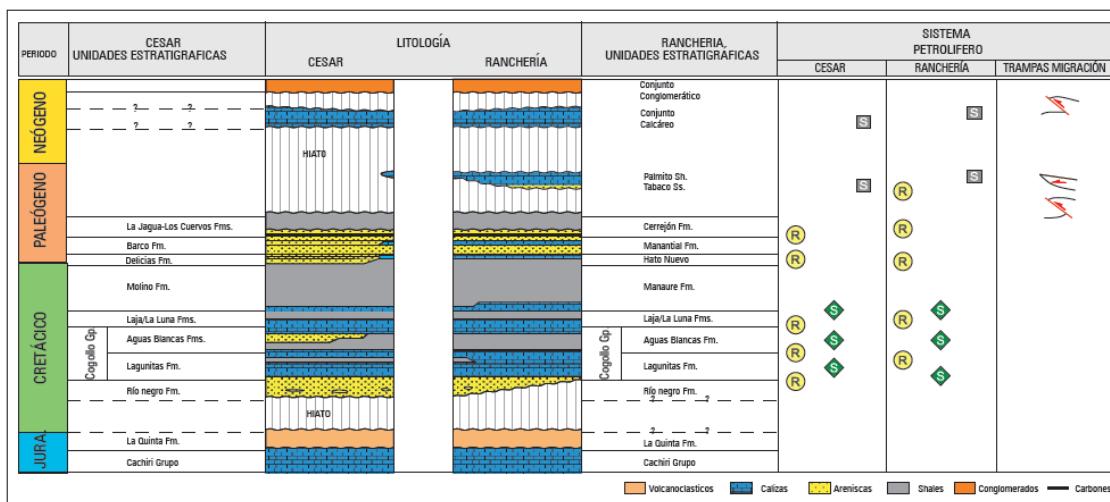
La Formación Los Cuervos, constituye la unidad portadora de los carbones y en el área ha sido dividida en tres miembros (Drummond, 2002: En: PRODECO, 2006-2007).

Miembro Inferior. Constituido, principalmente, por arcillolitas y limolitas de color gris a gris medio, intercaladas con bancos de arenisca, cintas y capas de carbón.

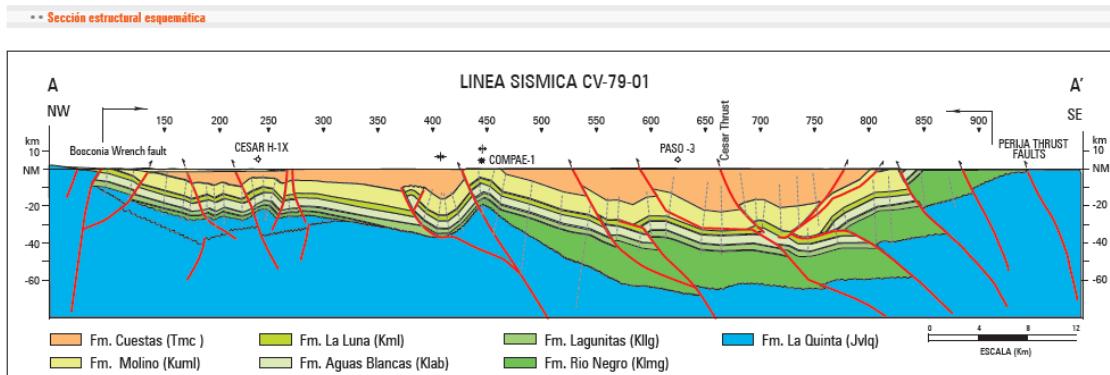
Miembro Medio. Corresponde al nivel carbonífero productivo, conformado por una secuencia de arcillolitas, limolitas, arenitas y mantos de carbón con espesores mayores a 1.0 m.

Miembro Superior. Con dominio de arenitas de color gris claro a medio, grano fino a medio, cuarzosas, intercaladas con limolitas y arcillolitas.

Hacia el techo del Miembro Superior arenoso de la Formación Barco, se observa una sucesión que presenta altas lecturas de radiación gamma y bajas resistividades, asociadas al Miembro Inferior de la Formación Cuervo, que comprende lodoletas carbonáceas, shales carbonosos y limolitas grises que fueron depositadas en llanuras de inundación y bahías de baja energía dentro de ambientes fluvio-estuarinos (Drummond, 2007).



Carta estratigráfica y sistema petrolífero de la cuenca Cesar-Ranchería.



Sección geológica de la subcuenca Cesar. Modificado de ICP (1998).

Figura 6. Estratigrafía generalizada de la cuenca Cesar-Ranchería y línea sísmica CV-79-01. Fuente: ANH, 2007.

Formación Mirado (E2m)

Esta unidad según el INGEOMINAS (2003b) aflora en el Sinclinal de la Jagua de Ibirico y la escriben como un conjunto de areniscas ligeramente conglomeráticas, carbonosas, arcillolitas carbonosas en la parte media-alta, con intercalación de areniscas de cuarzo, y areniscas grises ligeramente conglomeráticas hacia el tope, presentando espesores variables (10 m medido en cerro piedra).

Formación Cuesta (Nc1- Nc2)

Se encuentra suprayaciendo la Formación Los Cuervos y conforma una serie de cadenas de colinas orientadas al noroccidente. Esta Formación, depositada en un ambiente continental, la componen estratos de conglomerados y areniscas que conforman la unidad acuífera más importante del área sur del acuífero priorizado. Los conglomerados se encuentran interdigitados con areniscas deleznables, limolitas y arcillolitas, con suelos de color rojo y con topografías ligeramente onduladas, presentando un espesor de 38 m en el área de Plan Bonito (INGEOMINAS, op. cit.).

Depósitos de Terrazas (Qt)

Hacia la zona del Guatapurí existe la presencia de hasta 3 niveles de terrazas, con espesores no mayores a 25 m y localmente entre los 10 y 15 m; la identificada en La Jagua de Ibirico es considerada la de mayor extensión, con granulometrías y gravas, cantes y arenas embebidos en una matriz arenolimosa que presenta un espesor de 100 m (INGEOMINAS, 2003a y b).

Depósitos de Abanicos Aluviales (Qcal)

En términos generales, esta unidad está conformada por los abanicos de Valledupar (10 km de extensión), Manaure (gravas polimíticas, espesor entre los 25 y 70 m) y la Jagua de Ibirico (gravas polimíticas, espesor de 100 m), alcanzando hasta los 5 Km de extensión; otros como el de Codazzi y Casacará, están conformados por fragmentos de gravas acordes con las zonas de aporte (limolitas rojas, calizas, rocas volcánicas, etc.) y espesores no mayores a los 10 m. Es de anotar que los suelos en la región de Manaure y La Jagua de Ibirico no son importantes debido a la aridez de los mismos, a diferencia de los de Codazzi y Casacará, donde se observa mayor desarrollo de suelos indicando interacción con los niveles de agua en la zona media. De manera general, estos han sido divididos según la pendiente, en proximal (alto, sedimentos gruesos; Qcal3), medio o de transición (Qcla2) y distal (Qcal1). En este último se presentan los sedimentos más finos, con espesores de 100 m en la parte alta, pero variable entre los 30 y 60 m (INGEOMINAS, 2003a y b). En la descripción de la Plancha 48 “Jagua de Ibirico” dividen los abanicos en Depósitos de abanicos de piedemonte 1 (Qapl1) que para la zona del Paso-La Loma presenta espesores variables entre 5 y 25 m, Depósitos de abanicos de piedemonte 2 (Qapl2) aflorantes hacia la parte central de la plancha y Depósitos de abanicos de piedemonte 3 (Qapl3).

Depósitos de Llanuras Aluviales (Qlla)

Unidad definida por los depósitos más recientes generados por las corrientes principales que recorren la cuenca del Cesar; presenta espesores variables, granulometrías finas y está conformada por arenas, limos y arcillas, cubiertas por un delgado nivel de gravas finas de orden centimétrico de espesor ; es de resaltar que se presentan de manera sectorizada depósitos asociados a afluentes de gran importancia en la cuenca como es el caso del Río Ariguaní, donde se reporta un depósito limo arcilloso generando la denominada Fosa de Ariguaní (INGEOMINAS, 2003a). Algunos depósitos presentan espesores variables desde los 100 m al sur, en cercanías del Río Cesar y entre los 5 y 25 m entre El Paso, La Loma y La Jagua de Ibirico, zonas donde los contrastes con las rocas más antiguas no permiten una buena delimitación. Entre Chimichagua y Arjona

no existe una cobertura aluvial reciente, solo presentándose niveles de gravas discordantes con un espesor de 5 m.

Depósitos Aluviales Recientes (Qal)

Esta unidad se refiere a los depósitos recientes ubicados en los valles intramontanos de los ríos mayores y que no presentan un contacto directo con el Qlla. Son considerados como acumulaciones locales y espesores pequeños, depositados en el fondeo de valles profundos de algunos ríos y quebradas, en mesetas y sabanas donde divagan de manera transitoria y pierden energía las corrientes que los transportan. En general, están constituidos por capas de limos arenosos, arcillas, mezclas de arcillas y limos, y arenas gravosas a gravas arenosas, arenas cuarzosas y gravas finas intercalados con capas delgadas y discontinuas de limos y arcillas. Otros valores de espesores para esta unidad son los indicados por Drummond (op. cit) que oscilan de 20 a 30 m en el Norte y Nor-Oriente, a 50 y 200 m al Sur-Occidente.

2.1.3 Geología Estructural

2.1.3.1 Fallas

En términos generales el departamento del Cesar y en particular el acuífero priorizado se encuentra contenido en una zona de deformación importante, donde las fallas según diversos autores, marcan los principales rasgos estructurales. De estas fallas se citan las de Bucaramanga-Santa Marta (Falla Inversa de alto ángulo y una zona de cizallamiento de 5 Km de ancho), Cesarito, San Diego-Cuatro Vientos, Media Luna (inversa de alto ángulo), Caracolito, Caracolí, Garupal, Chorropital, Arenas Blancas (inversa de alto ángulo con componente dextral), San José, Sardinata, Perijá (Inversa de bajo-alto ángulo), Santa Cruz (Normal y desplazamiento vertical), Sominca (Inversa de alto ángulo), Cerro Largo, Poponte (Inversa de alto ángulo), Las Pizarras, Del Hierro (inverso de mediano a bajo ángulo), El Pancho (Inversa de alto ángulo), La Mochila, Los Corazones (Inversa con un salto de 40 m), San Diego-Cesar (Controla al parecer el Río Cesar en su Cuenca media y baja), Cuatro Vientos- San Diego o Cerrejón al norte (inversa de bajo ángulo), Las Piletas, La Trinidad, Zabaneta, Canime (normal de alto ángulo) y la Nueva Granada (inversa de alto ángulo) (Figura 7).

A nivel regional las rocas Terciarias se encuentran afectadas por esfuerzos tectónicos, los cuales se manifiestan mediante pliegues tipo sinclinales y anticlinales entre los que sobresalen los de La Loma, El Descanso y El Boquerón, productos de una fase compresiva con orientación noroeste.

En la zona minera se describen de Sur-Oriente a Nor-Occidente las siguientes fallas: Zona de Falla de Arenas Blancas (Interpretada como una falla lístrica buzando al SE que cambia de rumbo al NE), Zona de Falla de La Aurora (Falla de cabalgamiento lístrica de alto ángulo y con vergencia al NW, con retrocabalgamientos locales), Zona de Falla de Becerril, Zona de Falla de El Tigre (Falla con vergencia al NW a falla de cabalgamiento de despegue lístrica con un importante desplazamiento en rumbo), Zona de Falla de El Hatillo (conformada por dos niveles estructurales siendo el ultimo un abanico imbricado de cabalgamientos buzantes al SE) y Zona de Falla del Cesar (Falla de cabalgamiento con vergencia al NW y retrocabalgamientos menores) (Drummond, 2007). (Figura 8).

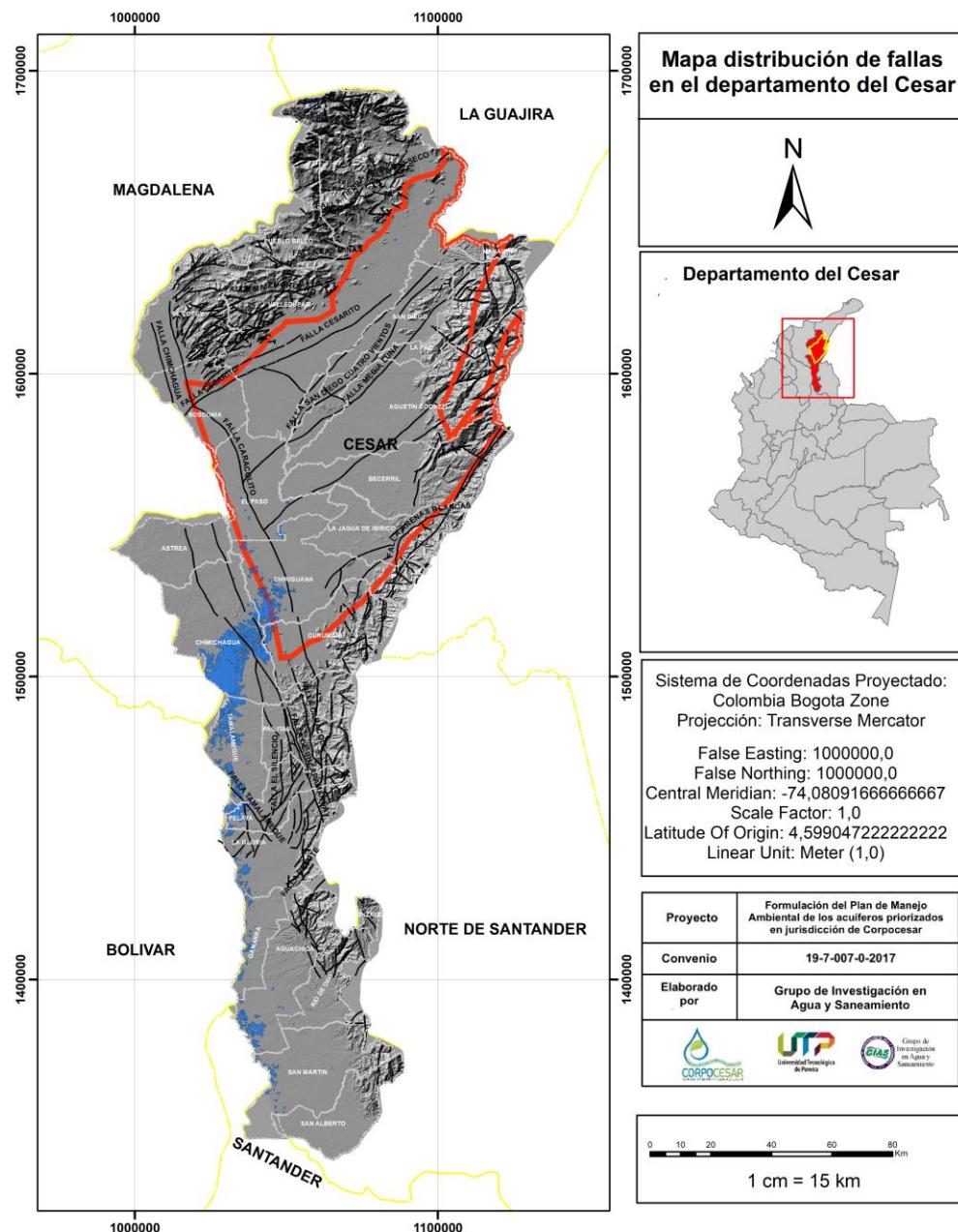


Figura 7. Mapa de distribución de las fallas en el Departamento del Cesar.

Fuente: INGEOMINAS (2003b)

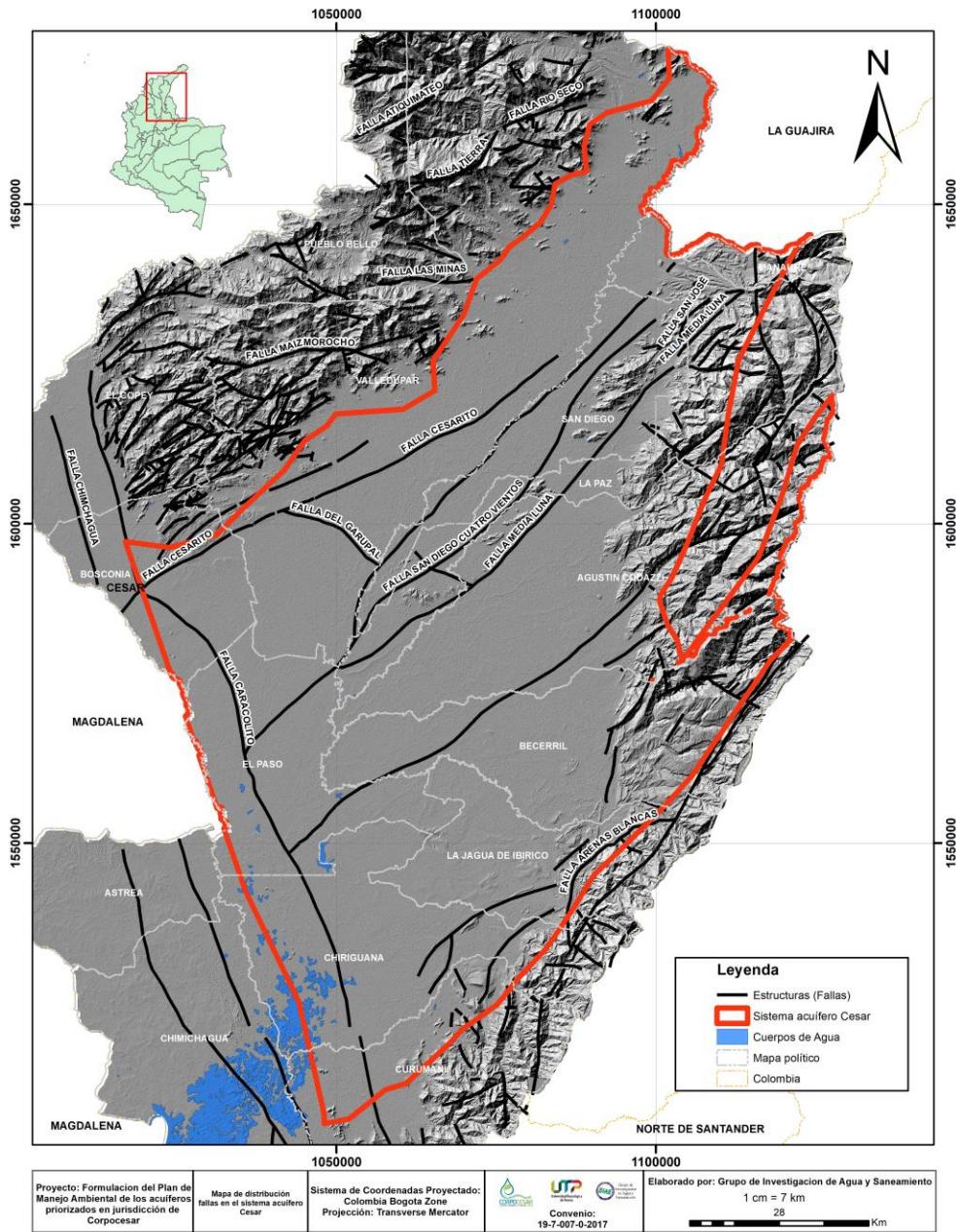


Figura 8. Mapa de distribución de las fallas, según bibliografía, en el sistema acuífero Cesar, en el cual se incluyen las zonas mineras.

2.1.3.2 Pliegues

El Área Carbonífera La Loma se encuentra afectada por tres estructuras sinclinales de dirección noreste - suroeste, denominadas El Descanso, La Loma y El Boquerón.

Los pliegues anticlinales se encuentran, generalmente, erosionados, excepto el Anticinal La Loma, que se ubica entre los sinclinales La Loma y El Boquerón. Los pliegues son afectados regionalmente por las fallas inversas El Hatillo y El Tigre, que tienen una orientación noreste - suroeste. Dentro de los sinclinales se observan fallas locales, de tipo inverso, con dirección noreste - suroeste, como son las fallas Delgas, Descanso, La Loma, Calenturitas, Norte, La Envidia y Rosario; también, existen algunas fallas de rumbo.

Para la descripción de los pliegues se toma en este documento la realizada por Drummond (2007) dado su grado detalle y área de influencia directa, como también otros autores (INGEOMINAS 2003a y b, entre otros), estos son:

Sinclinal de La Loma

El Sinclinal de La Loma es la estructura central de la Sub-cuenca, donde la unidad portadora de carbones sub-aflora al Nor-Oriente en el cierre de la estructura, en forma de un sinclinal estrecho fallado por su eje y se hace progresivamente más amplio hacia el Sur. En general los flancos tienen buzamientos de 20 a 40 grados. El flanco Oriental es controlado por la Falla del Tigre y el Occidental por el sistema de fallas de La Aurora. En la porción Sur de la estructura se une con el Sinclinal El Boquerón formando un amplio sinclinorio. Las profundidades máximas alcanzadas en el área más profunda de la estructura son -1900 m.s.n.m.

Sinclinal El Boquerón

El Sinclinal El Boquerón está limitado al Occidente por la Falla del Tigre y al Oriente por el sub-afloramiento de la Formación Cuervos. El cierre Norte es una estructura suave en la que actualmente se desarrolla la operación minera de Mina Pribbenow, el flanco Oriental de la estructura sub-aflora por debajo de una cobertura aluvial que varía entre 15 y 70 m de espesor. En este flanco, la unidad presenta buzamientos en el rango de 5 a más de 40 grados. Los mayores buzamientos están asociados a la zona de deformación de la Falla de La Aurora, en la porción Sur de la estructura. El cierre meridional del Sinclinal está controlado por la Falla La Aurora.

Sinclinal El Descanso

Es una estructura con un eje de rumbo aproximado N 45° E. El flanco Oriental fue cortado por la acción de la Zona de Falla El Hatillo, la cual es de cabalgamiento regional con vergencia Oeste. El Sinclinal del Descanso limita hacia el SE con la Falla Santa Teresa la cual corresponde a una falla de cabalgamiento con vergencia Oeste. Hacia el SW la estructura se convierte en el flanco Oeste de un sinclinal que continua profundizándose al Sur hasta ser completamente erodado por acción de la discordancia post-Eocena.

Sinclinal de La Jagua

Es una estructura con una orientación N- 45°- E, con una longitud de 9 Km y un ancho de 2.5 Km, siendo amplio en el costado Sur y estrecho hacia el Norte. Se considera una estructura estable poco deformada y sin fallas que afecten la continuidad de los mantos. Tiene un cabeceo de bajo ángulo hacia el SW y buzamiento de 25 ° y Hacia el sur, la estructura es amplia y se cierra al norte con un cabeceo al W. La dirección del eje es N55oE (+10°). El sinclinal afecta rocas de la Formación Los Cuervos. Es un sinclinal abierto con un

buzamiento en sus dos flancos entre 10° y 35°). (PBOT La Jagua de Ibirico, 2000 y PMA solicitud de Legalización de Minería de Hecho No. 0234-20, 2007).

Anticinal De La Jagua

Estructura asimétrica ubicada al este de La Jagua de Ibirico, afecta principalmente rocas del Miembro Medio de la Formación Los Cuervos. El eje presenta una dirección de N25°E (10°) con un plunge de 3° hacia el N. En el flanco oriental, las capas buzan entre 35-45° y en el flanco occidental 15-35°. Constituye el rasgo morfológico más prominente dentro del área, el alto topográfico conocido como la Loma Corazones. Se encuentra fallado en su flanco oriental (PMA solicitud de Legalización de Minería de Hecho No. 0234-20, 2007).

Sinclinal de Los Corazones

Corresponde a una estructura pequeña localizada al SE del sinclinal de La Jagua y al NW del anticinal de Cerro Largo, se distingue como un bloque aislado limitado por fallas, de bajo interés económico por no presentar mantos de carbón. Sus buzamientos son suaves, de 8° a 20° (PBOT La Jagua de Ibirico, 2000).

Anticinal Loma Corazones

La estructura tiene un eje de dirección N-75°-E, con cabeceo hacia el SW y un buzamiento promedio de 15°, limitado por las fallas de los Corazones y Santa Cruz que lo separan del sinclinal de La Jagua y de Loma Corazones (PBOT La Jagua de Ibirico, 2000).

Sinclinal de Loma Redonda

Corresponde a un pliegue suave y asimétrico. Su eje presenta una dirección N-25°-E y aparece limitado al Norte por la falla Santa Cruz, al Este por la Falla Loma Redonda y al Sur por la Falla Sominca y Potrero (PBOT La Jagua de Ibirico, 2000).

Anticinal de Cerro Largo

Se presenta como una loma alargada en su flanco oriental, donde se puede seguir la continuidad de los mantos de carbón. Está orientado casi paralelo al eje sinclinal de La Jagua. El flanco occidental se encuentra fallado, formando dos bloques, uno cercano al eje, conformando un valle suave y el otro corresponde al flanco oriental del sinclinal de La Jagua. Posee una longitud aproximada de 5 Km por 1.5 Km de ancho (PBOT La Jagua de Ibiríco, 2000).

Anticinal de Becerril

El anticinal de Becerril es una estructura en el subsuelo, que se presenta al oeste de la Jagua de Ibirico y se prolonga hacia el norte hasta cerca del Municipio de este nombre, el núcleo de esta estructura lo constituyen rocas cretáceas, (García, C., 1.990; En: EOT Becerril, 2001).

Anticinal Arenas Blancas

Anticinal que afecta a las rocas paleógenas y neógenas que afloran al sur de La Jagua de Ibiríco y forman un cerro aislado con dirección NE, localizado al norte del área de estudio.

Sinclinal Nueva Granada

Localizado en el sector oriental, hacia las estribaciones de la Serranía de Perijá con una orientación N35-45°E. En el flanco occidental, los buzamientos de las capas están entre 20-30° y en el flanco oriental entre 30-60°. La estructura se observa hacia NE del área, está conformado por las rocas de los miembros Medio e Inferior y su núcleo se encuentra altamente erosionado (PMA solicitud de Legalización de Minería de Hecho No. 0234-20, 2007).

Sinclinal Ojinegro

Sinclinal asimétrico al noroccidente de la Loma Corazones de dirección N20°E (+20°); de aproximadamente 1,50 km, fallado sobre el límite occidental y continuo hacia el este. Altamente erosionado por manifestarse sobre las rocas del Miembro Superior de la Formación Los cuervos, su cierre se ubica hacia el N. Conforma una cuenca de captación cuyo drenaje principal es la Quebrada Ojinegro. Los buzamientos del flanco W oscilan entre 15-25° y los del flanco E son de aproximadamente 20-30° (PMA solicitud de Legalización de Minería de Hecho No. 0234-20, 2007).

2.1.4 Levantamiento de Columnas Estratigráficas

En términos generales se cuentan con levantamientos estratigráficos en diversos sectores de la cuenca del Cesar y específicamente los realizados por las compañías mineras presentes en la zona al sur de la cuenca; además, se cuentan con los estudios de investigación realizados en la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta en temática específica de cartografía, estratigrafía y procedencia de las unidades aflorantes, lo cual permite realizar correlaciones estratigráficas y geofísicas con las unidades presentes, como también determinar la continuidad de las mismas y su variación tanto vertical como horizontal. Algunos trabajos son INGEMINAS (2003a y b) y Ayala-Calvo (2009); no obstante, estas no fueron levantadas con fines hidrogeológicos. Algunas columnas levantadas son las presentadas por parte de los solicitantes de permisos de aguas subterráneas, en las cuales se describen de manera general las características geológicas del pozo, permitiendo identificar cuáles son las unidades saturadas presentes en la zona y las características de diseño de algunos pozos (Figuras 9, 10, 11 y 12).

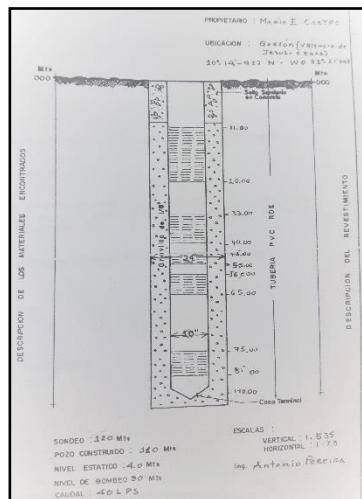


Figura 9. Diseño y descripción litológica de pozo localizado en la Finca Garzón.

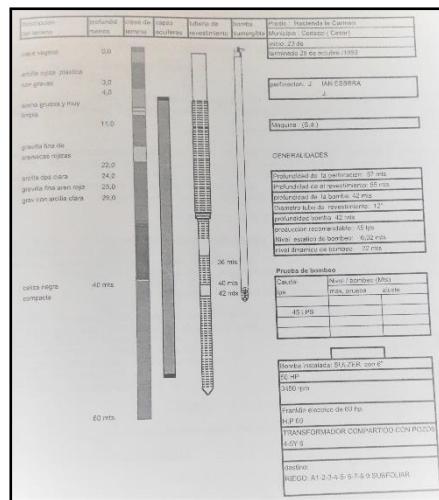


Figura 11. Diseño y descripción litológica, en el cual se incluye la profundidad de la bomba y el caudal.

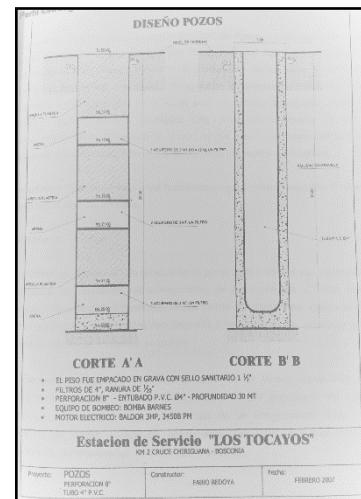


Figura 10. Diseño y descripción litológica de pozo localizado en la estación de Servicio “Los Tocayos”.

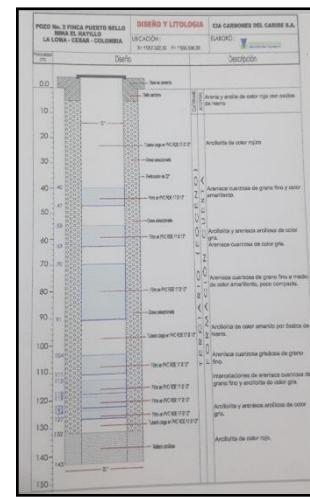


Figura 12. Diseño y descripción litológica, Finca Puerto Bello, Mina El Hatillo.

2.1.5 Análisis de Testigos de Perforaciones

Como bien se sabe la cuenca del Cesar-Ranchería posee uno de los yacimientos más importantes de carbón de edad terciaria del país, cuenta además con un potencial importante en ocurrencia de hidrocarburos y gas dadas las condiciones geológicas de las rocas cretácicas presentes en dicha cuenca. Esto ha llevado a que se tenga un registro importante de perforaciones profundas como las citadas por la ANH (2007), en las cuales se perforaron diversos posos a profundidades entre los 892 a los 3538 m con el fin de localizar las unidades generadoras de hidrocarburos; se cuenta además con las perforaciones exploratorias realizadas por Drummond, PRODECO y Sloane con el fin de cuantificar los recursos minerales presentes en la zona carbonífera, los cuales cuentan con registros de pozo y en algunas casos con testigos de los mismos (Figuras

13 y 14). Es de resaltar que estos pozos no fueron realizados confines hidrogeológicos, por lo tanto, son pocos los que cuentan con registros geoeléctricos de pozo u otro tipo de análisis (ej. Ayala-Calvo, 2009).



Figura 13. Testigos de perforación realizados por la CIA PRODECO en el proyecto carbonífero del Cesar, en el cual se observa la zona de transición del cuaternario al terciario. Longitud de la canal 1m.



Figura 14. Testigos de perforación realizados por la CIA PRODECO en el proyecto carbonífero del Cesar, en el cual se observa el cuaternario (arriba) y la unidad terciaria (abajo). Longitud de la canal 1m.

2.1.6 Geomorfología

IGAC (1997) establece de manera general, que el departamento del cesar se encuentra conformado geológica y geomorfológicamente por tres (3) unidades morfoestructurales como son: 1) Sierra Nevada de Santa Marta, 2) Serranía de Los Motilones o Perijá y 3) Cuenca de Sedimentación de los ríos Magdalena y Cesar; además, subdividen estas unidades teniendo en cuenta la naturaleza del sustrato, características paleoclimáticas heredadas, distribución espacial de los suelos y diferencia de materiales, permitiendo determinar cinco (5) paisajes según Zinck (1981, en: IGAC, op. cit.) como son: 1) Montaña-M, 2) Lomerío-L, 3) Piedemonte-P, 4) Valle-V y 5) Planicie-R.

Hacia la margen oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta se encuentra presentes unidades denominadas “*Vertientes medias degradadas en posición de abrigo*”, que corresponden a los espacios intermedios entre las divisorias cordilleranas y grandes cañones; es el área de mayor concentración de resurgencias (nacimientos de aguas). Se identifican como áreas que captan agua y aportan sedimentos a las corrientes hacia los espacios altitudinalmente inferiores (IDEAM, 2010).

Otras geoformas, según el estudio del IDEAM (2010), presentes en el área de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta y Perijá son: 1) escarpes cóncavos en retroceso, 2) conos (casco urbano de Valledupar) y terrazas medias y altas (Río Cesar y Ariguaní, Fundación y sus afluentes), 3) Glaciares y Nevados 4) superficies de aplanamiento residuales con cobertura volcánica (macizos antiguos), 5) superficies de aplanamiento residuales sin cobertura volcánica, y 6) superficies de aplanamiento residuales muy degradadas (peneplanicies terciarias).

Las unidades geomorfológicas del departamento y las definidas para el acuífero priorizado según el IDEAM (2014a), son las presentes en los municipios de Valledupar, Manaure, La Paz, San Diego, Agustín Codazzi, Bosconia, Becerril, El Paso, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y Curumaní, debido a que sus formas de relieve coinciden con las unidades geológicas presentes en la cuenca del Río Cesar. Las unidades geomorfológicas son principalmente diez (10) que según la clasificación de la Unidades Geomorfológicas realizada por INGEOMINAS (1995; Figura 16), son codificadas de la siguiente manera: Vc-a (Acumulación de materiales de origen Aluvial cálido seco), Vc-c (Modelado denudacional en aluviones y rocas sedimentarias, Llanura aluvial de piedemonte, en clima cálido seco), Vc-d (Terrazas aluviales en climas cálido secos) y Vc-e (Modelado Fluvioglaciado, Llanura aluvial de pie de monte en clima cálido seco), VM-d (Llanura Aluvial de pie de monte, depositación de materiales finos aluviales), CS-e-i (Colinas Estructurales denudativas de erosión, cálido seco), CSi-j (Colina estructurada denudativa química y disolución de carbonatos, clima cálido seco), MSe-f (Erosión remoción en masa, MSe-a (Montañas estructurales denudativas) y MSi-i (Montañas denudativas en ambientes cálidos húmedos y en materiales ígneos) (Figura 15).

A continuación se describen de manera general las unidades identificadas en los recorridos de campo para el sistema acuífero Cesar, que a su vez son concordantes con las unidades o conjuntos de unidades geológicas presentes en la cuenca, las pendientes y los procesos naturales morfogénicos, como también acordes con la madurez del relieve; por lo tanto, se definen principalmente cuatro (4) unidades geomorfológicas (UG), que son correspondientes a relieves altos, moderados y bajos (estructurales denudativos), con colinas de pendientes fuertes (cañones) moderadas (partes demedias de las cuencas) a suaves, en cercanías a los aluviales, y cimas agudas a subredondeadas (formas marginales) a puntualmente aplanadas y cuchillas alargadas a rectas (Figura 16).

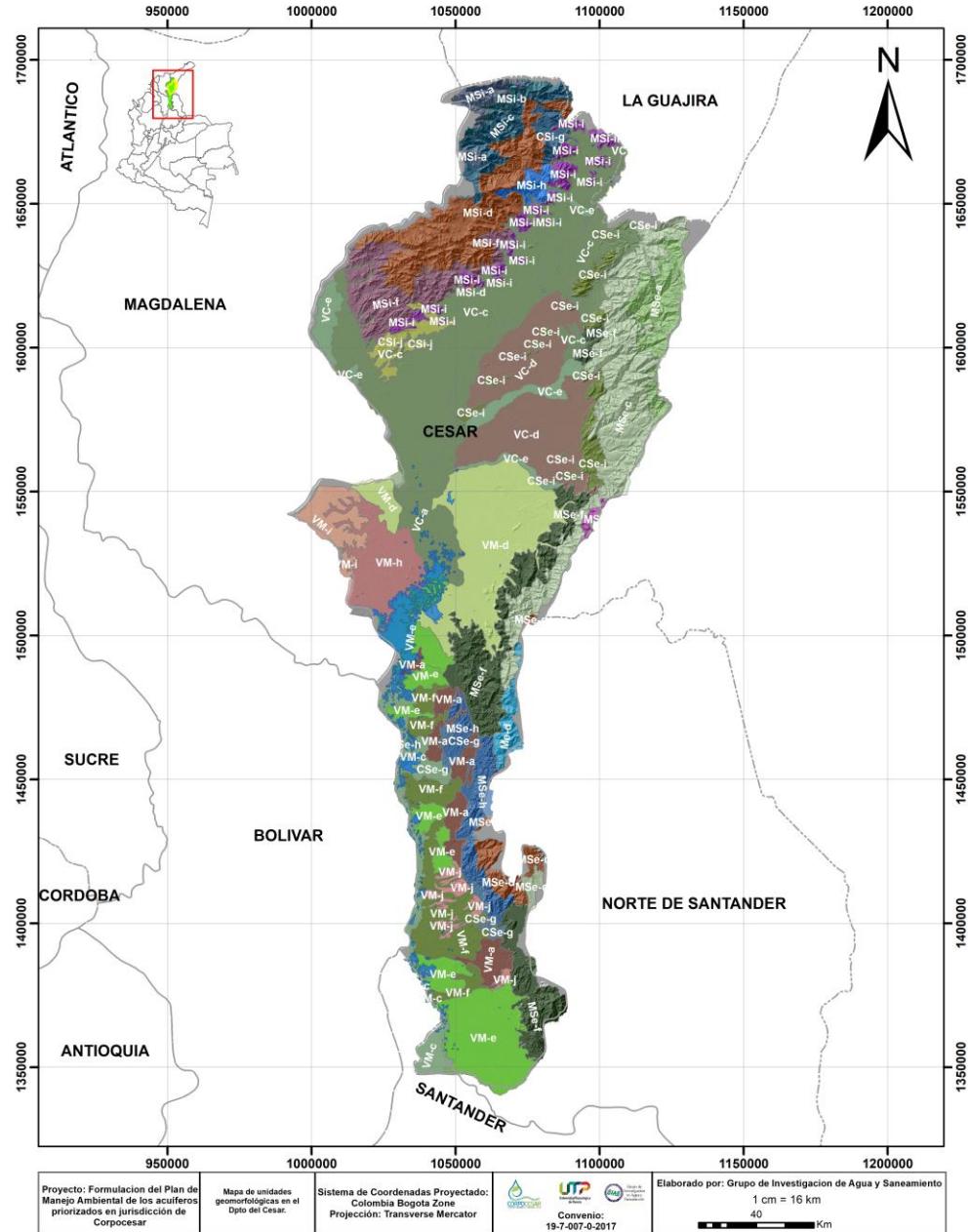


Figura 15. Mapa de unidades Geomorfológicas del Departamento del Cesar.

Fuente: INGEOMINAS (1995)

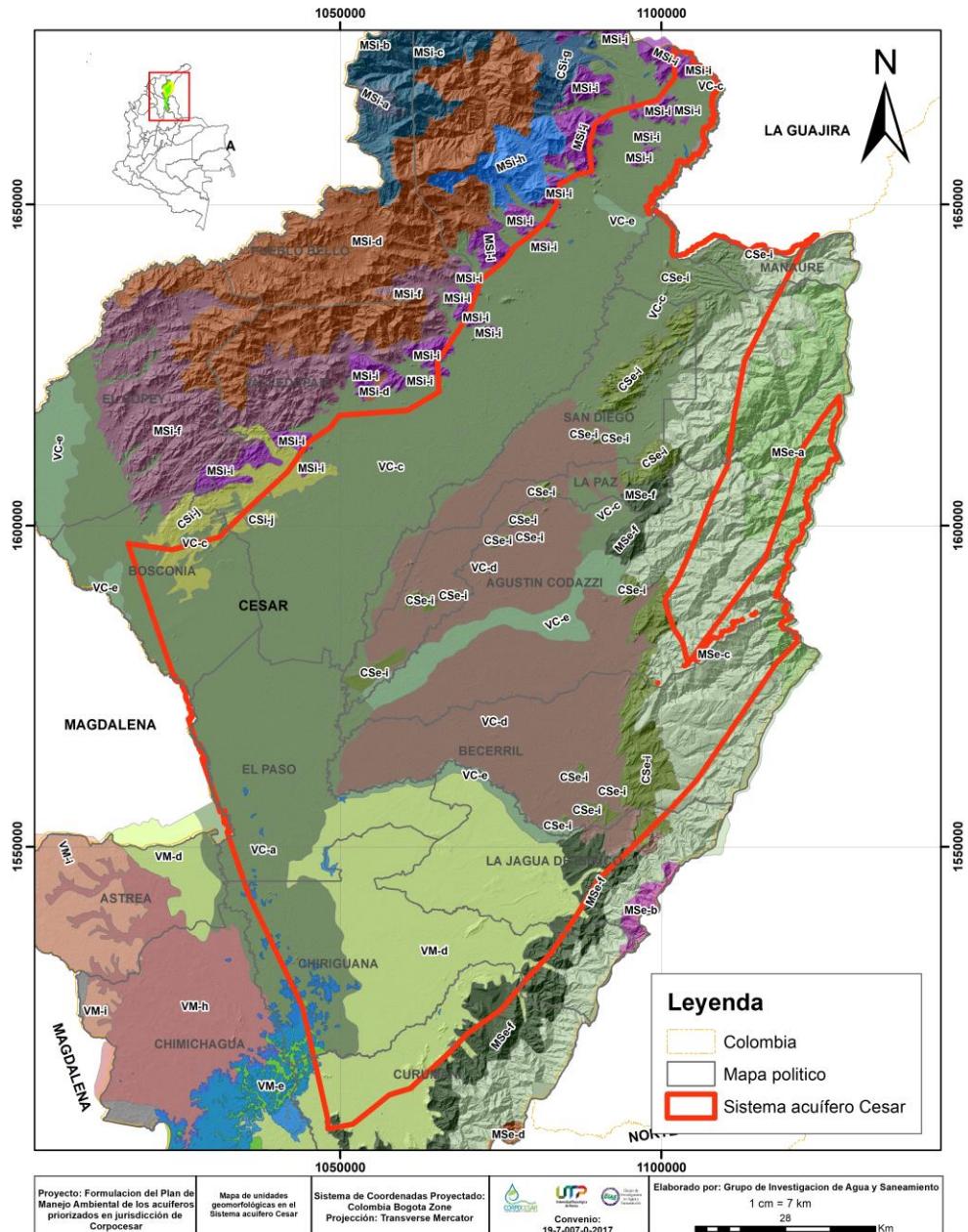


Figura 16. Mapa de unidades geomorfológicas en el sistema acuífero Cesar.

Fuente: INGEOMINAS (1995).

2.1.6.1 Unidad Geomorfológica Uno -UG1- (Llanuras Aluviales y Depósitos Recientes)

Las llanuras y depósitos aluviales recientes, incluidos de manera general en los abanicos y terrazas aluviales, sabanas y llanuras de inundación, se encuentran claramente confinados al norte-noroeste por la Sierra Nevada de Santa Marta (municipios de Bosconia y Valledupar) y al este-sureste por la Serranía del Perijá (municipios Manaure, La Paz, San Diego, Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y el

Paso); esta unidad corresponde al relieve dominante en extensión de la zona, el cual se encuentra conformado por amplias llanuras de inundación principalmente asociadas a los cauces de orden 1 o 2 de la cuenca del Río Cesar y hacia la zona sur por las ciénagas; está conformada por relieves planos, cóncavos a convexos y topografías planas con altimetrías se encuentran entre los 50 hasta los 200 m.s.n.m. (Olarte y Polo, 2005); hacia la Serranía del Perijá se asocia a los abanicos confinados (Figuras 17 a la 20).

Estas llanuras aluviales son el resultado de la modelación de los sedimentos erosionados de las geoformas marginales de la cuenca. Están conformadas principalmente por sedimentos finos transportados por las corrientes con bajas velocidades que permiten su deposición y por ende el modelado de la llanura debido a los cambios en la dirección de la corriente; sus relieves son planos, semiplanos a ondulados, disectados por cauces más jóvenes de la cuenca, siendo los más susceptibles a que en períodos de invierno sean inundables; es de anotar que en estas formas se pueden observar sub unidades como conos de deyección, terrazas aluviales en general (altas, medias y bajas), aluviones y aluviales recientes (PBOT La Jagua de Ibirico, 2000).



Figura 17. Morfologías levemente inclinadas asociadas a abanicos colgados, encajados en rocas sedimentarias antiguas. Panorámica municipio de Manaure.



Figura 18. Morfologías planas asociadas al Valle del Río Cesar, que contrasta localmente con intervenciones antrópicas. Sector Minas de CNR, El Hatillo.

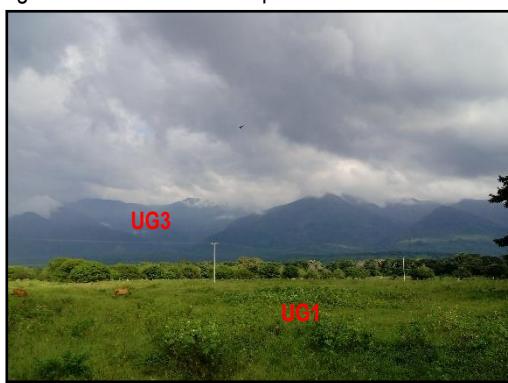


Figura 19. Panorámica de las geoformas presentes hacia la parte baja de la Serranía del Perijá, sector Guasimoto. Se Observa ligeramente abanico aluvial colgado.

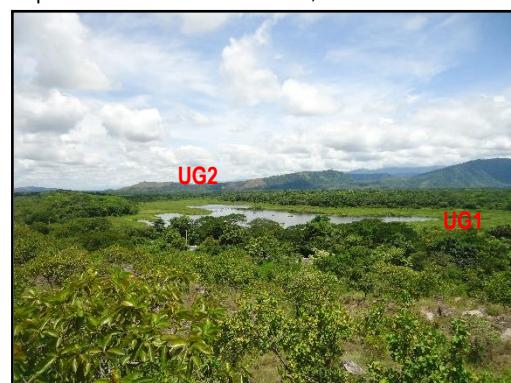


Figura 20. Panorámica de las geoformas presentes hacia la parte baja de la Serranía del Perijá, sector de La Sierra, encajadas entre unidades de roca.

Las geoformas con geometrías de abanico más importantes identificadas en la cuenca del Río Cesar y que presentan drenajes generalmente de tipo dicotómico son: 1) Abanico aluvial de Valledupar (asociado al Río Guatapuri), 2) San José de Oriente-Manaure, 3) Guasimito, 4) Agustín Codazzi, 5) Casacara-LLerasca, 6) Becerril, 7) Curumaní, y 8) Valencia de Jesús principalmente; éstas presentan relieves ligeramente inclinados, con pendientes entre 5° y 10° hacia el ápice, convexos y topografías ligeramente planas, en algunos casos específicos se presentan fuertemente incisados debido a que son, probablemente, más antiguos y obedecen a la actividad tectónica de la región, conformando sistemas de abanicos coalescentes.

En los flancos del valle, en jurisdicción de La Jagua de Ibiríco y Becerril, predominan conos y abanicos que forman terrazas, mesas, planicies de piedemonte y cuestas. En algunas áreas estos abanicos se han inclinado suavemente existiendo un rasgo tectónico centrado sobre la falla de Arenas Blancas y otras asociadas (PBOT La Jagua de Ibiríco, 2000).

En términos generales a esta geoforma se asocian las morfologías de origen denudacional (colinas residuales pequeñas-D3 y colinas o montañas denudadas-D6), denudacional-estructural (filos rocosos-S7), origen fluvial (lechos de río-F1, terrazas medias-F2 y terrazas medias denudadas-F3) y planicies de inundación (POT Chiguaná, 2000).

2.1.6.2 Unidad Geomorfológica Dos -UG2- (Colinas Bajas o Intermedias Estructurales Denudativas)

Estos relieves se encuentran asociados principalmente hacia la transición entre las geoformas planas y el pie de monte (Sierra Nevada de Santa Marta y del Perijá), presentando relieves ondulados moderadamente disectados, altimetrías bajas; es de resaltar que algunas de estas geoformas se encuentran de forma aislada rodeadas por formas planas quedando a manera de islas, presentando drenajes de tipo anular o radial centrifugo. Se caracterizan por presentar relieves ondulados, quebrados a escarpados en zonas de pie de monte, con pendientes menores a 7% (Olarte y Polo, 2005), son típicas las cimas subredondeadas y cuchillas rectilíneas a sinuosas, presentando pendientes moderadas, con desarrollo de drenajes paralelos a subparalelos (Figuras 21 y 22). Es de resaltar que en algunas zonas carentes de vegetación se observan escalones generando cuchillas alargadas con cimas agudas y relieves escarpados debido al plegamiento de las unidades de roca que las conforman, presentando drenajes ligeramente centrípetos en los núcleos de los pliegues y sub dendrítico a “trellis”, en anticlinales, desarrollados en zonas de presencia de arcillas o rocas sedimentarias de grano fino.

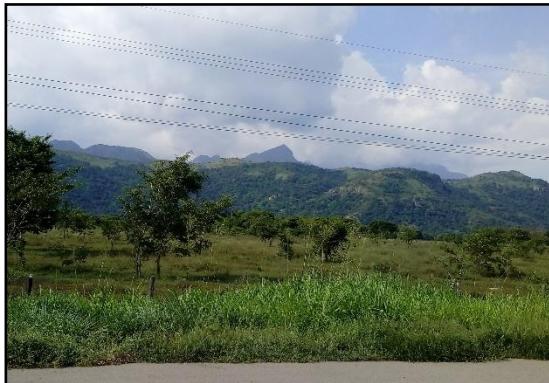


Figura 21. Panorámica de las geoformas presentes hacia la parte baja de la Sierra Nevada de Santa Marta, sector de Mariangola. En esta imagen se identifican las unidades geomorfológicas de la zona.



Figura 22. Panorámica de las geoformas presentes hacia la parte baja de la Serranía del Perijá, sector Rincón Hondo. Se Observa el contraste entre unidades con altimetrías diferentes.

En diversos lugares estas geoformas se asocian a unidades terciarias aflorantes en el pie de monte y parte media de la Sierra, formando laderas con altimetrías variables, con relieves ondulados a fuertemente ondulados, con disección moderada e intervenidas en las zonas mineras por dicha actividad económica (PBOT La Jagua de Ibirico, 2000); además, presentan pendientes mayores al 7%. Las colinas constituyen un paisaje sobre superficies de denudación, con procesos erosivos muy dinámicos, debido a la pendiente dominante (7-25%) y a la escasez de vegetación (EOT Becerril, 2001).

En términos generales a esta geoforma se asocian las formas de origen denudativo (plano denudacional-D1, pendiente denudadas-D2, Pie de laderas-D3, colinas o montañas denudadas-D4 y conos de deyección-D5), formas de origen denudacional-estructural (cuestas-S2, colinas aisladas-S4 y depresión estructural-S8) y formas de origen fluvial (lechos de ríos y terrazas bajas-F1 y terrazas medias-F2 (POT Chiriguaná, 2000).

2.1.6.3 Unidad Geomorfológica Tres -UG3- (Colinas Altas o Montañas Estructurales Denudativas)

Estas formas se encuentran asociadas específicamente a la Sierra Nevada de Santa Marta y del Perijá, las cuales se extienden desde las unidades geomorfológicas intermedias hasta las partes altas de las serranías, ocupando la menor extensión en el área del acuífero priorizado; presentan procesos erosivos moderados de manera puntual. Esta geoforma presenta vertientes alargadas con cuchillas rectilíneas a ligeramente sinuosas, relieves escarpados, pendientes mayores al 25%, a localmente con relieves ondulados con pendientes menores (Olarte y Polo, 2005). En los alrededores del municipio de Bosconia esta morfología es descrita como formas de relieves fuertemente escarpada, pendientes mayores a 50%, relacionada a las formas periféricas a la Sierra Nevada de Santa Marta y a las rocas ígneas de carácter intrusivo y volcánicas aflorantes en la zona (Boada y Chavarro, 2006).

En las partes altas de la Serranía, el relieve es escarpado, con pendientes mayores al 25% en su parte alta, en la zona de piedemonte su relieve es ondulado con pendientes menores, zonas donde el modelado del paisaje ha generado laderas ligeramente inclinadas a escarpadas; es de resaltar que dicha topografía escarpada y compleja permite el desarrollo de subpaisajes o unidades geomorfológicas de menor magnitud

como coluviones, aluviones, escarpes, lomeríos, colinas y taluds (PBOT La Jagua de Ibirico, 2000). Esta unidad de piso Subandino, muestra un relieve quebrado a escarpado, con pendientes mayores al 25% en su parte alta; en la zona de piedemonte su relieve es ondulado con pendientes menores (EOT Becerril, 2001) (Figuras 23 y 24).



Figura 23. Panorámica de las geoformas presentes hacia la parte media-alta de la Sierra Nevada de Santa Marta. Se Observa el contraste entre unidades con altimetrias diferentes.

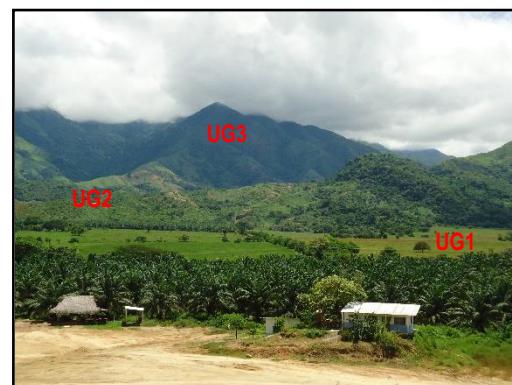


Figura 24. Panorámica de las geoformas presentes hacia la parte baja de la Serranía del Perijá, sector de La Sierra. Se Observa el contraste entre unidades con altimetrias diferentes.

En términos generales a esta geoforma se asocian las formas de origen denudativo, pendientes denudadas-D2 y D5, colinas o montañas denudadas-D6, depresión denudacional-D7, formas de origen denudativo-estructural, cuestas-S2, escarpes-S1, espada de puerco o “Hog Backs”-S3, colinas aisladas-S4, filos rocosos-S5 y depresión estructura-S8 (POT Chiriguaná, 2000).

2.1.6.4 Unidad Geomorfológica Cuatro -UG4- (Antrópicas)

Otra de las unidades consideradas como parte del relieve de la cuenca, son las generadas por los grandes movimientos y explotaciones de roca y material estéril producto de la explotación económica de carbón entre los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico y Becerril principalmente, al igual que los pits generados para la explotación y algunas lagunas o piscinas de sedimentación que originalmente no hacían parte de las formas presentes en el área (Figuras 25 y 26).

Estas formas en general, se caracterizan por presentar relieves escalonados debido a que son necesarios para realizar la disposición de los estériles en la escombrera; presentan cimas aplanas, alargadas y formas geométricas (rectangulares y trapezoidales) a manera de terraplenes de gran extensión; además, presentan drenajes artificiales para la recolección de escorrentías superficiales y canales perimetrales que permiten igualmente la recolección de escorrentías y filtración de los estériles de mina; algunos de estos presentan procesos de remoción en masa importantes.

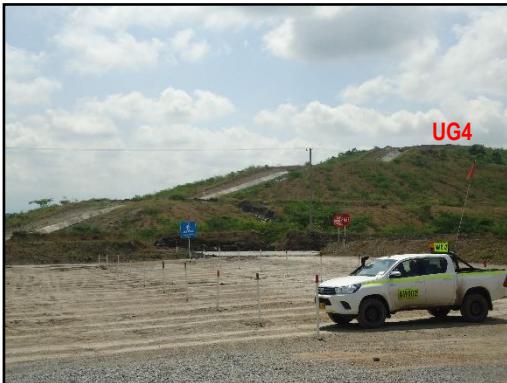


Figura 25. Panorámica de las geoformas antrópicas presentes en la operación minera de PRODECO, las cuales presentan un estado importante de recuperación.



Figura 26. Panorámica de las geoformas antrópicas presentes en la mina el Hatillo de la compañía CNR, se observa un leve proceso de revegetalización.

Otras formas de carácter local, están conformadas por los lagos artificiales, piscinas de oxidación y botaderos, las cuales se distribuyen ampliamente en la cuenca del Cesar; éstas son consideradas como geoformas antrópicas toda vez que no hacen parte del relieve original, son generadas por intervención humana y de una manera u otra pueden generar impactos sobre el terreno, subsuelo y el paisaje.

2.1.7 Suelos

Las unidades descritas corresponden a las de los estudios generales de suelos realizado por el IGAC (1997) y las presentadas en el Atlas Ambiental del Cesar a escala 1:500.000; en éste último, describen los principales suelos típicos presentes en el departamento del Cesar, como los son los suelos de montaña, suelos de lomerío, suelos de piedemonte, suelos de valle y suelos de planicie; además de describir las propiedades de los suelos, el uso actual del suelo, la génesis, la clasificación de las tierras por capacidad del uso y la zonificación biofísica (Figura 27). Esta información además fue utilizada para el análisis de vulnerabilidad del acuífero.

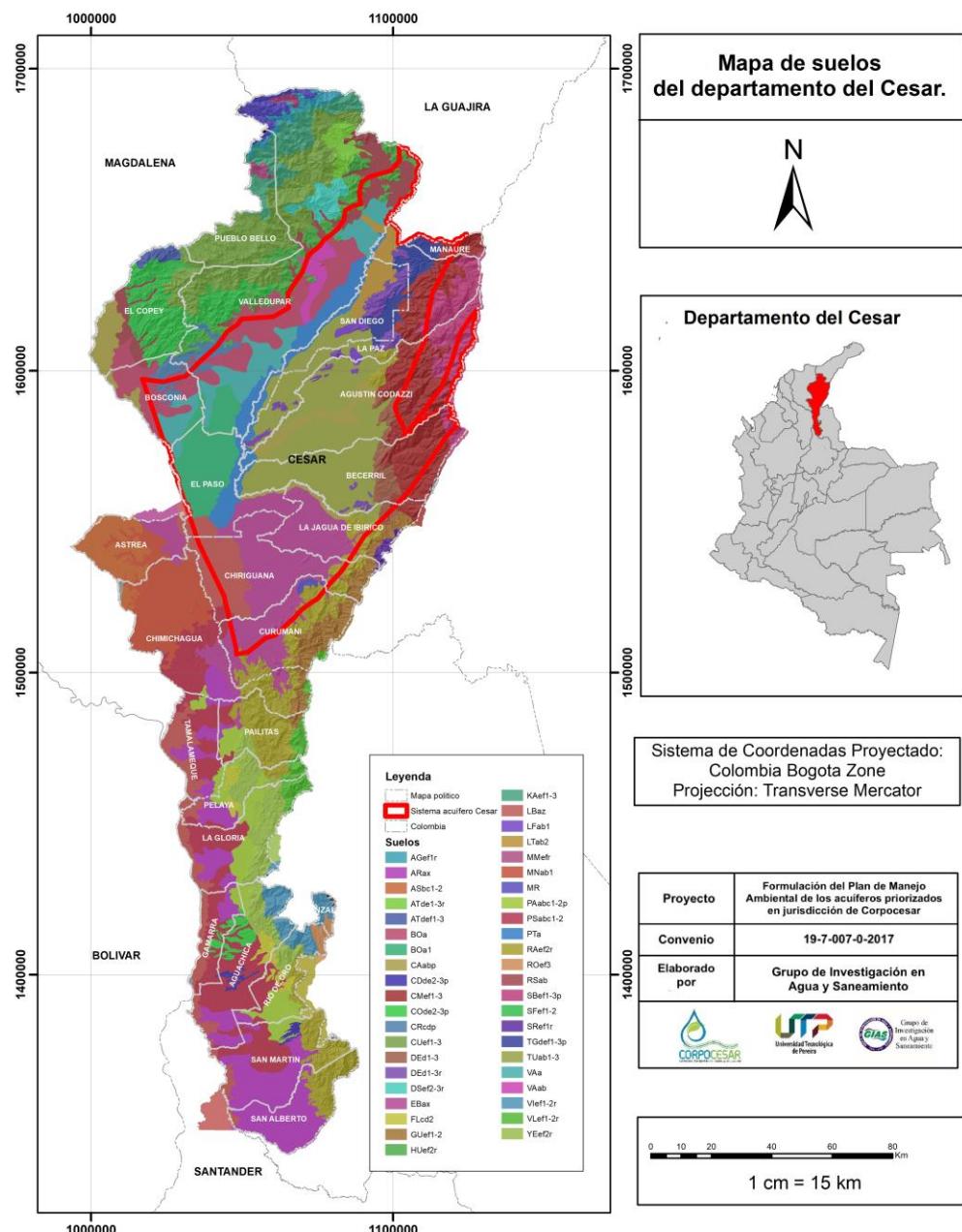


Figura 27. Mapa de suelos en el Departamento del Cesar.

2.1.8 Usos del Suelo

Los usos potenciales del suelo se asocian con los usos tradicionales que en su mayoría están relacionados con condiciones culturales; se agrupan a partir de las limitaciones, restricciones y la vocación de uso que tienen en la zona (Figura 28); estos usos provienen de la jerarquización de las unidades de cobertura,

teniendo en cuenta criterios fisonómicos de altura y densidad aplicables a estudios más detallados (IDEAM, 2010).

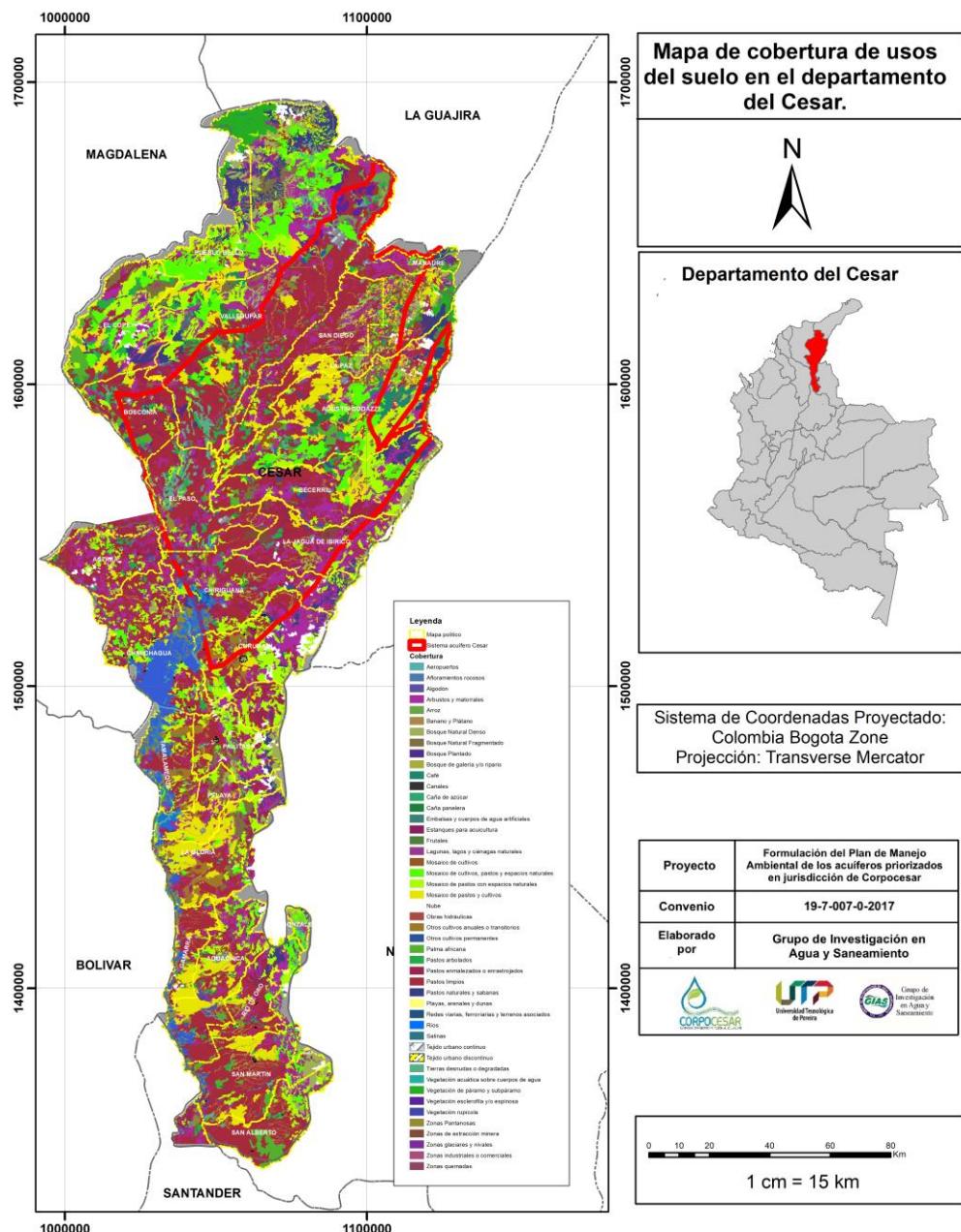


Figura 28. Mapa de cobertura de usos del suelo en el Departamento del Cesar. IDEAM (2010). Para descripción consultar la Tabla 1, pag.12. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover, adaptada para Colombia a Escala 1:100.000.

Para determinar las limitaciones y restricciones, las variables analizadas, según la metodología IDEAM (2010), fueron: relieve, pendiente, erosión, profundidad efectiva del suelo, pedregosidad y encharcamientos e

inundaciones; es decir características físicas y químicas del suelo y sus factores formadores (IDEAM, op. cit. y PRODECO 2006-2007).

El programa nacional de clasificación de tierras reporta para Colombia ocho clases agrológicas, presentando las clases menores, poca o ninguna limitación para la explotación intensiva, pero a medida que va aumentando en número, estas limitaciones se hacen más abundantes IGAC (1997).

2.1.9 Hidrogeología Regional

Según la clasificación del IDEAM (2004 y 2013b) una zona hidrográfica es el territorio donde sus aguas convergen hacia los puntos más bajos de la superficie del mismo y se unen en una misma corriente o río principal que finalmente drenan hacia un lago, mar y océano.

Martínez (2006) hace referencia al hecho que diversas zonas hidrogeológicas de Colombia se encuentran en ambientes sedimentarios y volcánicos con buenas posibilidades hidrogeológicas, e incluye dentro de estas la cuenca Cesar-Ranchería. Esta cuenca, presenta una extensión de 10247 km² y es considerada como una de las cuencas hidrogeológicas montanas e intramontanas, en la cual se presentan sedimentos clásticos recientes de tipo aluvial, rocas sedimentarias terciarias y cretácicas con porosidad primaria y secundaria; menciona además, que la cuenca hidrogeológica Cesar-Ranchería se encuentra localizada en el Valle del Río Cesar en el Departamento del Cesar, cuyos límites geológicos son definidos al Norte por la falla Oca y la Sierra Nevada de Santa Marta, al Este por la Serranía de Perijá y al Oeste por la falla de Bucaramanga.

Las unidades geológicas que la conforman son descritas como abanicos y terrazas aluviales que generan u originan los acuíferos libres a confinados; además, se presentan rocas sedimentarias que conforman acuíferos libres a confinados. Para esta cuenca, reporta la existencia de 475 pozos con profundidades entre los 20 y 300 m, y de 2800 aljibes, cuyas propiedades hidráulicas indican caudales entre 0.1 y 50 l/s, transmisividades entre 6 y 5000 m²/día y capacidades específicas hasta de 4 l/s/m, generalmente utilizados como abastecimiento doméstico y público, riego y en el sector ganadero, con una producción 5×10^6 m³/año. Es importante resaltar que el autor menciona que las reservas dinámicas de las zonas hidrogeológicas para el Valle del Río Cesar son de 506 millones de metros cúbicos al año y de 190 millones de metros cúbicos para el Valle Superior del Magdalena, siendo la cuarta zona con mayor recurso hídrico del país.

Especificamente, el IDEAM (2013a) consideró para Colombia la existencia de cinco (5) zonas, siendo las de mayor interés, para el presente estudio, el Área Hidrográfica del Magdalena-Cauca (ID:2 o AH2) y la Zona Hidrográfica del Caribe (ID:1 o ZH1); posteriormente fueron divididas en zonas hidrográficas (ZH), en el cual la zona hidrográfica del Cesar (ZH:8 o ZH:28 de acuerdo a la clasificación) está contendida en el área Hidrográfica Magdalena-Cauca. La subzona hidrográfica, de acuerdo a la clasificación indicada por rango de área (10247 km²), tendría alrededor de 14 subzonas en relación al total nacional y específicamente para el área hidrográfica Magdalena-Cauca estaría conformada por una (1) subzona; sin embargo, en el anexo 3 del citado documento, se hace referencia a las subzonas hidrográficas como Alto Cesar (SZH:2801) con un área de 3442 Km², Medio Cesar (SZH:2802) con un área de 8275 Km², Río Ariguaní (SZH:2804) con un área de 5333 Km², y por último la subzona hidrográfica del Bajo Cesar (SZH:2805) con un área de 5879 Km² (ANEXO 3 , sensu IDEAM, 2013a) (Figura 29).

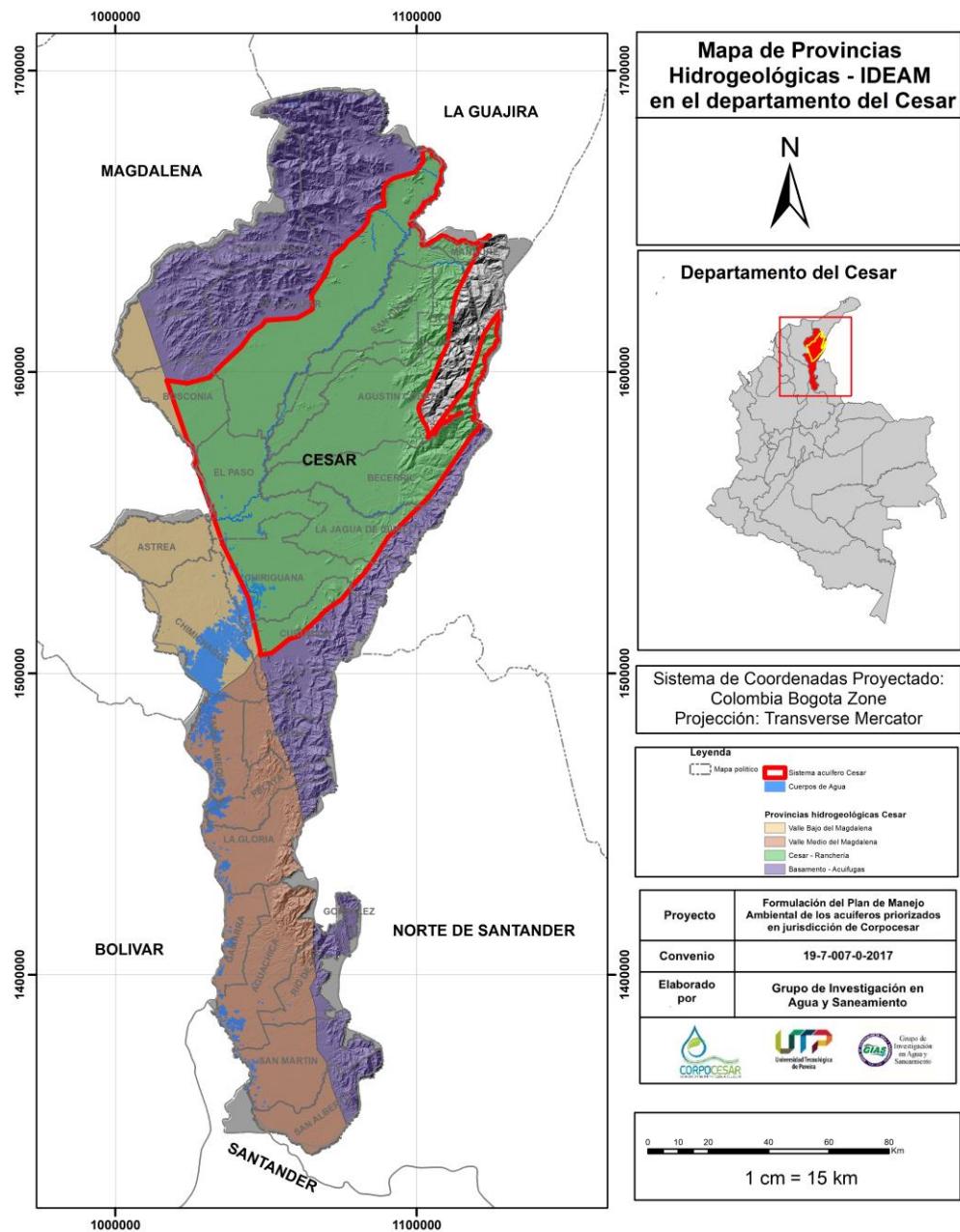


Figura 29. Mapa de Provincias Hidrogeológicas en el departamento del Cesar, en el cual se resalta el sistema acuífero Cesar. **Fuente:** IDEAM (2013a).

2.1.9.1 Provincias Hidrogeológicas para el Departamento del Cesar

El IDEAM identificó en el país 16 Provincias Hidrogeológicas, las cuales se agrupan en tres (3) grandes provincias: Provincias hidrogeológicas Montanas e Intramontanas (PM), Provincias hidrogeológicas Costeras e Insulares (PC) y Provincias hidrogeológicas Pericratónicas (PP). En estas 16 provincias se han identificado 61 sistemas de acuíferos de carácter local y regional. El departamento del Cesar está contenido en el grupo denominado Provincia Hidrogeológica Costera e Insular (PC) y específicamente en la Provincia Hidrogeológica Cesar-Ranchería (PC4).

A continuación, se citan algunas características de carácter regional para dicha provincia:

Cuenca: Cesar-Ranchería (Cuenca Emergente)

Tipo de Cuenca: Antepaís.

Área Superficial de la Cuenca: 10099.79 km² (Tabla 3.1. IDEAM, 2013; Figura 30)

Cuencas Sedimentarias Asociadas: Cesar-Ranchería, Valle Medio e Inferior del Magdalena.

Principales Estructuras Regionales: Falla Oca, Sistema de Fallas Bituima-La Salina (Falla Bucaramanga-Santa Marta) y Sistema de Fallas Espíritu Santo.

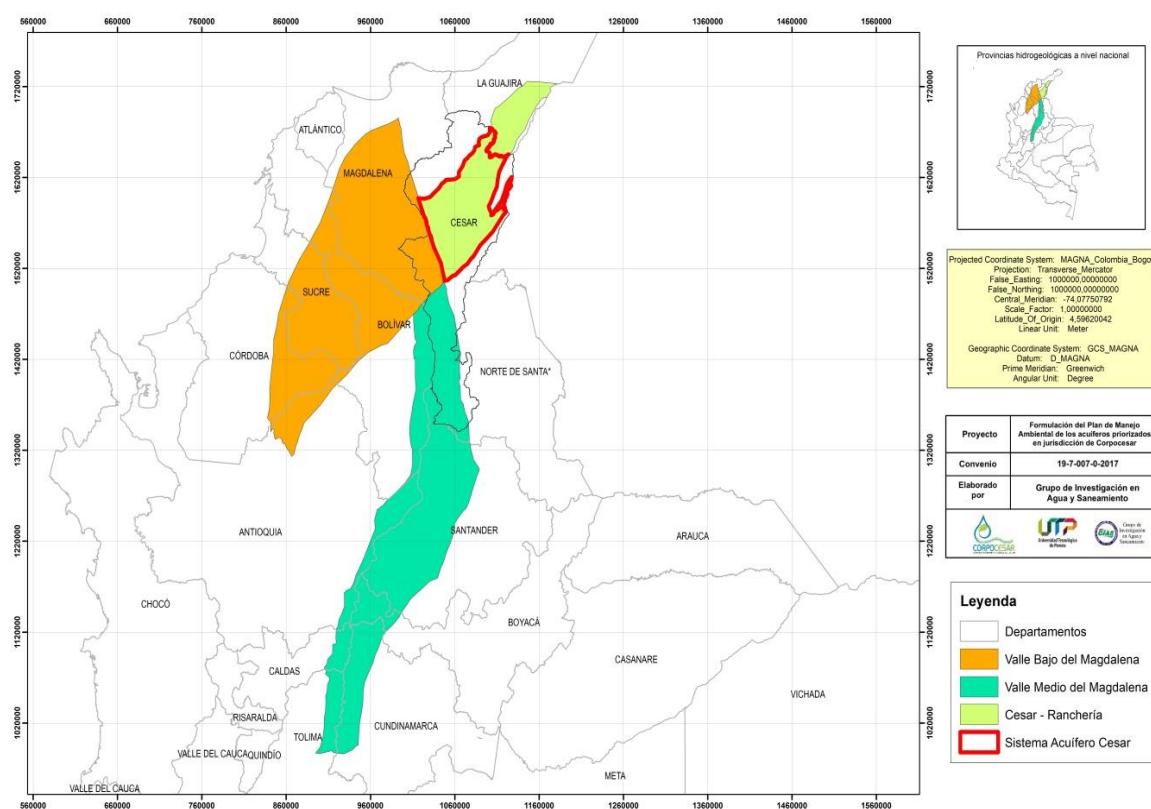


Figura 30. Provincias hidrogeológicas del departamento del Cesar en el contexto regional.

Fuente: IDEAM (2013a).

2.1.9.2 Sistemas de Acuíferos en el Departamento del Cesar

De acuerdo al IDEAM 2014a, para el departamento del Cesar se consideran de gran importancia los siguientes sistemas de acuíferos:

1. Sistema acuífero Cesar (SAC4.1).
2. Sistema acuífero Simití (SAM1.3)
3. Sistema acuífero Banco-Mompós (SAC2.1).

Sistema acuífero Cesar

Provincia Hidrogeológica: PC4 Cesar-Ranchería.

Código: SAC4.1.

Sistema Acuífero: Cesar

Unidades Hidrogeológicas: Acuífero de Llanura Aluvial (Qlla), Acuífero Abanico Aluvial de Valledupar (Qcal), Acuífero Cuaternario Aluvial Reciente (Qal) reconocido como Acuífero Cesar, Acuífero de Terrazas (Qt), depósitos coluviales Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía del Perijá, Acuífero Sedimentitas de Arjona, Acuífero de la Formación Cuesta, Acuífero de la Formación Cogollo y Acuífero de la Formación La Luna y Aguas Blancas.

Tipos de Acuíferos: Libres, semiconfinados a confinados y kársticos.

Parámetros hidráulicos: $B=190$ a >1280 m.

$K=0.2$ a 144 m/d.

$T=30$ a 1300 m²/d.

$S=1.5 \times 10^{-3}$ a 1.0×10^{-3}

$Ss=0.05$ a >5.0 l/s/m

Área Superficial: 8593 Km².

Sistema Acuífero Simití

Provincia Hidrogeológica: PM1 Valle Medio del Magdalena.

Código: SAM1.3.

Sistema Acuífero: Abanico de Aguachica.

Unidades Hidrogeológicas: Depósitos coluviales, Serranía los Motilones, Acuífero depósito fluvial del río Magdalena, Acuífero depósito coluvial de Aguachica (Qc) y Acuífero Abanico de Aguachica (NgQp).

Tipos de Acuíferos: Libres a semiconfinados.

Parámetros hidráulicos: $B=80$ m a 400 m.

$K=0.2$ a 8 m/d.

$T=80$ m²/d.

$S=1.0 \times 10^{-3}$

Área Superficial: 4432 Km².

Sistema Acuífero Banco-Mompós

Provincia Hidrogeológica: PC2 Valle Bajo del Magdalena.

Código: SAC2.1.

Sistema Acuífero: Bajo Magdalena.

Unidades Hidrogeológicas: Cuaternario aluvial somero y depósitos de terrazas aluviales.

Tipos de Acuíferos: Libres, semiconfinados a confinados.

Parámetros hidráulicos: $B \leq 150$ m.

$$T=400 \text{ m}^2/\text{d}.$$

Área Superficial: 2200 Km².

Para el presente trabajo se hizo un ejercicio de priorización en el que se seleccionó el sistema acuífero Cesar (Figura 31) como objeto de formulación del PMAA.

En el estudio CORPOCESAR e IDEAM (2006) subdividen al sistema acuífero Cesar en bloques teniendo en cuenta la productividad hídrica de cada uno, de los cuales citan los bloques Becerril-La Loma y Rincón Hondo; indican además, que los Ríos Cesar y Ariguaní de la zona norte, son los principales abastecedores de los acuíferos de la zona, y que la Serranía del Perijá no contribuye a la recarga o renovación de los recursos hídricos subterráneos por factores geológicos. Igualmente, consideran de manera general la presencia de cuatro (4) subprovincias hidrogeológicas como son: 1) Provincia Sierra Nevada de Santa Marta, 2) Serranía de Perijá, 3) Norte de la Cordillera Oriental y 4) Planicie del Cesar. Adicionalmente, los subdividen en tres (3) grupos hidrogeológicos teniendo en cuenta la porosidad e importancia hidrogeológica de la roca almacenadora y posibilidades de explotación.

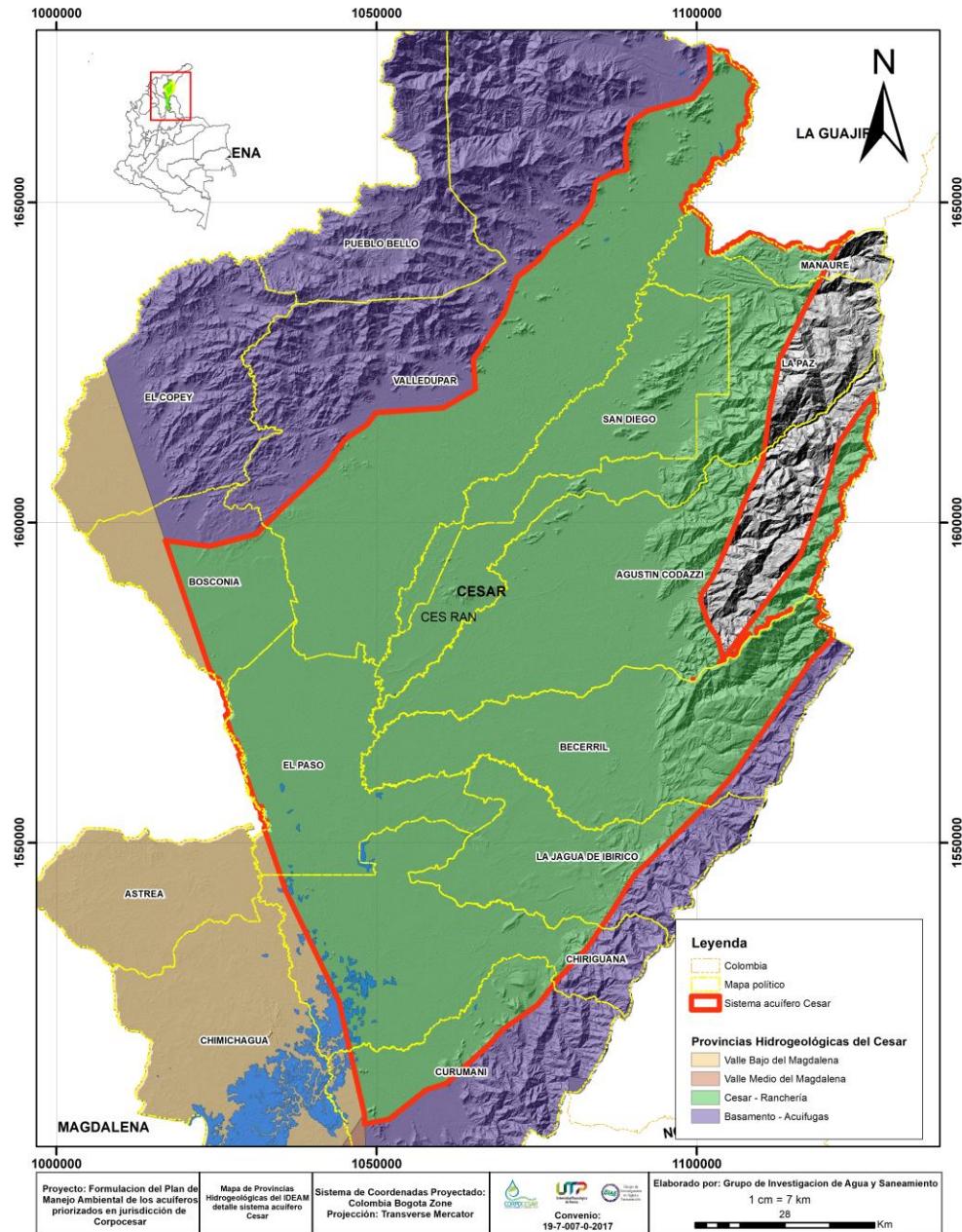


Figura 31. Detalle del sistema acuífero Cesar.

Fuente: IDEAM (2013a).

Grupo de Sedimentos y Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Muy pequeñas.

- Sistema Acuífero Llanura Aluvial (Qlla): Sistema que fue dividido por bloques tectónicos como son: 1) Sector del Bloque del Río Cesar, 2) Sector del Bloque de Los Venados, 3) Sector del Bloque Ariguaní, 4) Sector del Bloque Codazzi-Sicarare, 5) Sector del Bloque Becerril-La Loma, 6) Sector del Bloque Rincón Hondo y 7) Sector del Bloque Astrea-San Alberto (INGEOMINAS, 1995).

- Sistema Acuífero Aluviones Recientes (Qal).
- Sistema Acuífero Abanicos Aluviales (Qcal): Sistema que fue dividido por presentar una componente geomorfológica y fueron denominados de la siguiente manera: 1) Abanico de Codazzi, 2) Abanico Casacará y 3) Abanico de la Jagua de Ibirico.
- Sistema Acuífero Terraza (Qt).
- Sistema Acuífero Sedimentitas de Arjona (Tppa): Sistema que se extiende en el subsuelo del municipio de Bosconia, asociado a los Bloques Tectónicos del Ariguaní, y los Venados; conformado por una secuencia de areniscas, limolitas y arcillolitas intercaladas, conformando un acuífero confinado de tipo multicapas.
- Sistema Acuífero Formación Cuesta (Tmc).
- Sistema Acuífero Formación Barco (Tpb)

Grupo de Rocas Fracturadas y Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Pequeña.

- Sistema Acuífero Formación La Luna (Ksl)
- Sistema Acuífero Grupo Cogollo (Kmc): Depositado en un ambiente marino, aflorante al pie de monte de la Sierra Nevada y en la planicie del Cesar, en el municipio de Bosconia, contenido en el bloque tectónico Los Venados; este se encuentra conformado por secuencias de calizas intercaladas con calizas arenosas y delgadas capas de limolitas calcáreas, diaclasadas y con procesos de disolución, generando acuíferos de tipo confinado a semiconfinado.
- Sistema Acuífero Formación Río negro (Kir).
- Sistema Acuífero Formación Los Cuervos (Tec).

Grupo de Sedimentos y Rocas Porosas o Fracturadas con muy pequeña importancia Hidrogeológica o sin importancia.

- Depósitos Sedimentarios Cuaternarios con diferentes orígenes y Rocas sedimentarias Terciarias, en el cual incluyen a el Sistema Acuífero Depósitos Fluviolacustres (Qfl).
- Rocas Sedimentarias y Volcanosedimentarias de edades cretácicas y triásico-jurásicas
- Rocas Volcánicas, Ígneas y metamórficas. Con edades entre el cretácico y precámbrico.

2.1.9.3 Sub-Sistemas Sugeridos para el sistema acuífero Cesar (INGEOMINAS, 1995)

Para la división del sistema acuífero Cesar en sub-sistemas se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Porosidad:** Diferente comportamiento en rocas sedimentarias recientes y antiguas (Primaria o secundaria).
- **Estratigrafía:** Posición estratigráfica y litología asociada.
- Permeabilidad y extensión de las unidades.
- Exposición (afloramientos).
- Tectónica (Fallas y pliegues).
- Información secundaria.

Una vez revisada la información para el sistema acuífero Cesar (INGEOMINAS, op. cit.) se consideran cinco (5) bloques litotectónicos conformados por límites estructurales y que confinan y sirven como barreras de los acuíferos presentes en la zona; estos fueron originalmente propuestos por el INGEOMINAS (op. cit) y retomados por CORPOCESAR e IDEAM (2006), inicialmente incluidos de manera general como Sistema Acuífero Llanura Aluvial (Qlla). De acuerdo a las características litológicas, tectónicas y de porosidad, las unidades cuaternarias, terciarias y cretácicas, generan acuíferos libres, confinados a semiconfinados de tipo multicapa. Los bloques considerados para valoración se describen a continuación (Figura 32):

1. **Bloque del Río Cesar (1)**, separado por las fallas Cesarito al NE, Cuatro Vientos al SE y Falla Garupal al SW, siendo dominantes en superficie los depósitos de aluviales recientes, abanicos aluviales inconsolidados y rocas de basamento; zona en la cual se tendrían acuíferos libres, confinados a semiconfinados de tipo multicapa (INGEOMINAS, 1995).
2. **Bloque Los Venados (2)**, separado por las fallas Cesarito al NE, Cuatro Vientos al SE, Falla Garupal al NE y Caracolíctico al SW, presentándose una litología variada tanto aluvial reciente inconsolidada como zócalos de cobertura antiguos; permitiendo el desarrollo de acuíferos libres, semiconfinados a confinados de tipo multicapa (INGEOMINAS, op.cit.).
3. **Bloque Codazzi-Sicarare (4)**, el cual se encuentra limitado estructuralmente al NE por la falla Cuatro Vientos, al SE por la Falla Chorropital y al SW por la falla Caracolíctico al SW, conformado principalmente por depósitos inconsolidados de llanura aluvial generados por las principales corrientes de agua de la zona, como también rocas de zócalo terciario con componentes carboníferos; este bloque tendría acuíferos libres a multicapa y confinados a semiconfinados de tipo multicapa (INGEOMINAS, op.cit.).
4. **Bloque Becerril-La Loma (5)**, limitado por la Falla Chorropital al NW, Arenas Blancas al SW y por la Falla Caracolíctico al SE, presentando un marcado comportamiento estructural dada la presencia de pliegamientos como el Sinclinal de La Loma, Anticlinal del Tocuy, Anticlinal de Becerril, Sinclinal de La Jagua, entre otros; conformando acuíferos libres y confinados de tipo multicapa en las rocas aluviales y

en los zócalos plegados de la zona, además de presenta una alta incidencia minera por la ocurrencia de carbones intercalados con capas impermeables (INGEOMINAS, 1995).

5. **Bloque Rincón Hondo (6)**, limitado por las fallas Caracolito al SW y Arenas Blancas al NW, y por la Serranía del Perijá al NE, presentando la menor área en la cual los cuaternarios aluviales inconsolidados son dominantes frente a las rocas de basamento terciario-cretácico cercano al pie de monte de la serranía; los acuíferos en esta zona son libres, semiconfinados a confinados principalmente (INGEOMINAS, op.cit.).

Específicamente el acuífero superficial (No.4, Fig 16; INGEOMINAS, op. cit.) denominado Los Venados por el INGEOMINAS (op. cit.), esta conformado por la unidad descrita como Llanura Aluvial de edad cuaternaria o Subprovincia Hidrogeológica Planicie del Cesar (constituida principalmente por sedimentos aluviales cuaternarios, rocas sedimentarias del terciario y volcánicas Triásicas a Jurásicas). Este acuífero está conformado principalmente por arenas, limos y arcillas cubiertas por un nivel de gravas finas de pocos centímetros de espesor, el cual, presenta muy poco espesor hacia el área de Bosconia y Valledupar, cubriendo rocas ígneas, y cuyo espesor se incrementa hacia el sur (hasta los 100 m) en cercanías al Río Cesar, donde se presentan gravas, arenas y arcillas. El bloque o acuífero Los Venados, de acuerdo a la clasificación asignada por el INGEOMINAS (1995), cuyo acuífero profundo (No. 3, Fig 17; INGEOMINAS, op. cit.) se caracteriza por la presencia del Grupo Cogollo (Kmc) de edad cretácica, está conformado por calizas, calizas arenosas y areniscas calcáreas (Cogollo Inferior), y por por calizas menos compactas y presencia de facies arenoso arcillosas (Cogollo Superior o formación Lagunitas a la base y Aguas Blancas al tope); se presentan además, lutitas negras carbonosas a la base, niveles de Iodolitas carbonosas moscovíticas, arenarcillosos a la parte media y calizas lumaquélidas. Esta formación se encuentra en contacto concordante con la Formación La Luna (alternancia de lutitas negras carbonosas, limolitas, arcillolitas, calizas negras bituminosas, capas de chert y areniscas acalacreas) y transicional con la Formación Río Negro (formación detrítica principalmente arcósica, conglomerados, areniscas, intercalada con limolitas rojas y arcillolitas verdosas, areniscas de grano grueso, areniscas conglomeráticas) o discordante sobre la Formación La Quinta (la unidad sedimentaria se encuentra conformada depósitos clásticos no marinos, rocas vulcanoclásticas, areniscas arcósicas, lutitas, limolitas y conglomerados rojos, hacia la parte media se presentan flujos andesíticos, basálticos, brechas y tobas; la unidad Volcanoclástica incluye a la Formación Jordan). Es de resaltar que estas unidades fueron descritas principalmente en la Serranía del Perijá por sus buenos afloramientos que permitieron identificar litológicamente sus asociaciones, ayudando a la interpretación e interpolación de estas formaciones en la cuenca del sistema acuífero Cesar y más específicamente hacia la zona Sur de Valledupar y el municipio de Bosconia.

En ese orden de ideas y de acuerdo a lo evaluado, se considera el Bloque Los Venados (bloque 2; Figura 32) como la zona a prospectar, toda vez que la descripción litológica de las unidades permite deducir la existencia de un potencial en ocurrencia de rocas permeables capaces de almacenar agua. La recolección de información hidrogeológica conducirá a ampliar el conocimiento geológico e hidrogeológico del sistema acuífero Cesar en los municipios de Valledupar, Bosconia, San Diego, El Paso y La Paz. Otro factor de importancia que sustenta la escogencia de esta zona en particular es su vulnerabilidad dada por el poco espesor de la formación cuaternaria en la zona, la escasez de afloramientos, el alto grado de aridez sumado a fenómenos de desertificación producto del uso inadecuado del suelo, el incremento de la población y las características químicas de las aguas (alto contenido de hierro, bicarbonatada, cálcica, magnésica, clorurada, INGEOMINAS, 2002).

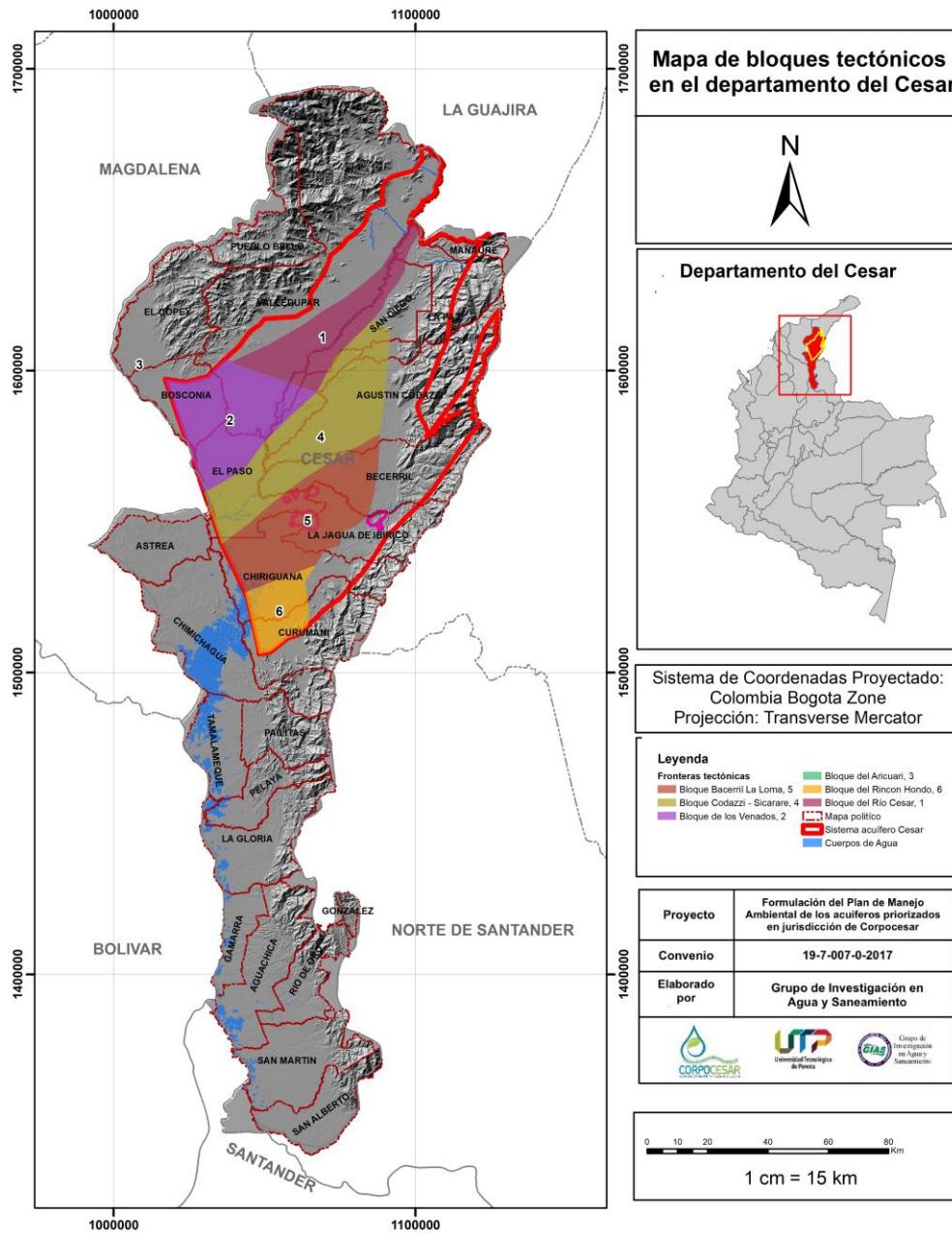


Figura 32. Bloques tectónicos asociados al sistema acuífero Cesar.

2.2 EVALUACIÓN GEOFÍSICA

2.2.1 Compilación y Análisis de Información

La información geofísica revisada y analizada en el numeral 2.1.1 permite concluir que existe información regional, de la que se destacan las campañas realizadas tanto por el Servicio Geológico Colombiano -SGC- como de la Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-. Durante estas campañas llevaron a cabo prospección

geofísica con fines hidrogeológicos y en pozos profundos acompañados por sísmica dirigida a la prospección de hidrocarburos. Otros trabajos de carácter local, son los realizados por los solicitantes de permisos de exploración de aguas subterráneas quienes dentro de su trámite presentan perforaciones, sondeos eléctricos y algunos registros de pozo, como es el caso de las compañías carboníferas del centro norte del departamento, información que será incorporada al análisis del modelo hidrogeológico para el acuífero.

a) Exploración geofísica

Básicamente se cuenta con la información suministrada por parte de CORPOCESAR, la cual se encuentra en los expedientes de los permisos de exploración de aguas subterráneas en el acuífero priorizado y en informes relacionados con el sistema acuífero Cesar (INGEOMINAS, 1995); además se cuentan con la información de sondeos eléctricos verticales localizados ampliamente en el área del acuífero priorizado y en particular en el área de las compañías mineras Drummond y PRODECO.

b) Datos de captaciones de aguas subterráneas

La información suministrada y colectada en CORPOCESAR permitió identificar alrededor de 4246 puntos entre aljibes, pozos, aljibe-pozos y manantiales. Del total de puntos identificados, 3627 pudieron ser ubicados geográficamente, estando 2780 de los puntos inventariados ubicados sobre la formación denominada Llanura Aluvial (QIIa) y el resto en las demás unidades que conforman el sistema acuífero Cesar.

c) Permisos y autorizaciones ambientales

i. Permisos de exploración de aguas subterráneas

De acuerdo a la revisión de la información suministrada por la Corporación, se pudo identificar la existencia de treinta y un (31) permisos, de los cuales siete (7) están localizados en el municipio de Valledupar, seis (6) en Bosconia, cuatro (4) en Curumaní y Agustín Codazzi, tres (3) en Chiriguaná y La Jagua de Ibiríco, y uno (1) en La Paz, San Diego, Becerril y El Paso, con resoluciones de aprobación desde el año 2001 hasta el 2017 según la información colectada; además, varios de estos cuentan con sondeos eléctricos verticales.

ii. Concesiones de aguas subterráneas

En cuanto a concesiones de aguas subterráneas, según los expedientes consultados en CORPOCESAR en el 2017, cuentan con concesión de aguas subterráneas treinta y seis (36) usuarios; sin embargo, este valor representa solamente el 0.84 % de los 4246 puntos inventariados de acuerdo a la base de datos e información suministrada por parte de la autoridad ambiental, lo que permite recomendar buscar mecanismos que permitan legalizar las diferentes captaciones de aguas subterráneas existentes en el área de influencia del sistema acuífero Cesar.

iii. Licencias ambientales

En los referente a licenciamientos ambientales, se tiene información de las licencias concedidas por parte de la autoridad ambiental para las diferentes operaciones mineras localizadas en el área de influencia del acuífero priorizado; de estas se citan las 78 Licencias Ambientales otorgadas por CORPOCESAR, de estas, 77 se encuentran vigentes y una vencida; es de resaltar que en la zona sur del acuífero priorizado se localizan siete (7) proyectos mineros a cielo abierto de gran importancia los cuales cuentan con licenciamiento ambiental de acuerdo a lo reportado por Quiroz y Medina (2012) y una en proceso de evaluación presentada por parte de Sloane (2016) para el proyecto carbonífero subterráneo denominado La Luna.

iv. Títulos mineros en el departamento del Cesar

Según inventario proporcionado por la Agencia Nacional de Minería, el departamento del Cesar cuenta con 284 títulos mineros otorgados a la fecha, entre autorizaciones temporales, títulos mineros Ley 685, Contratos de Concesión D2655, Contratos en Virtud de Aporte y Licencia de Explotación (Figura 33). En cuanto a títulos mineros otorgados mediante la Ley 1382 de 2010 se cuentan con 82 solicitudes en modalidad de Solicitud de Legalización de Minería de Hecho, las cuales se encuentran vigentes; finalmente, en el departamento se cuentan con 391 solicitudes bajo la modalidad de Contrato de Concesión Ley 685, Autorización Temporal y Licencia de Exploración.

Cabe notar que los proyectos de mayor importancia minera se encuentran localizados en la zona centro norte del departamento del Cesar, entre los municipios de Bucaramanga, La Jagua de Ibirico, Chiriquaná y El Paso, donde se encuentran las compañías mineras: Carbones de La Jagua con alrededor de 1963,25 hectáreas conforme el polígono de la zona de explotación (Títulos en Virtud de Aporte No. 285-95, 132-97, 109-90, 031-92 y 056-90; y los Contratos de Concesión Ley 685 No. HKT-08031, GDF-093, y DKP-141 mas no el área del título minero; Drummond cuenta con 3999,19 hectáreas según el polígono que define el proyecto denominado Pribbenow (Títulos en Virtud de Aporte No. 078-88 y 147-97); 1082,92 hectáreas que conforman el polígono de la mina Calenturitas del proyecto de PRODECO (Título en Virtud de Aporte No. 044-89), y por último los polígonos de la Mina La Francia con 376,90 hectáreas (Contrato de Concesión D2655 No. 5160 y GAK-152, Título en Virtud de Aporte No. 147-97, y Contrato de Concesión Ley 685 No. FED-103) y 276,18 hectáreas del polígono de la mina El Hatillo (Título en Virtud de Aporte No. 147-97) de propiedad de Colombian Natural Resources -CNR-, según información digital suministrada por CORPOCESAR y la Agencia Nacional de Minería.

Gran parte de los títulos mineros bajo las modalidades anteriormente descritas, se encuentran localizados en formaciones con porosidades primarias y secundarias, por lo cual, el aprovechamiento está orientado a los materiales de construcción, arrastre, calizas, canteras-recebo y arcillas, además del carbón, el cual requiere de una mayor infraestructura y área de operación.

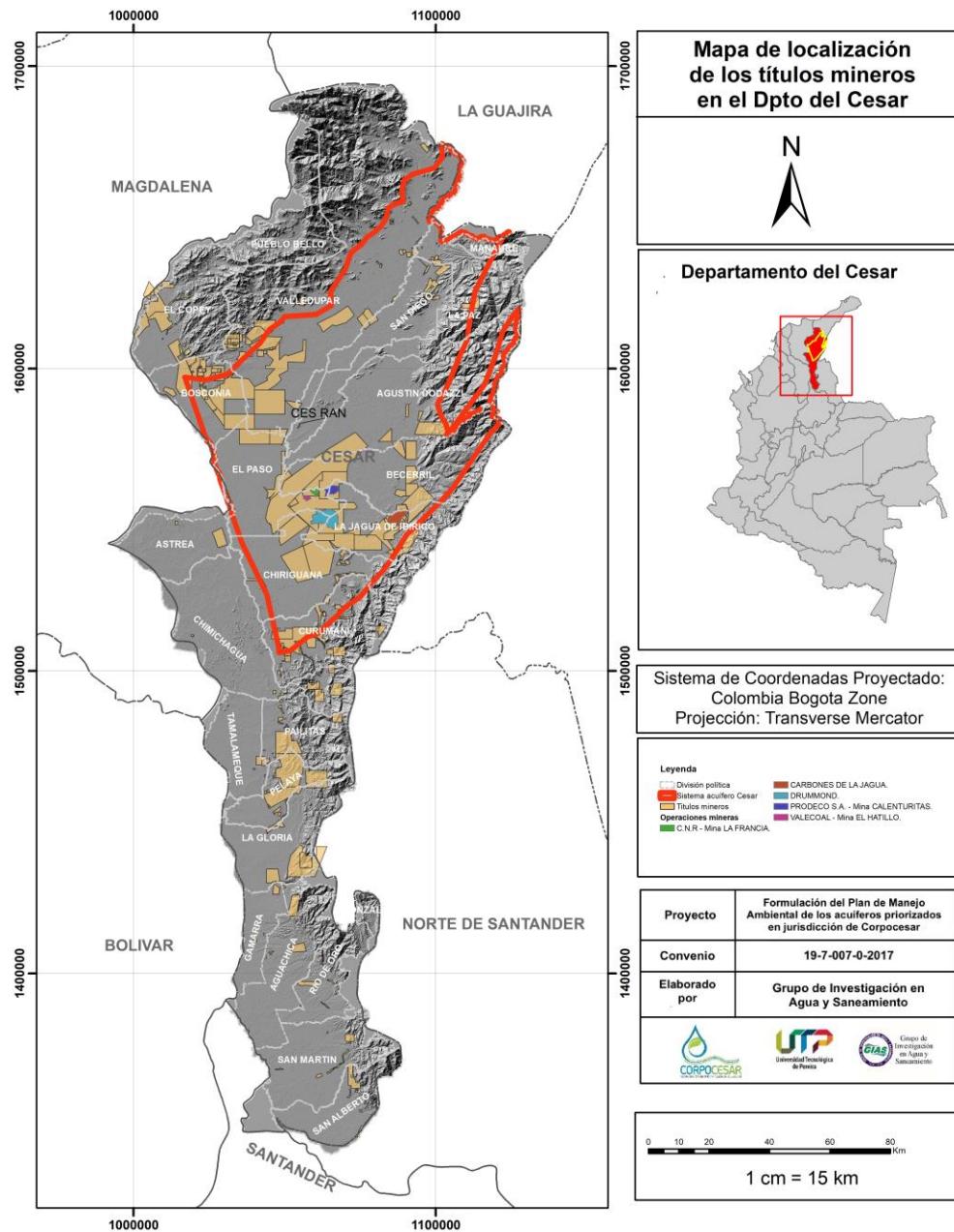


Figura 33. Títulos Mineros otorgados a la fecha en el Departamento del Cesar.

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2017).

d) Registros geofísicos de pozos

La Corporación Autónoma del Cesar cuenta con una red de monitoreo de acuíferos conformada por siete (7) piezómetros localizados en la zona centro y norte del departamento, de los cuales cinco (5) están ubicados dentro del sistema acuífero Cesar. El piezómetro Nro. 1 se encuentra localizado en el municipio de La Paz, el Nro. 2 en Becerril, Nro. 3 en La Jagua de Ibirico, Nro. 4 en Agustín Codazzi, el Nro. 5 en El Paso.

Adicionalmente, existen piezómetros de particulares (PIEZ-10 y 11) localizados en el municipio de El Paso, el PIEZ-12 en Chiriguaná y los piezómetros PIEZ-8 y 9 en el municipio de Valledupar.

Se cuenta con registros geofísicos de pozo de los piezómetros propiedad de la Corporación para el año 2005, los cuales cuentan con registros SP (Potencial espontáneo), Gamma y Resistividad en los municipios de Becerril, Codazzi, Chiriguaná y El Paso (Figuras 34, 35 y 36). Es de resaltar que las compañías mineras del centro norte del cesar, cuentan con información de registros de pozo (ej. Sloane, 2015 y Prodeco, 2010), los cuales fueron suministrados e integrados en el modelo hidrogeológico. Se concluye que la información geofísica de registros geoeléctricos u otros, son de carácter local y se concentran principalmente en la periferia de las operaciones mineras; por lo tanto, es importante plantear estrategias que permitan implementar este tipo de análisis para mejorar el conocimiento geológico-geofísico del subsuelo y en particular del sistema acuífero Cesar, salvo en zonas puntuales.

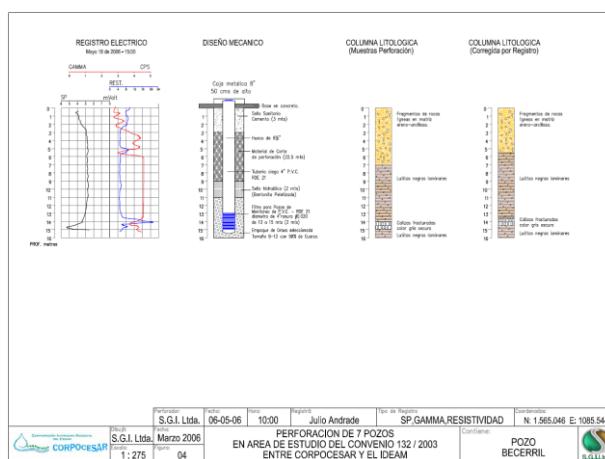


Figura 34. Registro Geoeléctrico, Diseño Mecánico, Estratigrafía del Pozo y Columna Geoeléctrica corregida para el Piezómetro de Becerril. Prof. 16m.

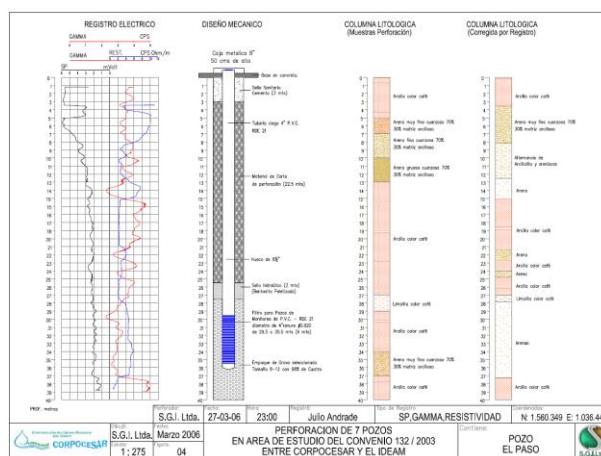


Figura 35. Registro Geoeléctrico, Diseño Mecánico, Estratigrafía del Pozo y Columna Geoeléctrica corregida para el Piezómetro de El Paso. Prof. 40m.

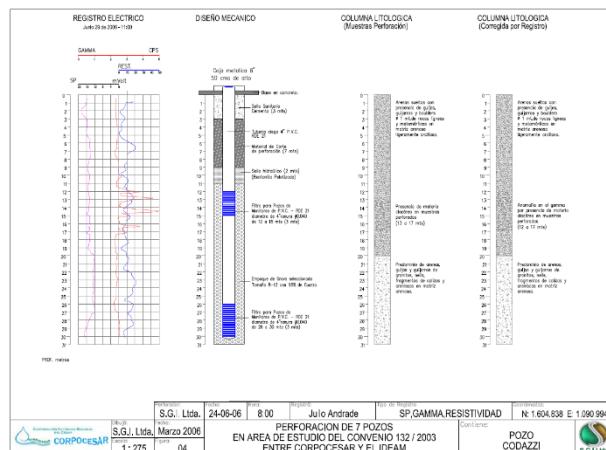


Figura 36. Registro

Mecánico, Estratigrafía del Pozo y Columna Geoeléctrica corregida para el Piezómetro de Agustín Codazzi. Prof.
31m.

2.2.2 Prospección y exploración geofísica

Este método es el más utilizado para la evaluación de aguas subterráneas, el cual consiste fundamentalmente en estudiar las variaciones en el subsuelo de las propiedades físicas conocidas como resistividad eléctrica, o propiedad que poseen los diferentes tipos de materiales, artificiales o naturales de oponerse al flujo de la corriente eléctrica, en presencia de un campo eléctrico en cualquiera de las direcciones X, Y ó Z; a través de los contrastes de los valores obtenidos, es posible diferenciar distintas clases de materiales existentes y calcular sus espesores, que para este caso son con fines hidrogeológicos, toda vez que el agua ya sea dulce o salada presentan respuestas diferentes a los impulsos eléctricos.

Para el sistema acuífero Cesar se cuenta con 653 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) distribuidos ampliamente en el área y zonas aledañas, de los cuales 291 cuentan con coordenadas según información suministrada por CORPOCESAR (Figura 37), que serán analizados más adelante.

Es de resaltar que se cuenta con diversos trabajos enfocados en la temática de geoeléctrica encaminada a la prospección de aguas subterráneas en el departamento del Cesar, de los cuales se destacan el del INGEOMINAS (1995), CORPOCESAR y la Universidad de Magdalena (2010 a 2013), y las realizadas por las compañías mineras (Drummond, PRODEC, CNR, Sloane) dentro de sus Planes de Manejo Ambiental presentados ante la ANLA, además de registros geoeléctricos locales realizados para la prospección de agua subterránea en predios de particulares para uso agrícola, entre otros. Debido a la densidad de información obtenida durante la campaña de prospección realizada en la cuenca del Cesar se muestran las resistividades sugeridas por el INGEOMINAS (1995) para las unidades presentes la Cuenca del Cesar, como guías para la interpretación de la información colectada (Tabla 1).

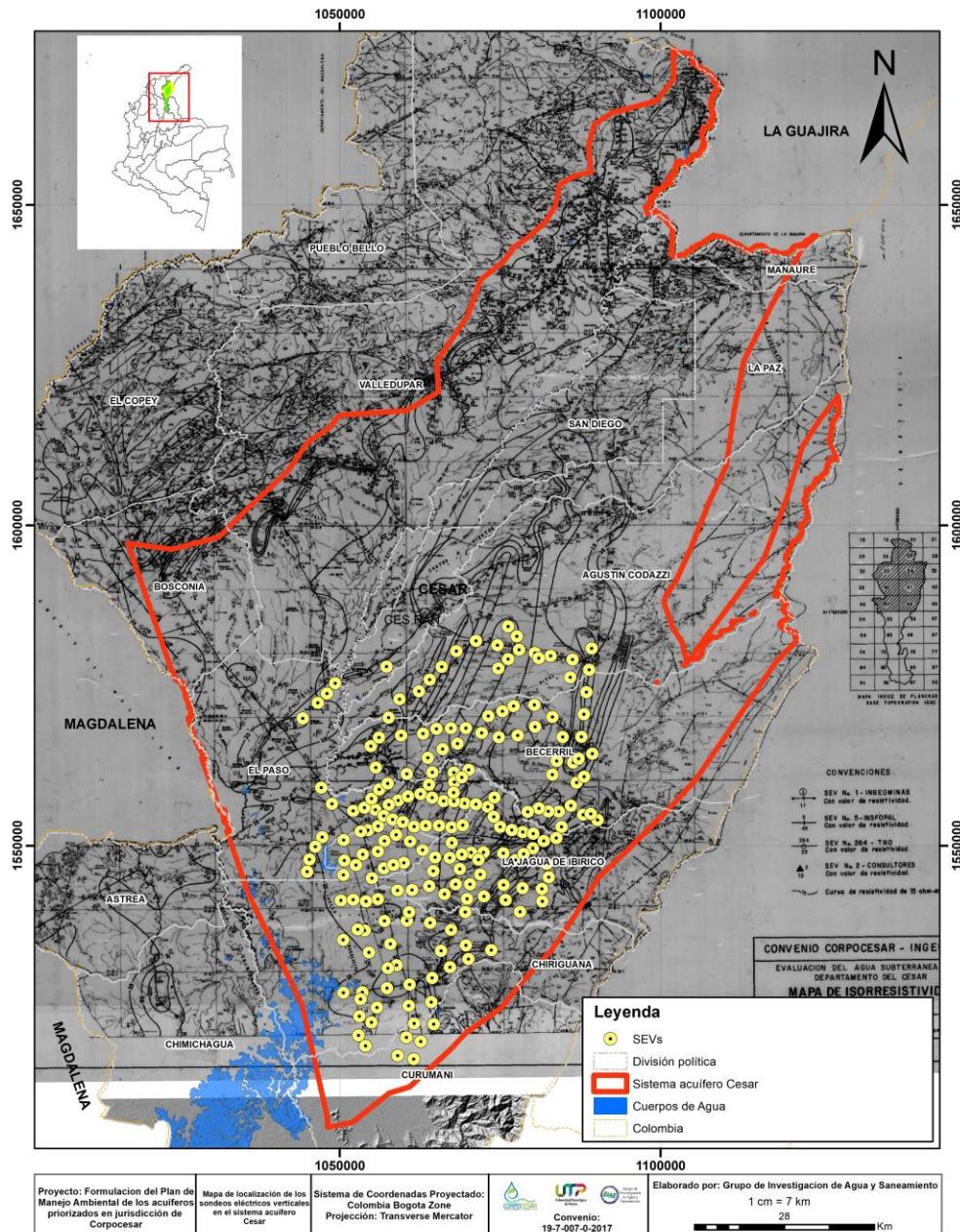


Figura 37. Mapa de Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales -SEV- según base de datos y de los realizados en el 2017 por UTP-CORPOCESAR. Mapa Base: Mapa de Isoresistividad a los 50 m (INGEOMINAS, 1995).

Tabla 1. Modelo Geoeléctrico para la Cuenca del Cesar. Fuente: INGEOMINAS (1995).

UNIDAD GEOLÓGICA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	PROFUNDIDAD (m)	LITOLOGÍA PRINCIPAL	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS CUALITATIVAS
CUATERNARIO	6-10	10-100	Arcillas	Poco permeable
	10-30	Ídem	Limos, arenas	Permeable
	30-100	Ídem	Arenas, gravas	Permeable
	100-200	Ídem	Gravas	Permeable
	200-3000	Ídem	Gravas secas	Permeable
TERCIARIO				
Fm. Cuesta	700-3000	40-100	Conglomerado	Permeable
Fm Cuervos	4-15	50-150	Arcilla, carbón	Poco permeable
Fm Barco	20-300	150-400	Arenisca	Permeable
CRETÁCEO				
Fm. Molino	3-11	Más de 300	Shales	Poco permeable
Fm. La Luna	50-100	Ídem	Caliza, shale	Poco permeable
Grupo Cogollo	100-500	Ídem	Arenisca	Poco permeable
JURA-TRIÁSICO				
Unidad La Quinta	90-400	Más de 300	Vulcanitas sedimentarias	y Poco permeable
ROCAS ÍGNEAS				
	1000	Ídem	Ácidos	Impermeable

Los trabajos realizados en la cuenca del Cesar han acogido la siguiente clasificación para las diferentes unidades identificadas mediante cartografía y divididas por sus propiedades hidrológicas e hidrogeológicas de la siguiente manera:

Grupo de Sedimentos Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Muy Pequeña.

a) **Sistema Acuífero Llanura Aluvial (QIIa):** Se subdivide de la siguiente manera (Figura 32; Sección 2.1.9.3):

- **Sector Bloque Río Cesar:** Limitado superficialmente por el trazo de los contactos con los sistemas de acuíferos de terrazas (Qt) y Abanicos Aluviales (Qcal). Presenta una extensión de 1780 Km² aprox. y un espesor máximo de 300 m, conformado por intercalaciones de gravas, arenas y arcillas. Valores de resistividad de 30 a 45 Ohm-m hacia la Sierra Nevada de Santa Marta (Clástico grueso),

y de 10 a 20 Ohm-m hacia el sur y SE del Río Cesar hacia la Serranía del Perijá (Sedimentos finos); descansa sobre rocas ígneo-metamórficas y sedimentarias consolidadas con resistividades de 100 Ohm-m. Desarrolla dos (2) tipos de acuíferos, uno superior (libre a semiconfinado) constituido por arena fina y limo, e inferior (semiconfinado) conformado por arenas, gravas y arcillas. El Acuífero superior presenta espesores entre los 15 a 20 m (Nivel Freático entre los 1.5 a los 5 m de profundidad), conductividad del agua dulce de 1000 μ mhos/cm de tipo bicarbonatada cálcico-magnésica al piedemonte y sódica al centro del valle (INGEOMINAS, 1995). Conductividad hidráulica estimada de 1 m/día. La dirección de flujo converge desde las áreas montañosas hacia el cauce del Río Cesar a SW. El acuífero inferior presenta un espesor de 400 m, niveles estáticos de 5 a 8 m de profundidad, con agua de tipo bicarbonatada sódico-cálcica, conductividad de 360 μ mhos/cm, conductividades hidráulicas varían entre los 0.2 a 144 m/día, con coeficientes de almacenamiento entre los 1×10^{-2} a 1×10^{-3} y una capacidad específica estimada de 1 a 3 l/seg/m. El sistema más representativo y de gran importancia hidrogeológica en este bloque es el sistema acuífero Llanura Aluvial (QIIa).

- **Sector Bloque Los Venados:** Representado por el sistema de Llanura Aluvial (QIIa), conformado por sedimentos cuaternario de granulometrías finas a medias intercaladas (arcilla arenosa, arena fina arcillosa, arena gruesa y arcilla) generalmente a los 20 m de profundidad. Conformado por un acuífero libre a semiconfinado con espesores entre los 15 y 70 m (el mayor espesor se encuentra paralelo al Río Cesar), presentando resistividades promedio de 10 Ohm-m; al NW el espesor disminuye entre los 15 y 20 m marcando geopotenciales entre los 5 a los 40 Ohm-m; el nivel piezométrico determinado varía entre los 6 y los 28 m y presenta un promedio de 15 m de profundidad. Es un acuífero que varía de dulce a salobre, presentando conductividades de 1200 μ mhos/cm y clasificada como bicarbonatada sódica y cálcico-magnésica. La conductividad hidráulica estimada es de 10^{-1} a 10^{-2} m/día y una capacidad específica menor a 0.1 l/seg/m. La dirección de flujo presenta una tendencia preferencial hacia el sur, descargando en los acuíferos profundos y en el Río Cesar. Desde el punto de vista de importancia en el Bloque Los Venados se considera la Llanura Aluvial (QIIa) como de pequeña importancia hidrogeológica.
- **Sector Bloque Ariguaní:** El acuífero del sistema de Llanura Aluvial (QIIa) se encuentra conformado por limos, arenas, y algunas gravas, presentes sobre las rocas terciarias de la zona. El acuífero es de tipo libre a semiconfinado con espesores entre los 10 a los 40 m, presentando valores de resistividad entre los 5 a los 30 Ohm-m, niveles estáticos entre 8 a 1.5 m y un promedio de 4 m durante la mayor parte del año, el agua es anómalamente salobre hacia el norte de El Paso, similar a la identificada en Bosconia con una composición de tipo clorurada-sulfatada cálcico-magnésica y sódica. Posee un caudal estimado promedio de 2 l/seg. Para una extracción diaria de 14 m³/día/pozo, permitiendo asignarle una conductividad hidráulica media (1 a 10 m/día). La dirección del flujo según la isoconductividad eléctrica del agua es SW, descargando en los ríos Ariguaní y Cesar, y en las ciénagas. La importancia hidrogeológica de la Llanura Aluvial para este bloque es de tipo intermedio.
- **Sector del Bloque Codazzi-Sicarare:** La Llanura aluvial (QIIa) en este bloque se encuentra conformada por intercalaciones de limos, arenas, arcillas y gravas, presentando un espesor de 20 m, con variaciones entre los 10 y 40 m; granulometrías gruesas se presentan en la parte NE del bloque

y disminuyendo hacia el SW en las desembocaduras de los ríos Sicarare, Casacará y Calenturitas en el Río Cesar. Valores de resistividad al E se presentan desde los 10 hasta los 200 Ohm-m y al SW son <30 Ohm-m. En esta formación se presenta un acuífero libre generado sobre los sedimentos terciarios de la Formación Barco (Tpb). El nivel freático de este acuífero varía entre los 2 y 6 m de profundidad al NE y entre los 5 y los 15 m de profundidad al SW, demarcando la dirección de flujo hacia el SW entregando las aguas a los sistemas acuíferos profundos y al Río Cesar en la parte baja. Se encuentra conformado por aguas dulces con conductividades eléctricas entre 400 y 1000 μ mhos/cm; con aguas de tipo bicarbonatadas cálcico-magnésicas variando a sódicas al SW en el sentido de la dirección de flujo. La conductividad hidráulica establecida para este acuífero hacia el NE es de 10 m/día y al sur se estiman valores de 10^{-1} m/día. Finalmente, en este bloque se consideró el sistema de llanura como de importancia hidrogeológica intermedio.

- **Sector del Bloque Becerril-La Loma:** En este bloque la Llanura Aluvial (QIIa) se encuentra depositada sobre sistemas acuíferos plegados del terciario-cretáceo, y se presenta conformada por intercalaciones de arenas, gravas y arcillas con espesores promedio de 20 m que varía entre los 10 y los 100 m, siendo predominantemente arcilloso por debajo de los 30 m; presenta resistividades desde los 12 hasta los 2000 Ohm-m, siendo estas últimas a capas secas de gravas. En dicho bloque se define la presencia de un acuífero libre con un nivel estático promedio de 5 m de profundidad, aguas dulces en general con conductividades eléctricas de 800 μ mhos/cm, de tipo bicarbonatada cálcico-magnésica y anómalamente clorurada-sulfatada en inmediaciones de La Jagua, producto de la interacción con las rocas terciarias de piedemonte. Los pozos que captan la unidad aluvial son inexistentes. Por último, la dirección de flujo presenta tendencia al SW aportando las aguas a las Ciénegas de la zona, verificado por el mapa de conductividad eléctrica del agua. Este sistema acuífero, hidrogeológicamente, es considerando como de importancia intermedia en el bloque.
- **Sector del Bloque Rincón Hondo:** En este sector el sistema de Llanura Aluvial (QIIa) se encuentra conformado por arena fina, limo y delgadas capas de grava fina a media con espesores en general de 10 hasta los 20 m siendo mayores hacia el W del bloque. Las resistividades halladas van desde los 15 hasta los 200 Ohm-m, asociadas a un acuífero libre que presenta un nivel freático a 4 m de profundidad, con aguas dulces que presentan conductividades eléctricas de 400 μ mhos/cm, de tipo bicarbonatadas cálcico-magnésicas. El flujo de agua subterránea presenta tendencia preferencial al W con carga hacia las ciénagas, y conductividades hidráulicas en pozo de 9 a 80 m/día. Este sector es considerado de importancia hidrogeológica entre grande a intermedia.
- **Sector Bloque Astrea-San Alberto:** Sistema acuífero de poca potencia, con un espesor >10 m y constituido por limos y arcillas y en algunos sectores por gravas y arenas. Es considerado como un acuífero libre con niveles estáticos entre los 3.5 a los 4.4 m de profundidad, con aguas dulces con conductividades eléctricas de 800 μ mhos/cm y de tipo bicarbonatadas cálcico-magnésicas. La conductividad hidráulica determinada para este acuífero dada sus características es de 10^{-2} a 10^{-3} m/día al norte de Saloa y 10 m/día al sur de la misma. El flujo subterráneo determinado indica una dirección SE (parte norte de Chimichagua) y al sur fluye en dirección N y W hacia las ciénagas. Hidrogeológicamente es considerado como un sistema de pequeña importancia.

En términos generales se resume en la Tabla 2 las características hidrogeológicas halladas para este sistema acuífero:

Tabla 2. Síntesis de las subdivisiones del sistema de acuífero Llanura Alvial (Qlla).

BLOQUES	CESAR	LOS VENADOS	ARIGUANÍ	CODAZZI-SICARAR E	BECERRIL-LA LOMA	RINCÓN HONDO	ASTREA-SAN ALBERTO
Litología	Gravas, arenas y arcillas	Arcilla arenosa, arena fina arcillosa, arena gruesa y arcilla	Limos, arenas, y algunas gravas	Limos, arenas, arcillas y gravas	Arenas, gravas y arcillas	Arena fina, limo y delgadas capas de grava fina a media	Limos y arcillas y en algunos sectores por gravas y arenas
Espesor (m)	300 (15 y 20, y 400	20 (15 y 70) y entre los 15 a 20 al NW	10 a 40	20, variando entre 10 y 40	Entre 10 y 100, 20 en promedio. A los 30 arcilloso	10 a 20, > al W	>10
Resistividades	30 Ohm-m a 45 Ohm-m y 10 Ohm-m a 20 Ohm-m	10 Ohm-m, 5 Ohm-m a los 40 Ohm-m al NW	5 Ohm-m a los 30 Ohm-m	10 a 200 Ohm-m y SW <30 Ohm-m	12 Ohm-m hasta los 2000 Ohm-m, seco a la base (Gravas secas)	15 Ohm-m hasta los 200 Ohm-m	-
Tipo de Acuífero	Libre y semiconfinado	Libre y semiconfinado	Libre y semiconfinado	Libre	Libre	Libre	Libre
Nivel freático (m)	1,5 y 5 (Libre) y 5 a 8 (Semiconfinado)	6 a 28, promedio 15	8 a 15 y 4 promedio	2 y 6 al NE y 5 a 15 SW	5 en promedio	4	3,5 a 4,4
Tipo de agua	Dulce, bicarbonatada cálcico-magnésica al piedemonte y sódica al centro del valle (Libre y bicarbonatada sódico-cálcica (semiconfinado)	Varia de dulce a salobre, bicarbonatada sódica y cálcico-magnésica	Agua clorurada-sulfatada cálcico-magnésica y sódica	Dulce, bicarbonatadas cálcico-magnésicas variando a sódicas al SW	Dulces, de tipo bicarbonatada cálcico-magnésica y anómalamente clorurada-sulfatada en inmediaciones de La Jagua	Dulces, bicarbonatadas cálcico-magnésicas	Dulce, de tipo bicarbonatadas cálcico-magnésicas
Conductividad eléctrica del agua	1000µmhos/cm (libre) y 360µmhos/cm (semiconfinado)	1200µmhos/cm	-	400 y 1000µmhos/cm	800µmhos/cm	400µmhos/cm	800µmhos/cm
Dirección de Flujo	Converge desde las áreas montañosas hacia el cauce del río Cesar a SW	Tendencia preferencial hacia el sur, descargando en los ríos Ariguaní y Cesar y ciénagas	SW, descargando en los ríos Ariguaní y Cesar	SW, entrega a acuíferos profundos. y Río Cesar	SW aportando las aguas a las Ciéneas de la zona	Tendencia preferencial al W con carga hacia las ciénagas	SE (parte norte de Chimichagua) y al sur fluye en dirección N y W hacia las ciénagas
Importancia Hidrogeológica	Grande	Pequeña	Intermedio	intermedio	Intermedio	Grande a intermedia	Pequeña

Fuente: INGEOMINAS (1995).

b) Sistema de Aluviones Recientes (Qal): aflora en la subprovincia hidrogeológica Planicie del Cesar, con una extensión de 715 Km², y en menor extensión y a manera de parches al SW y NE de Chimichagua (15 Km²). Constituido por bloques, gravas, arenas y esporádicamente limos, espesor en general >5 m; es

considerado de pequeña importancia hidrogeológica. Hacia la zona sur presenta espesores desde 120 hasta los 260 m siendo mayor al W. Los geopotenciales entre 5 a 12 Ohm-m presentes en los primeros 10 a 60 m sugieren presencia de arenas, limos y gravas, precedido de un nivel de arcillas y limos con resistividades de 5 a 12 Ohm-m y un espesor de 60 m en promedio, encontrándose el tope a los 80 m en la vía San Alberto-San Martín. Posteriormente se evidencia un incremento en la resistividad de 20 a 50 Ohm-m generado por un incremento en el tamaño de grano pasando de arena, limo a algunas gravas. A este sistema se asocian dos tipos de acuífero, 1) Libre con espesores de 10 m al W y 30 m al E, nivel freático de 1.5 a 5 m de profundidad (2.5 m promedio), valores de resistividad desde los 30 hasta los 200 y 500 Ohm-m con presencia de agua dulce de tipo bicarbonatada cálcico-magnésica y conductividad eléctrica entre 200 y 400 μ mhos/cm, conductividad hidráulica de 0.5 hasta los 5 m/día, flujo de agua subterránea en dirección EW hacia las ciénagas y el Río Lebrija; 2) acuífero confinado, el cual presenta espesores entre los 25 hasta los 210 m, presentando mayor espesor al W. Las resistividades varían entre los 20 a los 50 Ohm-m, con un nivel piezométrico a los 3.8 m de profundidad en promedio, conductividad hidráulica estima de 1 m/día. Este acuífero en general se considera de gran importancia hidrogeológica hacia el sur del departamento y de importancia pequeña hacia Chimichagua y en los valles intramontanos donde esta unidad se encuentra cartografiada.

c) **Sistema Acuífero Abanicos Aluviales (Qcal):** En este sistema fueron incluidos los abanicos de Valledupar, Manaure, Codazzi, Casacará, La Jagua de Ibirico, Pailitas y Aguachica, de los cuales se hace referencia de los cinco (5) primeros abanicos por encontrarse en el área de influencia del sistema acuífero Cesar.

- **Abanico de Valledupar (Qav):** Conformado por lentejones de grava gruesa, arena y fragmentos de rocas ígneas volcánicas embebidos en una matriz arcillosa. Presenta espesores variables entre los 30 a los 50 m con resistividades desde 30 hasta los 60 Ohm-m, que condicionan el desarrollo de un acuífero libre. Presenta niveles freáticos entre los 2 y 3 m de profundidad que oscila en verano entre los 0.3 a los 0.8 m de profundidad; el agua es dulce de tipo bicarbonatada cálcico-magnésica y sódica en menor proporción, con una conductividad de 1000 μ mhos/cm. La dirección de flujo determinada para este acuífero es N-S, con una conductividad hidráulica del orden de 15 m/día, características que lo enmarcan en un acuífero de importancia hidrogeológica intermedia; es de resaltar que este acuífero se presenta semiconfinado al acuífero de Llanura Aluvial (QIIa).
- **Abanico de Manaure (Qam):** Presenta un espesor entre los 10 y los 170 m, el cual, se encuentra constituido por gravas gruesas (0.1 a 2 m de diámetro) de limolitas rojas, calizas y rocas volcánicas embebidos en una matriz arcillo-arenosa poco compacta; suprayace rocas cretácicas y jurásicas presentes en la Serranía del Perijá. Hidrogeológicamente se considera de poca importancia por su nivel de saturación profundo y la mala selección granulométrica de la unidad.
- **Abanico de Agustín Codazzi (Qaag):** El espesor de esta unidad es de 60 m (40 m en promedio) disminuyendo hacia la planicie aluvial; se encuentra conformado por fragmentos de rocas sedimentarias detriticas y calizas embebidos en una matriz arenosa, con intercalaciones de arcilla y capas espesas de arenas. Es discordante con el Grupo Cogollo (Kmc). Esta unidad está conformada por un acuífero libre con niveles freáticos de 3 a 6 m de profundidad, con aguas de tipo

bicarbonatada cálcico-magnésica y conductividades de 200 a 300 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$. Es considerado como un acuífero de pequeña importancia hidrogeológica.

- **Abanico Casacará (Qac):** Litológicamente se encuentra conformado por intercalaciones de arena, limo y arcilla con niveles aislados de gravas, depositadas sobre rocas cretácicas aflorantes en la Serranía del Perijá, que conforman los sistemas de acuíferos en la zona. El espesor indicado es de 20 m con resistividades de 40 hasta los 150 Ohm-m. En esta unidad se encuentra desarrollado un acuífero libre con niveles freáticos de 6 a 8 m de profundidad, el cual, es explotado por aljibes >10 m de profundidad y rendimientos de 0.5 a 1 l/seg. El agua es dulce y de tipo bicarbonatada cálcico-magnésica, con conductividades eléctricas promedio de 200 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$. Por sus características hidrogeológicas es incluido como de poca importancia.
- **Abanico de La Jagua de Ibiríco (Qalj):** Conformado por fragmentos de rocas metasedimentarias y volcánicas (aglomerados volcánicos), con un espesor sugerido de 70 a 100 m; se plantea al desarrollo de un acuífero libre de poca importancia hidrogeológica debido a sus características litológicas y grado de disección generando niveles freáticos profundos.

d) **Sistema Acuífero Terrazas (Qt):** Localizados dominanteamente al NE de la cabecera municipal de Valledupar (márgenes de los ríos Guatapurí, Cesar y Badillo), conformado por sedimentos clásticos gruesos embebidos en una matriz arenosa de grano medio a grueso, y espesores de 10 a 25 m; los valores de resistividad encontrados van desde los 60 a 250 Ohm-m, donde se desarrolla un acuífero libre con niveles estáticos entre los 2 y 4 m, explotado por aljibes de 4 a 10 m de profundidad con caudales de 0.1 a 4 l/seg. El agua dulce identificada en este acuífero es de tipo bicarbonatada cálcico-magnésica con conductividad eléctrica >1000 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ (INGEOMINAS, 1995). El flujo regional de las aguas subterráneas presenta dos tendencias 1) NS y 2) SE descargando las aguas al Río Cesar. A la base se encuentra el sistema acuífero Llanura Aluvial (Qlla) presentando resistividades entre 25 y 40 Ohm-m y espesores entre los 150 y 200 m. Este sistema es considerado de manera local, al norte de Valledupar, de importancia hidrogeológica intermedia, debido a su caudal y su extensión; las terrazas localizadas de manera regional son consideradas de muy poca importancia hidrogeológica, por su poco espesor, salvo la identificada en la Jagua de Ibiríco la cual presenta espesores entre los 10 y 25 m con resistividades entre 40 y 1000 Ohm-m; allí se desarrolla un acuífero libre entre los 10 y 23 m de profundidad y niveles estáticos de entre 3 y 13 m, con presencia de agua dulce (conductividad eléctrica de 200 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$) de tipo bicarbonatada cálcico-magnésico y sulfatado clorurado cálcico-magnésico, considerada esta terraza (Jagua de Ibiríco) como de poca importancia hidrogeológica.

e) **Sistema Acuífero Sedimentitas de Arjona (Tpaa):** Sistema exclusivo de la subprovincia Hidrogeológica Planicie del Cesar, aflorando en el extremo centro oeste del departamento. Se encuentra asociada a los Bloques tectónicos Ariguaní, Los Venados, Codazzi-Sicarare, Becerril-La Loma y Astrea-San Alberto. En el Bloque Ariguaní esta unidad presenta resistividades desde los 5 hasta los 30 y los 70 Ohm-m en el municipio de El Paso, con niveles piezométricos entre 4.5 y 10 m de profundidad, generando acuíferos confinados. En los Bloques tectónicos Los Venados, Codazzi-Sicarare, Becerril-La Loma y Rincón Hondo, las resistividades van desde los 10 hasta los 50 Ohm-m, sugiriendo buenas posibilidades acuíferas. La calidad del agua dulce en los alrededores de Curumaní es de tipo bicarbonatada sódica y puntualmente cálcica. En general este

sistema se comporta como un acuífero confinado de tipo multicapa, de extensión regional limitada y continuo y de importancia hidrogeológica intermedia.

f) Sistema Acuífero Formación Cuesta (Tmc): Se encuentra aflorando en la zona centro de la subprovincia hidrogeológica Planicie del Cesar, entre las poblaciones de La Loma y Becerril, y presentes en los Bloques Tectónicos Becerril-La Loma (como parte de los plegamientos, sobre el sistema Formación Cuervos y cubierto parcialmente por el sistema de Llanura Aluvial), Rincón Hondo (cubierto por sedimentos de los sistemas Qlla y Tpaa) y Ariguaní (al sur de potrerillo a 100 m de profundidad y cubierto por el sistema Sedimentitas de Arjona y Depósitos de Llanura Aluvial). La litología en general de este sistema está definida por la presencia de sedimentos semiconsolidados de areniscas cuarzosa de grano medio, con intercalaciones de conglomerados de matriz arenosa, areniscas con costras ferruginosas y arcillolitas limosas conformando un espesor de 800 m aprox. El Bloque Becerril-La Loma está determinado por la presencia de dos tipos de acuífero 1) confinado multicapas y 2) libre, con niveles estáticos desde los 3.5 a los 10.5 m de profundidad y conductividades hidráulicas entre 5 y 25 m/día. En cuanto a los bloques tectónicos Ariguaní y Rincón Hondo, el sistema Formación Cuesta presenta un nivel confinado con un espesor >100 m y resistividades de 100 Ohm-m, sugiriendo capas acuíferas importantes y bajas resistividades a la base (8 Ohm-m). En resumen, este sistema presenta acuíferos no continuos de extensión regional limitada, libres y confinados de tipo multicapa, considerado como de mediana importancia hidrogeológica, debido a su baja productividad.

g) Sistema Acuífero Formación Barco (TpB): Se presenta exclusivamente en la subprovincia hidrogeológica de la Serranía del Perijá, como parte del anticlinal y sinclinal de La Jagua. Información de perforaciones sugieren que éste hace parte de la Planicie del Cesar y está asociado a los bloques tectónicos Codazzi-Sicarare (cubiertos por un espesor de 20 y 30 m de sedimentos del sistema de Llanura Aluvial y resistividades de 25 hasta 100 Ohm-m) y Becerril-La Loma, como parte de la secuencia terciaria plegada. Litológicamente está conformado por bancos de areniscas deleznables de grano fino (2 m de espesor) intercaladas con capas de arcillolitas amarillentas, desarrollando acuíferos no continuos de extensión regional limitada, de tipo multicapas, confinado y semiconfinado. Presenta localmente una conductividad hidráulica de 5 m/día y geoquímicamente las aguas son de tipo bicarbonatada cálcica a sódica y clorurada sódica. Este sistema acuífero es considerado como de importancia hidrogeológica pequeña.

Grupo de Rocas Fracturadas y Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Pequeña.

Representado por rocas detriticas y calcáreas compactas con porosidades secundarias por fracturamiento, mejoradas localmente por disolución (karstificación).

Los sistemas acuíferos que la conforman son: Formación La Luna (Ksl), Grupo Cogollo (Kmc) y Formación Río Negro (Kir) de edad cretácica y origen marino, mismo origen para la Formación Los Cuervos (Tec) de edad terciaria. Las conductividades son amplias, desde alta a baja, en acuíferos generalmente confinados a semiconfinados. En conjunto funcionan como sistemas de recarga, encontrándose en la subprovincia hidrogeológica Planicie del Cesar y haciendo parte de las estructuras presentes en dicha planicie. Estas estructuras son cubiertas por el Sistema Acuífero Llanura Aluvial (Qlla), el cual los confina.

- a) **Sistema Acuífero Formación La Luna (Ksl):** Conformado de base a techo por alternancia de lutitas negras carbonosas, limolitas, arcillolitas y calizas negras bituminosas en estratos delgados a medianos, intercalados con chert y areniscas calcáreas, conformando un espesor de 180 m, con poca incidencia de recarga debido a la no disolución de los paquetes calcáreos. Este sistema se encuentra asociado a los bloques Codazzi-Sicarare y Becerril-La Loma, presentando importante fracturamiento y procesos de disolución (karstificación) lo que los convierte en importantes almacenadoras de aguas subterráneas. Localmente presenta resistividades entre 60 a 300 Ohm-m y espesor entre 30 y 70 m, con pozos de profundidades entre los 60 y 180 m, hacia la Falla Media Luna se presentan resistividades >200 Ohm-m y hacia el bloque Becerril-La Loma se presentan disminuciones de las resistividades (50 a 500 Ohm-m) sugiriendo disminuciones en el grado de fracturamiento o karstificación. Las aguas salobres a dulces (aguas duras) de este acuífero son de tipo bicarbonatada calcio-magnésica a sódica, presenta una conductividad hidráulica de 10 m/día; las características en general para este sistema que incluye acuíferos locales discontinuos de tipo libre a confinado, se considera de importancia hidrogeológica grande a pequeña.
- b) **Sistema Acuífero Grupo Cogollo (Kmc):** Es el más ampliamente distribuido en el departamento. Se presenta en las cuatro (4) subprovincias hidrogeológicas y en el subsuelo de la planicie del Cesar, como parte de estructuras geológicas presentes en la zona asociada a los bloques tectónicos Los Venados (resistividades entre 30 y 300 Ohm-m), Codazzi-Sicarare (profundidades >350 m y resistividades de 100 a 200 Ohm-m), Becerril-La Loma (situación desfavorable por el alto ángulo de buzamiento) y Rincón Hondo (resistividades entre los 25 y 150 Ohm-m). La litología dominante son intercalaciones gruesas de calizas, calizas arenosas y delgadas capas de limolitas calcáreas diaclasadas y procesos de karstificación (en la Serranía del Perijá), conformando una secuencia de 1200 a 3000 m. Los afloramientos son considerados como zonas de recarga. Las aguas dulces en su mayoría, para este tipo de sistema, son bicarbonatadas sódicas o magnésicas, salobres para el sector de Bosconia-Caracolí. Este sistema es definido como de importancia hidrogeológica variando de grande a pequeña.
- c) **Sistema Acuífero Formación Río Negro (Kir):** Secuencia conformada por areniscas de grano grueso, areniscas conglomeráticas y conglomerados con matriz arenosa, con intercalación de limolitas y arcillolitas rojas y verdosas, localmente poco sementadas e intensamente fracturadas, presentando en general espesores variables entre 80 y 400 m. Este sistema es considerado de pequeña importancia hidrogeológica, debido a que las zonas de recarga están restringidas a afloramientos de poca extensión y amplias zonas sin conexión hidráulica presentes en el pie de monte. Las profundidades de ocurrencia en la Planicie del Cesar, y la cobertura espesa en dicha zona hace difícil su exploración y captación. Este sistema está conformado por acuíferos semiconfinados a confinados de carácter local debido a que dependen de la presencia de fracturamiento en la unidad o área de exposición. Hacia Rincón Hondo, se presentan pozos con profundidades desde los 20 hasta los 30 m con niveles estáticos de 4.5 a 6 m de profundidad. De manera puntual el agua dulce de este sistema se considera de tipo bicarbonatada cárlico-magnésico.
- d) **Sistema Acuífero Formación Los Cuervos (Tec):** Hace parte del sinclinal y anticinal de La Jagua y del bloque tectónico Becerril-La Loma (hace parte de estructuras plegadas); conformado por arcillas negras, grises, verdosas y amarillentas, con delgadas intercalaciones de areniscas de grano medio con matriz arcillosa y mantos de carbón y un espesor para la unidad de 400 m. Se caracteriza por presentar

valores de resistividad entre 20 y 50 Ohm-m; las conductividades hidráulicas halladas indican que son altas en los mantos de carbón y coeficientes de almacenamiento variables (1×10^{-3} a 1×10^{-5}) sugiriendo condiciones semiconfinadas a confinadas. El agua es dulce de tipo bicarbonatada magnésica de manera puntual con conductividades de 950 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ hacia El Descanso-Plan Bonito. Este sistema es clasificado como un sistema acuífero de tipo multicapa semiconfinado a confinado de carácter local y pequeña importancia hidrogeológica.

Grupo de Sedimentos y Rocas Porosas o Fracturadas con Muy Pequeña Importancia Hidrogeológica o Sin Importancia.

Grupo representado por tres clases hidrogeológicas conformadas por depósitos sedimentarios cuaternarios de origen fluvio-lacustre, granulometría fina; otros de origen coluvial y glaciar conformados por gravas polimícticas, embebidas en un matriz fina, y rocas sedimentarias terciarias de granulometría fina con porosidad primaria y secundaria; rocas triásico-jurásicas con porosidad primaria y secundaria, de tipo sedimentaria y volcanosedimentarias; y rocas volcánicas, ígneas y metamórficas desde cretácicas a precámblicas con alguna porosidad. Estas unidades presentan conductividades hidráulicas bajas a muy bajas factor determinante para ser consideradas como de pequeña a muy pequeña importancia hidrogeológica y con posibilidades de ausencia de los acuíferos, o presencia de estos en áreas o corredores de rocas fracturadas, zonas de meteorización o con selección de tamaño moderada, permitiendo conductividades hidráulicas medias. Se destaca una unidad en este sistema como se indica a continuación:

- **Sistema Acuífero Depósitos Fluviolacustres (Qfl):** Definido únicamente en la subprovincia Planicie del Cesar, aflorando en una franja paralela al Río Magdalena. Esta zona corresponde a las ciénagas inundables conformadas sedimentológicamente por limos-arcillosas con lentes arenosos; la prospección geeléctrica arroja espesores >15 m con resistividades de 5 Ohm-m, granulometría que sugiere conductividad hidráulica baja, con desarrollo de acuíferos locales de poca extensión y de tipo libre en general; niveles freáticos locales de 2 a 3 m de profundidad. Este es considerado como de muy pequeña importancia hidrogeológica.

En términos generales, los acuíferos en la región presentan granulometrías finas a intermedias y localmente gruesas cuando obedecen a posibles levantamientos en la cuenca o avenidas torrenciales que generaron dichos depósitos. Son generalmente facies de grano fino conformadas por limos, arcillas y arenas constituyentes principales de las arcillolitas, lutitas y areniscas presentes en las formaciones cementadas a ligeramente cementadas. Los geopotenciales arrojados en la prospección geofísica sugieren resistividades que se encuentran principalmente entre los 5 hasta los 100 Ohm-m y > 100 Ohm-m cuando se encuentran rocas compactas, secas o fracturadas. La Formación Los Cuervos a pesar de tener importancia hidrogeológica pequeña, posee un alto potencial económico por las sucesiones de mantos de carbón presentes en la misma; las aguas son dominante dulces y de tipo bicarbonatadas cálcico-magnésicas a esporádicamente sódicas, hacia la zona centro y sur, en límites con la ciénaga de Zapatosa. Al parecer, las aguas son predominantemente cloruradas sódicas, sulfatada cloruradas, cálcico magnésicas. Regionalmente el acuífero de mayor importancia es el de la Llanura Aluvial (Qlla) debido a que la mayoría de aljibes y pozos se encuentran en este sistema.

2.2.2.1 Métodos Geoeléctricos

El análisis de la información suministrada por parte de la autoridad ambiental permitió establecer que para la definición del sistema acuífero Cesar, se han realizaron varias campañas de prospección geofísica utilizando sondeos eléctricos verticales y secciones geoeléctricas como herramienta principal, sumando un total de seiscientos cincuenta y tres (653) sondeos eléctricos verticales, tanto en el área de influencia directa del acuífero como en los alrededores. Del total de SEVs identificados solamente 291 son tomados para el presente trabajo (Tabla 4 y Figura 37).

En la Tabla 3 se presentan los valores de resistividad típicos para algunas de las rocas, sedimentos y fluidos que se encuentran más frecuentemente dentro de la corteza terrestre.

Tabla 3. Resistividades reales de los diferentes sedimentos y rocas.

Rocas o sedimentos	Resistividad (Ohm-m)
Arcilla	2 – 15
Arena seca	>1000
Arena saturada con agua dulce	20-150
Arena saturada con agua salobre	5 - 15
Arena saturada con agua salada	< 5
Grava saturada con agua dulce	50-300
Arenisca con agua dulce	30 - 50
Caliza porosa con agua dulce	< 500
Caliza compacta	> 500
Roca ígnea o metamórfica fracturada saturada con agua dulce	200 - 1000
Roca ígnea o metamórfica maciza	> 1000

Tabla 4. Tabla de Sondeos Eléctricos Verticales compilada para la zona del sistema acuífero Cesar:

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
1	SEVCC-01	1046721	1587979	61
2	SEVCC-02	1045819	1590717	63
3	SEVCC-03	1043777	1593238	65
4	SEVCC-04	1042918	1596354	69
5	SEVCC-05	1040830	1601688	94
6	SEVCC-06	1030560	1591833	82
7	SEVCC-07	1025438	1588854	72
8	SEVPDC-01	1075427	1558444	-
9	SEVPDC-02	1075087	1557822	-
10	SEVPDC-03	1074392	1557649	-
11	SEVPDC-04	1073374	1557444	-
12	SEVPDC-05	1071715	1556635	-
13	SEVPDC-06	1073069	1556067	-
14	SEVPDC-07	1073720	1555272	-
15	SEVPDC-08	1071873	1556633	-

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
16	SEVPDC-09	1071379	1556635	-
17	SEVPDC-10	1067829	1560187	-
18	SEVPDC-11	1068656	1559561	-
19	SEVPDC-12	1068954	1560305	-
20	SEVPDC-13	1070325	1562164	-
21	SEVPDC-14	1069674	1561514	-
22	SEVPDC-15	1068417	1558774	-
23	SEVPDC-16	1069750	1556663	-
24	SEVPDC-17	1069003	1556913	-
25	SEVPDC-18	1070818	1558069	-
26	SEVPDC-19	1071215	1559204	-
27	SEVPDC-20	1071971	1560790	-
28	SEVPDC-21	1071561	1560130	-
29	SEVPDC-22	1068621	1557072	-
30	SEVPDC-23	1067313	1557002	-
31	SEVPDC-24	1067018	1555321	-
32	SEVPDC-25	1066331	1557303	-
33	SEVPDC-26	1071455	1558036	-
34	SEVPDC-27	1071661	1557391	-
35	SEVPDC-28	1073130	1557738	-
36	SEVPDC-29	1070773	1555835	-
37	SEVPDC-30	1070626	1554910	-
38	SLSEV-01	1046925	1558655	-
39	SLSEV-02	1045351	1560649	-
40	SLSEV-03	1044057	1562670	-
41	SLSEV-04	1042215	1561063	-
42	SLSEV-05	1045429	1564420	-
43	SLSEV-06	1042908	1564603	-
44	SLSEV-51	1048810	1556535	-
45	SEVR-01	1064398	1529375	57
46	SEVR-02	1065783	1533599	60
47	SEVR-03	1067372	1536881	64
48	SEVR-04	1069554	1539655	76
49	SEVR-05	1072489	1542115	83
50	SEVR-06	1075530	1543879	106
51	SEVR-07	1077382	1547753	99
52	SEVR-08	1081786	1550741	119
53	SEVR-09	1078540	1552154	94
54	SEVR-10	1075020	1552971	85
55	SEVR-11	1073076	1556071	76

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
56	SEVR-12	1069478	1556625	80
57	SEVR-13	1055553	1555626	50
58	SEVR-14	1066178	1556966	67
59	SEVR-15	1062602	1558085	65
60	SEVR-16	1059128	1557094	52
61	SEVR-17	1054437	1552412	46
62	SEVR-18	1052119	1555433	44
63	SEVR-19	1084563	1552973	121
64	SEVR-20	1086046	1556273	112
65	SEVR-21	1086909	1559846	116
66	SEVR-22	1082280	1547212	156
67	SEVR-23	1087674	1567011	97
68	SEVR-24	1088077	1570532	94
69	SEVR-25	1088466	1573979	86
70	SEVR-26	1088883	1577470	93
71	SEVR-27	1089279	1580796	104
72	SEVR-28	1082878	1579639	84
73	SEVR-29	1086266	1579051	90
74	SEVR-30	1064278	1525601	53
75	SEVR-31	1064651	1522159	52
76	SEVR-32	1062622	1519447	53
77	SEVR-33	1069674	1534455	75
78	SEVR-34	1073639	1533731	92
79	SEVR-35	1060895	1528366	44
80	SEVR-36	1061590	1522254	49
81	SEVR-37	1050562	1527076	29
82	SEVR-38	1053534	1527134	33
83	SEVR-39	1060738	1525052	46
84	SEVR-40	1057388	1527765	40
85	SEVR-41	1055800	1524774	34
86	SEVR-42	1057908	1534696	40
87	SEVR-43	1058862	1531364	43
88	SEVR-44	1064081	1537981	57
89	SEVR-45	1060474	1538303	53
90	SEVR-46	1056984	1538284	48
91	SEVR-47	1053875	1536770	39
92	SEVR-48	1054562	1533347	37
93	SEVR-49	1055962	1541689	43
94	SEVR-50	1053594	1548665	41
95	SEVR-51	1048810	1556535	41

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
96	SEVR-52	1055016	1544960	38
97	SEVR-53	1047272	1551361	39
98	SEVR-54	1057292	1577956	49
99	SEVR-55	1070315	1543990	71
100	SEVR-56	1070056	1532332	74
101	SEVR-57	1067179	1531057	63
102	SEVR-58	1081593	1541341	187
103	SEVR-59	1081516	1543284	162
104	SEVR-60	1078502	1543397	123
105	SEVR-61	1084766	1566963	98
106	SEVR-62	1089394	1564388	124
107	SEVR-63	1080112	1549623	112
108	SEVR-64	1090189	1554028	161
109	SEVR-65	1087939	1554849	141
110	SEVR-66	1086386	1563002	120
111	SEVR-67	1088086	1560770	125
112	SEVR-68	1077968	1580580	74
113	SEVR-69	1080430	1580095	76
114	SEVR-70	1083828	1563227	100
115	SEVR-71	1083168	1561108	99
116	SEVR-72	1087237	1563604	109
117	SEVR-73	1080171	1551878	99
118	SEVR-74	1071245	1556475	86
119	SEVR-75	1074029	1554536	78
120	SEVR-76	1076820	1552447	86
121	SEVR-77	1078690	1548725	110
122	SEVR-78	1067780	1556938	71
123	SEVR-79	1064404	1557522	69
124	SEVR-80	1060633	1557711	56
125	SEVR-81	1055994	1553057	39
126	SEVR-82	1053269	1552265	40
127	SEVR-83	1057644	1556392	55
128	SEVR-84	1056859	1554665	46
129	SEVR-85	1053843	1555957	50
130	SEVR-86	1089133	1554987	142
131	SEVR-88	1075497	1548821	95
132	SEVR-89	1072418	1548987	93
133	SEVR-90	1070499	1548927	70
134	SEVR-91	1069019	1548666	64
135	SEVR-92	1071641	1547850	75

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
136	SEVR-93	1071913	1545524	79
137	SEVR-94	1068726	1546376	69
138	SEVR-95	1078099	1539680	117
139	SEVR-96	1075873	1541541	111
140	SEVR-97	1074595	1581284	65
141	SEVR-98	1071226	1581975	65
142	SEVR-99	1068184	1580373	56
143	SEVR-100	1065894	1577917	50
144	SEVR-101	1054938	1557383	45
145	SEVR-102	1056157	1558805	49
146	SEVR-103	1055635	1562214	51
147	SEVR-104	1057471	1559702	46
148	SEVR-105	1054830	1565558	46
149	SEVR-106	1056143	1566893	44
150	SEVR-107	1063004	1567512	52
151	SEVR-108	1059561	1567206	52
152	SEVR-109	1083163	1570115	83
153	SEVR-110	1080329	1571968	69
154	SEVR-111	1077117	1571798	69
155	SEVR-112	1057616	1569979	47
156	SEVR-113	1059337	1572887	49
157	SEVR-114	1062359	1574104	51
158	SEVR-115	1064035	1575916	52
159	SEVR-116	1047131	1559058	42
160	SEVR-117	1050554	1535308	32
161	SEVR-118	1052809	1536963	30
162	SEVR-119	1044936	1545942	36
163	SEVR-120	1045279	1547868	35
164	SEVR-121	1046189	1549875	35
165	SEVR-122	1054112	1541346	39
166	SEVR-123	1050194	1541457	39
167	SEVR-124	1052119	1541580	36
168	SEVR-125	1050571	1545470	38
169	SEVR-126	1050715	1547694	39
170	SEVR-127	1052533	1546979	40
171	SEVR-128	1060001	1547338	57
172	SEVR-129	1056882	1546498	47
173	SEVR-130	1058360	1547014	51
174	SEVR-131	1053232	1526058	33
175	SEVR-132	1053062	1523395	32

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
176	SEVR-133	1052929	1520437	33
177	SEVR-134	1054965	1522448	37
178	SEVR-135	1054015	1518769	34
179	SEVR-136	1060391	1520110	46
180	SEVR-137	1069840	1541704	84
181	SEVR-138	1060833	1539660	53
182	SEVR-139	1058992	1543021	43
183	SEVR-140	1067794	1561428	61
184	SEVR-141	1067878	1559917	71
185	SEVR-142	1070117	1561837	64
186	SEVR-143	1069027	1560681	61
187	SEVR-144	1082585	1545101	181
188	SEVR-145	1083769	1551226	117
189	SEVR-146	1084153	1555359	107
190	SEVR-147	1082499	1555388	99
191	SEVR-148	1081043	1555824	103
192	SEVR-149	1079309	1555293	94
193	SEVR-150	1057502	1530904	34
194	SEVR-151	1050609	1550889	38
195	SEVR-152	1074136	1557547	75
196	SEVR-153	1046610	1572307	47
197	SEVR-154	1044233	1569869	46
198	SEVR-155	1076248	1579119	69
199	SEVR-156	1074734	1577684	68
200	SEVR-157	1077609	1582673	76
201	SEVR-158	1059047	1517247	42
202	SEVR-159	1061527	1516720	52
203	SEVR-160	1076264	1584230	71
204	SEVR-161	1081029	1579264	77
205	SEVR-162	1085911	1576290	88
206	SEVR-163	1049292	1575362	48
207	SEVR-164	1048019	1573754	49
208	SEVR-165	1065096	1568267	52
209	SEVR-166	1067315	1568349	56
210	SEVR-167	1069677	1568366	65
211	SEVR-168	1072130	1567626	64
212	SEVR-169	1073170	1570241	62
213	SEVR-170	1075358	1570986	68
214	SEVR-171	1074812	1566919	72
215	SEVR-172	1077765	1567206	78

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
216	SEVR-173	1080448	1568583	78
217	SEVR-174	1068376	1565956	63
218	SEVR-175	1066039	1565089	57
219	SEVR-176	1063719	1563743	55
220	SEVR-177	1064431	1561448	64
221	SEVR-178	1060473	1561225	59
222	SEVR-179	1063904	1559526	59
223	SEVR-180	1067761	1558285	70
224	SEVR-181	1058275	1554097	46
225	SEVR-182	1059848	1553715	53
226	SEVR-183	1061602	1553002	54
227	SEVR-184	1063418	1553144	54
228	SEVR-185	1065495	1553148	62
229	SEVR-186	1067419	1552875	67
230	SEVR-187	1069186	1553196	77
231	SEVR-188	1067453	1550472	63
232	SEVR-189	1067133	1548114	59
233	SEVR-190	1064876	1548178	58
234	SEVR-191	1064587	1546075	56
235	SEVR-192	1062904	1549339	51
236	SEVR-193	1060951	1550693	56
237	SEVR-194	1058799	1551731	49
238	SEVR-195	1056964	1550761	45
239	SEVR-196	1055947	1549112	43
240	SEVR-197	1061280	1543095	48
241	SEVR-198	1063956	1543715	66
242	SEVR-199	1066343	1542481	67
243	SEVR-200	1068084	1543988	58
244	SEVC-1	1099255	1558010	-
245	SEVC-2	1099470	1557197	-
246	SEVC-3	1094552	1555955	-
247	SEVC-4	1093799	1549887	-
248	SEVC-5	1090765	1546780	-
249	SEVC-6	1089731	1543182	-
250	SEVC-7	1092011	1552581	-
251	SEVC-8	1085303	1545538	-
252	SEVC-9	1083440	1550585	-
253	SEVC-10	1087526	1562415	-
254	SEVC-11	1070441	1562603	-
255	SEVC-12	1085887	1555541	-

Nro.	ID_SEV	ESTE	NORTE	ALTURA
256	SEVC-13	1074546	1557443	-
257	SEVC-14	1057613	1560117	-
258	SEVC-15	1055087	1557197	-
259	SEVC-16	1047893	1553881	-
260	SEVC-17	1080348	1564620	-
261	SEVC-18	1070893	1565655	-
262	SEVC-19	1078712	1555672	-
263	SEVC-20	1076883	1561285	-
264	SEVB-01	1033914	1593320	78
265	SEVB-02	1035510	1597488	84
266	SEVB-03	1034433	1594931	88
267	SEVB-04	1024707	1592540	102
268	SEVB-05	1025176	1592895	107
269	SEVB-06	1022168	1592645	110
270	SEVB-07	1022172	1592682	109
271	SEVB-08	1021536	1594705	-
272	SEVB-09	1021533	1594740	-
273	SEVB-10	1019058	1593556	71
274	SEVB-11	1018111	1593556	66
275	SEVB-12	1017034	1592372	64
276	SEVB-13	1015089	1591216	60
277	SEVB-14	1024627	1605195	127
278	SEVB-15	1024460	1605325	127
279	SEVB-16	1024326	1065239	130
280	SEVV-01	1089123	1651594	224
281	SEVV-02	1076456	1636740	-
282	SEVV-03	1076278	1636957	-
283	SEVV-04	1076095	1637223	-
284	SEVV-05	1076767	1637245	-
285	SEVV-06	1075976	1636934	-
286	SEV-1	1046925	1558655	-
287	SEV-2	1045351	1560649	-
288	SEV-3	1044057	1562670	-
289	SEV-4	1042215	1561063	-
290	SEV-5	1045429	1564420	-
291	SEV-6	1042908	1564603	-

Fuente: Base de Datos suministrada por CORPOCESAR.

Nota: SEVPDC: Sondeos Eléctricos Verticales PRODEC. SLSEV: Sondeos Eléctricos Verticales Sloane. SEVR: Sondeos Eléctricos Verticales Regionales (CORPOCESAR y Universidad del Magdalena, 2011). SEVC: Sondeos Eléctricos Verticales Calenturitas. SEVB: Sondeos Eléctricos Verticales Bosconia. SEVV: Sondeos Eléctricos Verticales Valledupar. SEVCC: Sondeos Eléctricos Verticales CORPOCESAR.

La tomografía geoeléctrica como alternativa de mayor resolución para la prospección de aguas subterráneas es un método de resistividad multielectrónico, basado en la modelización 2-D de la resistividad del suelo y subsuelo mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas) cuyo arreglo geométrico varía dependiendo del objetivo de estudio. Cabe destacar que actualmente se está avanzando en el modelamiento 3-D. Este método permite evaluar las variaciones resistivas tanto en la vertical como en la lateral con el fin de obtener una sección 2-D de resistividades reales del subsuelo (Figura 38). Destacando que tiene grandes ventajas: es una herramienta de carácter no destructivo, con un bajo costo, es de fácil implementación, adecuado por optimización de tiempo, combinando adecuadamente resolución lateral y profundidad de investigación; permite además determinar la presencia de filtraciones de agua a profundidad, mediante la ubicación de zonas con marcadas disminuciones de geopotencial y caracterizar geométricamente el objetivo o problema (Zúñiga, 2011).

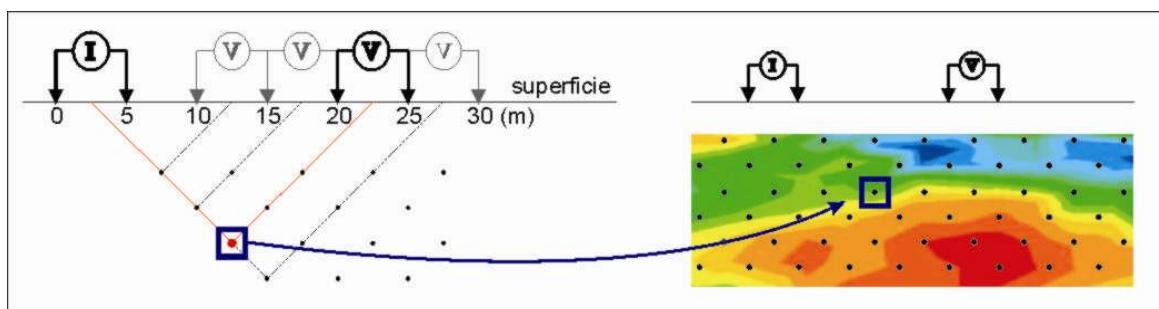


Figura 38. Representación simplificada de la técnica de Tomografía Eléctrica para un arreglo dipolo-dipolo. (Chávez et al., 2011; en: Zúñiga 2011).

En la evaluación de la documentación suministrada por la autoridad ambiental, no se identifica implementación de este método en la prospección de aguas subterráneas, por lo cual se recomienda su implementación para zonas que posean alta complejidad litoestructural o en áreas donde se requiera la evaluación por contaminación de los acuíferos (análisis de la vulnerabilidad).

2.2.2.2 Método Magnetométrico

Este método permite identificar los rasgos de unidades geológicas a través de las propiedades magnéticas o susceptibilidad magnética de los diferentes materiales, permitiendo obtener contrastes de lectura, el factor geológico en zonas planas no es de mayor relevancia comparado con las zonas abruptas donde el efecto topográfico es importante. Puede ser una herramienta importante para la búsqueda de acuíferos desarrollados en zonas fracturadas (porosidad secundaria). Una de las limitantes del método es que la búsqueda de agua a profundidades mayores de un kilómetro puede ser muy difícil e infructuosa. Se realizan interpretaciones de tipo cuantitativos y cualitativos.

Información específica sobre estudios magnetométricos no fueron identificados; por lo tanto, es una alternativa que puede ser usada si se desea conocer a mayor profundidad el comportamiento de las unidades y su relación con el acuífero, además del contraste de materiales con el basamento; es de resaltar que,

probablemente las compañías petroleras que realizaron evaluaciones con fines económicos cuenten con información frente a este aspecto, la cual no fue suministrada por los mismos, previa solicitud por parte de la autoridad ambiental.

2.2.2.3 Método Electromagnético

Mediante la conductividad eléctrica y la permeabilidad eléctrica se determina la respuesta del terreno cuando se propagan a través del mismo campo electromagnético. Técnicas en las que predominan las corrientes de conducción son: 1) De fuente de inducción próxima: FDEM (Prospección electromagnética en dominio de frecuencias) o TDEM (Prospección electromagnética en dominio de tiempos) y 2) de fuente de inducción lejana: V.L.F. Permite definir zonas de fracturas o contactos litológicos verticales (diques) y define la presencia de un medio conductor en el subsuelo. El Geo-Radar o GPR es una técnica en las que predominan las corrientes de desplazamiento.

En la evaluación de la información secundaria suministrada por la autoridad ambiental, no se observó la implementación de este método para la prospección subterránea en el sistema acuífero Cesar.

2.2.2.4 Método Gravimétrico

Este método mide la densidad de los materiales, permitiendo localizar y determinar la morfología del techo y la roca base impermeable, la homogeneidad lateral y vertical de dicho nivel y la homogeneidad lateral y vertical del acuífero, ubicación de huecos y cavidades en acuíferos de origen kárstico, geometría de cuencas sedimentarias y evaluación de campos petroleros como apoyo a la exploración sísmica principalmente.

Para el sistema acuífero Cesar, en la evaluación documental, no se encontraron análisis de este tipo para la prospección de aguas subterráneas; sin embargo, es posible que las compañías prospectoras de hidrocarburos posean información de importancia para el acuífero, dada su versatilidad en la aplicación.

2.2.2.5 Métodos Sísmicos

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas son utilizadas para determinar comúnmente campos de hidrocarburos; no obstante, para aguas subterráneas permite localizar y definir la morfología del techo de la roca base, geometría del acuífero, características generales del acuífero y determinación de los niveles freáticos, profundidad de la roca sana, caracterización del basamento rocoso, determinación de la estratigrafía y geometría del subsuelo, como apoyo a la detección de aguas subterráneas y evaluación de bancos de material (arena, grava, roca, entre otros).

Para el sistema acuífero Cesar, en los documentos consultados no se evidencia aplicación del método; es claro que debido a que la cuenca del Cesar es una de las cuencas consideradas como importantes yacimientos de hidrocarburos, es seguro que las compañías interesadas en hidrocarburos posean dicha información; la cual fue solicitada por parte de la autoridad ambiental.

En ese orden de ideas la geofísica utilizada en general en el Acuífero priorizado está limitada al usos de los Sondeos Eléctricos Verticales, los cuales han permitido estudiar los medios estratificados tanto horizontales a semi-horizontales, ayudando a investigar de manera puntual los materiales verticalmente presentes; sin embargo, se requiere de homogeneidad lateral de las facies, lo cual en muchos casos es de difícil identificación por estos métodos dada la complejidad estructural y la variación litológica intrínseca de los materiales. Es de resaltar la importancia de integrar al modelo hidrogeológico la posible información existente perteneciente a las compañías de prospección de hidrocarburos, como también las de las compañías mineras diferentes a los sondeos eléctricos verticales que se tienen inventariados.

2.3 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA (PAS)

Los puntos de captación de agua subterránea (PAS) son en esencia sistemas que permiten el acceso a un depósito de agua subterránea para ser utilizada en diversas actividades domésticas y/o agropecuarias. La Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR) ha venido realizando inventarios de PAS desde el año 2004 hasta el 2017, donde se logran identificar puntos tipo pozos, aljibes, aljibe – pozos, manantiales y piezómetros, a los que se les han practicado análisis fisicoquímicos y algunos han sido sometidos a pruebas de bombeo. En cada visita a los puntos inventariados se han tenido en cuenta las condiciones sanitarias para considerar las posibles afectaciones que puede llegar a tener el punto y el acuífero del cual se está abasteciendo.

En total se identificaron 4246 PAS en el sistema acuífero Cesar en los municipios de Valledupar, La Paz, San Diego, Codazzi, Chiriguaná, Curumaní, El Paso, Bosconia, La Jagua de Ibiríco y Becerril (Figura 39). Cabe resaltar que en algunos casos en las bases de datos con las que cuenta Corpocesar se presenta información para un mismo punto en diferentes años, razón por la cual se conservó la información del inventario más actualizado con el fin de evitar duplicidad en los datos. De esta manera se obtuvo información de 750 PAS del inventario del año 2004, 3 PAS del año 2005, 513 PAS del año 2006, 464 PAS del año 2007, 92 PAS del año 2008, 366 PAS del año 2009, 133 PAS del año 2011, 140 PAS del año 2012, 579 PAS del año 2013, 211 PAS del año 2014, 536 PAS del año 2015, 33 PAS del año 2017 y 426 PAS sin año definido (correspondientes a las bases de datos entre los años 2004 y 2007). No obstante, es importante aclarar que el inventario es cambiante, dado que para cada visita al mismo predio puede existir un mayor o menor número de puntos (PAS nuevos, cerrados o abandonados) y teniendo en cuenta que muchos de los puntos han sido visitados solamente una vez durante el período 2004-2017 es posible pensar que muchos de los puntos ya no existen o por el contrario existan unos nuevos que no han sido inventariados. Por lo tanto, los datos aquí presentados son una aproximación al número real de PAS existentes en acuífero.

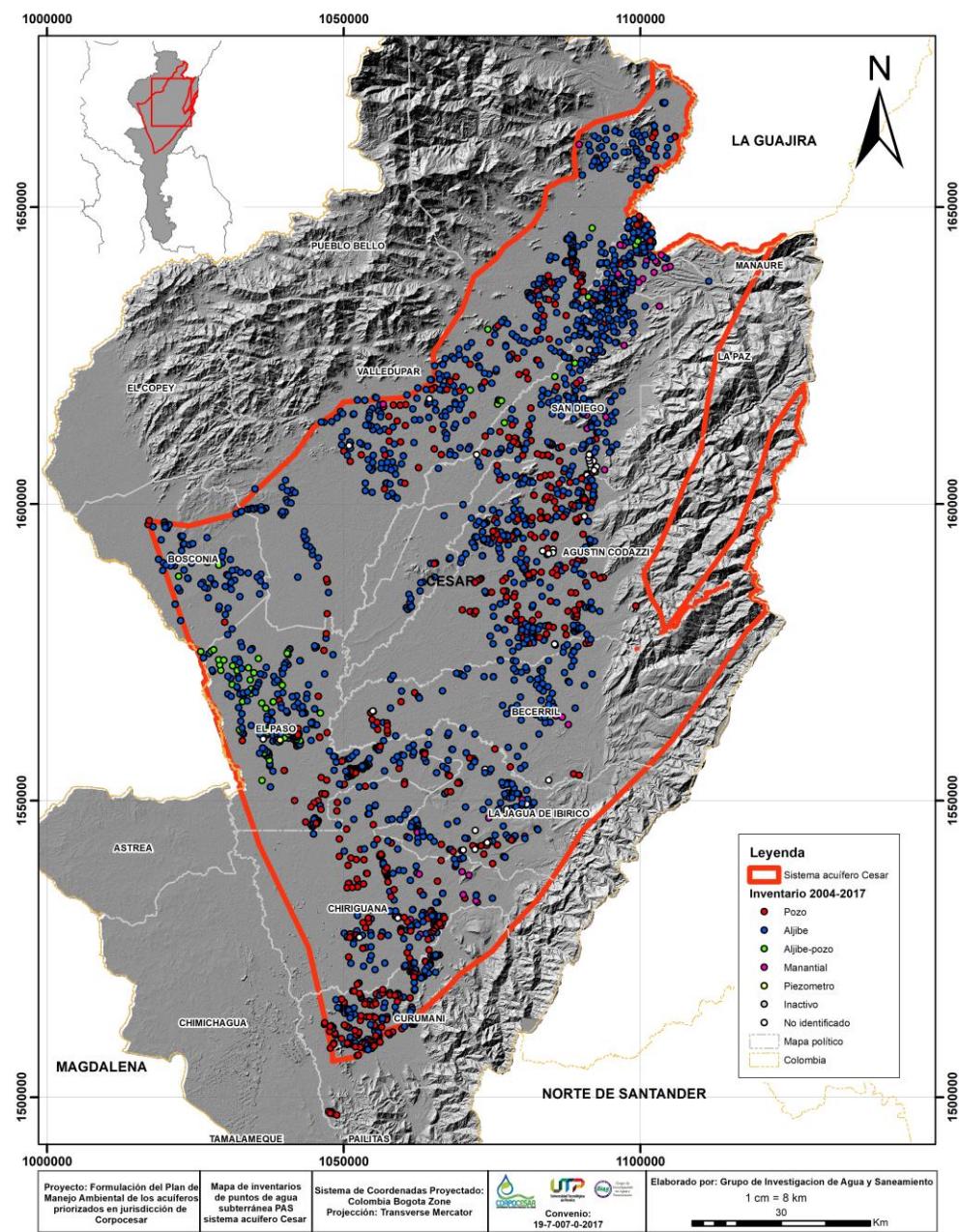


Figura 39. Mapa de inventarios de puntos de agua subterránea - PAS realizados entre los años 2004-2017 en el sistema acuífero Cesar.

2.3.1 Distribución de PAS por municipio

En la Figura 40 se muestra la distribución de PAS por municipio, en el cual se aprecia que el aprovechamiento de aguas subterráneas se da principalmente en el municipio de Valledupar, donde se localiza el 23.8% de los puntos identificados en la zona, seguido por Codazzi con el 15.2%, Curumaní con el 12.8%, El Paso con el

11.2%, Chiriguaná con el 9.4%, San Diego con el 7.7%, La Jagua de Ibirico con el 7.2%, La Paz con el 6.1%, Bosconia con el 3.7% y Becerril con el 2.9%.

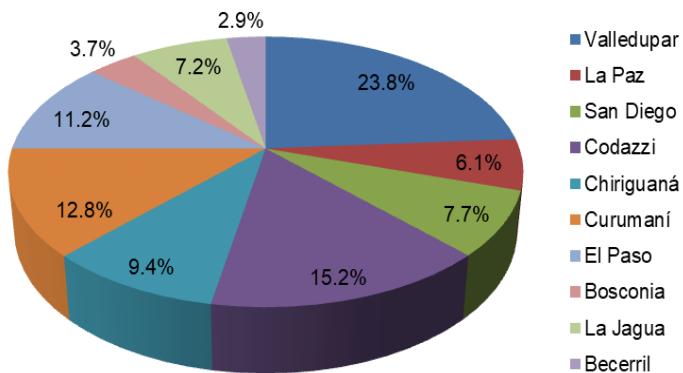


Figura 40. Distribución de puntos de agua subterránea por municipio.

2.3.2 Tipos de PAS en el sistema acuífero Cesar

En la Tabla 5 y Figura 41 se presenta el resumen del inventario de PAS por tipo de punto en el sistema acuífero Cesar, y en la que se observa que la mayoría de puntos corresponden a Aljibes (3009 puntos, es decir el 70.9%), seguido de Pozos (1047 puntos, equivalente al 24.7%), Aljibe – Pozo (75 puntos que corresponde al 1.8%), Manantial (59 puntos, igual al 1.4%) y Piezómetros (4 puntos, es decir el 0.1%). De igual forma se evidencia que 52 puntos (el 1.2%) no están identificados.

Tabla 5. Resumen de inventario de puntos de agua por tipo – sistema acuífero Cesar.

Tipo de Punto	Número de Puntos
Pozo	1047
Aljibe	3009
Aljibe – Pozo	75
Manantial	59
Piezómetro	4
Sin informar	52
Total	4246

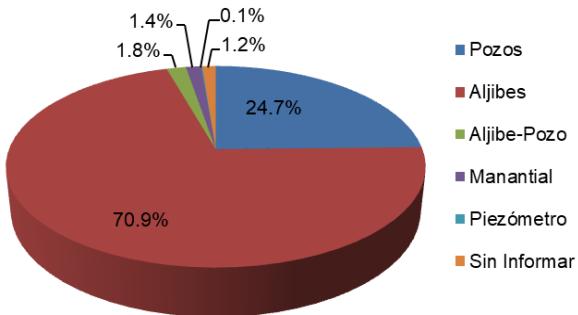


Figura 41. Distribución del inventario de puntos de agua (por tipo) – sistema acuífero Cesar.

2.3.3 Concesiones de agua subterránea en el sistema acuífero Cesar

En la Tabla 6 se muestra que en el acuífero Cesar se han otorgado 36 concesiones de agua subterránea (para un total de 50 PAS), de las cuales 10 fueron otorgados en Valledupar (15 PAS), 5 en Chiriguaná (6 PAS), 4 en Bosconia (6 PAS), 4 en El Paso (4 PAS), 4 en Curumaní (4 PAS), 3 en Agustín Codazzi (7 PAS), 2 en La Paz (2 PAS), 2 en San Diego (3 PAS), 1 en la Jagua de Ibiríco (1 PAS) y 1 en Becerril (2 PAS).

Tabla 6. Concesiones de agua subterránea otorgadas en el sistema acuífero Cesar.

MUNICIPIO	CONCESIONES	PAS
Valledupar	10	15
Chiriguaná	5	6
Bosconia	4	6
El Paso	4	4
Curumaní	4	4
Agustín Codazzi	3	7
La Paz	2	2
San Diego	2	3
La Jagua de Ibiríco	1	1
Becerril	1	2
TOTAL	36	50

Como se observa en la Tabla 7 y Figura 42, de estos 50 PAS con concesión de agua subterránea, 14 son para riego (28%), 11 para uso doméstico e industrial (22%), 9 para uso doméstico (18%), 4 para uso industrial (8%), 4 para riego y abrevadero (8%), 3 para lavado de vehículos (6%), 2 para ganadería (4%), 1 para uso doméstico, abrevadero y riego (2%), 1 para uso pecuario y doméstico (2%), y 1 para procesos generales (2%).

Tabla 7. PAS con concesión de agua subterránea por uso

USO	PAS
Riego	14
Doméstico e industrial	11
Doméstico	9
Industrial	4
Riego y abrevadero	4
Lavado de vehículos	3
Ganadería	2
Doméstico, abrevadero y riego	1
Pecuario y doméstico	1
Procesos generales	1
TOTAL	50

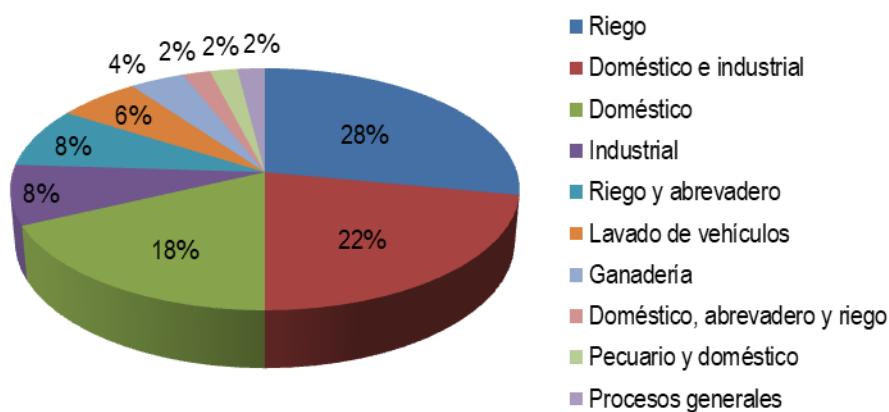


Figura 42. Distribución de los PAS con concesión de agua subterránea por uso.

2.3.4 Estado actual de los PAS

Como se observa en la Figura 43 un alto porcentaje de los PAS se encuentran productivos (62.2%), el 7.6% de los PAS se encuentran abandonados, el 2.5% inactivos, el 15% no reporta estado y el 11.8% de ellos están en estado de reserva, los cuales son utilizados como fuente de abastecimiento secundaria durante períodos de escasez del recurso superficial.

Es de aclarar que en el inventario de los PAS se reportan 19 en estado seco (0.45%), 13 dañados (0.31%), 7 en monitoreo (0.2%) y 3 sellados (0.07%) que no se incluyeron en la Figura 43 ya que no tienen un número representativo en el sistema acuífero Cesar.

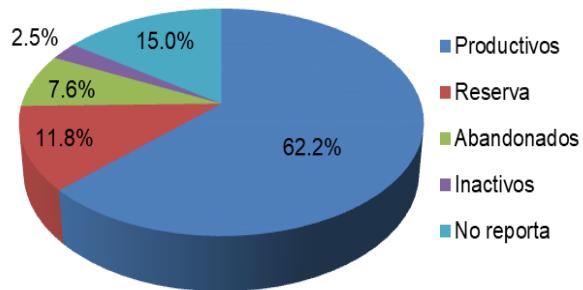


Figura 43. Condiciones generales de los PAS.

2.3.5 Propiedades organolépticas de los PAS

Dentro de la información disponible de las propiedades organolépticas sólo se cuenta con el parámetro de Apariencia, del cual se puede concluir que el recurso hídrico es de apariencia clara en el 33,2% de los PAS y que en el 2,9% de los PAS el recurso es de apariencia turbia; sin embargo, es de anotar que el 63,9% de los PAS no presenta información al respecto, tal como se muestra en el Figura 44.

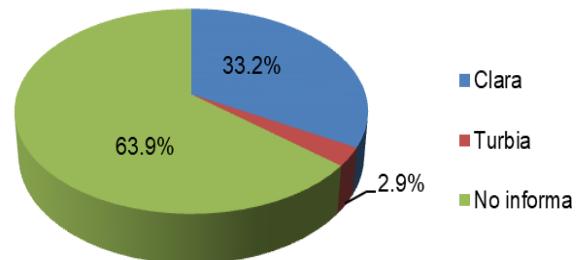


Figura 44. Característica organoléptica del agua (Apariencia).

2.3.6 Usos de los PAS

De los usos reportados para los 4246 PAS inventariados (Tabla 8), se observó que el 60.9% se destina para consumo humano (es decir 3299 PAS, que benefician a 230760 personas), el 31.5% para actividades pecuarias, el 7.1% para agricultura y el 0.4% para uso industrial y de servicios (Figura 45). Es necesario aclarar que un mismo PAS puede estar destinado para varios usos.

Tabla 8. Usos de los PAS.

USO	NÚMERO DE PAS
Consumo humano	3299
Agricultura	385
Pecuario	1706
Industrial y servicios	24
TOTAL	5414

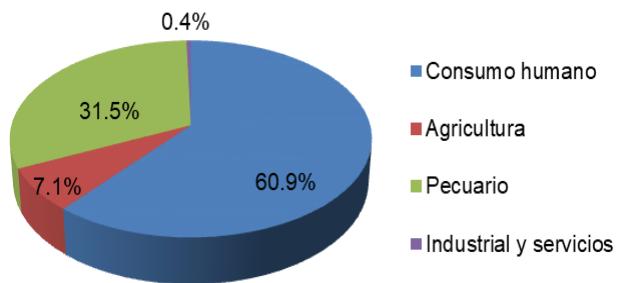


Figura 45. Distribución de los usos de los PAS.

2.3.6.1 Uso pecuario

En la Tabla 9 se puede apreciar que dentro de los 1703 PAS destinados para la actividad pecuaria, es la ganadería vacuna el uso con la mayor representatividad (el 42.5%), seguido de los caprinos y porcinos con el 0.4%, y equinos, avícola y piscícola con el 0.1% cada uno; sin embargo, el 56.5% de los PAS no definen el tipo de animal para el cual es destinado el recurso.

Tabla 9. PAS destinados al uso pecuario (por tipo de animal).

TIPO DE ANIMAL	PAS	Porcentaje
Vacuno	724	42.5%
Caprino	7	0.4%
Porcino	7	0.4%
Equino	1	0.1%
Avícola	1	0.1%
Piscícola	1	0.1%
No definido	962	56.5%
TOTAL	1703	100%

2.3.6.2 Uso agrícola

En la Tabla 10 y Figura 46 se observa que el pasto es el cultivo con el mayor número de PAS (130, correspondiente al 52.8%) en el sistema acuífero Cesar, seguido por frutales (38 PAS, equivalente al 15.4%), pancoger (32 PAS, igual al 13%), palma de aceite (24 PAS, es decir el 9.8%), Maíz (9 PAS, correspondiente al 3.7%), sorgo (7 PAS, igual al 2.8%) y plátano y cacao (con 6 PAS, equivalente al 2.4%); sin embargo, en lo referente a la cobertura (en hectáreas) de cada tipo de cultivo (Tabla 10 y Figura 47), se observa que el pasto es el cultivo con el mayor cubrimiento (2890.75 Ha, es decir el 50.1%), seguido por la palma de aceite (1431.75 Ha, correspondiente al 24.8%), frutales (1049.03 Ha, igual al 18.2%), plátano y cacao (231.02 Ha, equivalente al 4%), Maíz (88.5 Ha, correspondiente al 1.5%), Sorgo (59.25 Ha, equivalente al 1%) y Pancoger (14.98 Ha, igual al 0.3%).

Tabla 10. PAS y hectáreas cubiertas para uso agrícola

Tipo de cultivo	PAS	Hectáreas
Pasto	130	2890.75
Palma de aceite	24	1431.75
Frutales	38	1049.03
Pancoger	32	14.98
Maíz	9	88.5
Sorgo	7	59.25
Plátano y cacao	6	231.02
TOTAL	246	5765.28

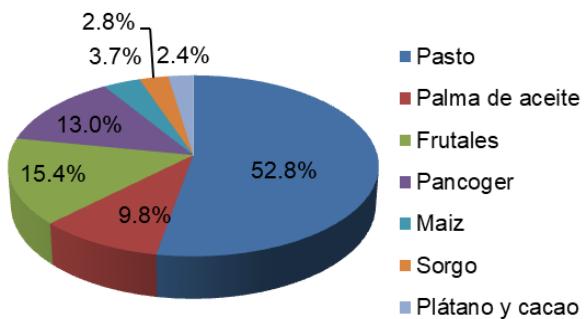


Figura 46. Distribución de los PAS por tipo de cultivo

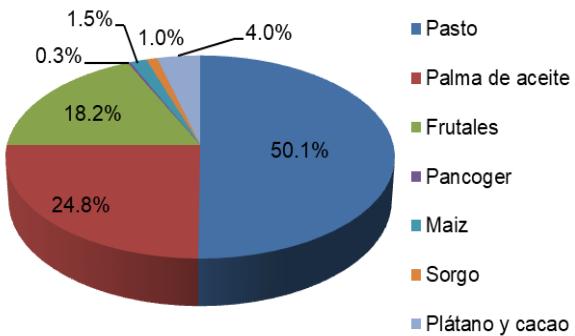


Figura 47. Distribución de las hectáreas por cultivo

2.3.6.3 Uso industrial y servicios

En la Tabla 11 y la Figura 48, se aprecia que dentro de las actividades industriales o de servicios son los lava autos los que tienen el mayor número de PAS (10, equivalente al 41.7%), seguidos por las ladrilleras (con 4 PAS, igual al 16.7%), geotermia (con 3 PAS, es decir el 12.5%), lácteos (con 2 PAS, correspondiente al 8.3%), y por planta trituradora, laboratorio de asfaltos y empaque de agua potable (cada una con 1 PAS, es decir el 4.2%). También se observa que 2 PAS (el 8.3%) no identifican el tipo de actividad.

Tabla 11. PAS por tipo de actividad industrial o de servicios.

Actividad	PAS
Lava autos	10
Ladrillera	4
Lácteos	2
Planta trituradora	1
Laboratorio de asfaltos	1
Empaque de agua potable	1
Geotermia	3
Sin informar	2
TOTAL	24

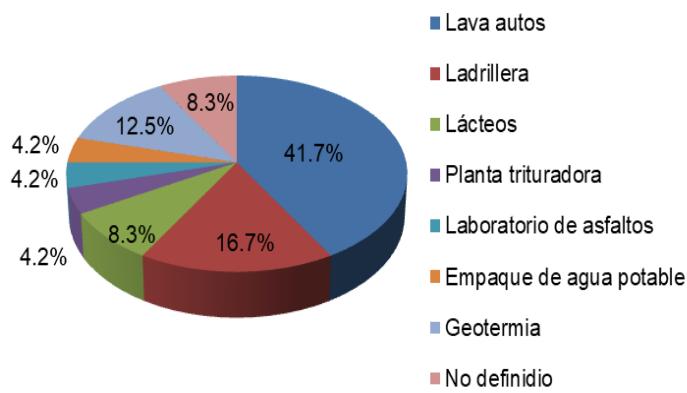


Figura 48. Distribución de las actividades industriales o de servicios

2.3.7 Condiciones sanitarias y de seguridad de los PAS

A pesar de la importancia que tiene el recurso en la zona, muchos PAS presentan problemas sanitarios asociados con la presencia de residuos sólidos u orgánicos, heces de ganado cerca de las captaciones y bordes o grietas en la estructura que facilitan el ingreso de aguas superficiales al interior de los mismos (Figura 49). Con respecto a las características de protección, las condiciones más críticas se presentan por la ausencia de cubiertas adecuadas, falta de pisos de cemento alrededor de las captaciones y cercos inadecuados (Figura 50).

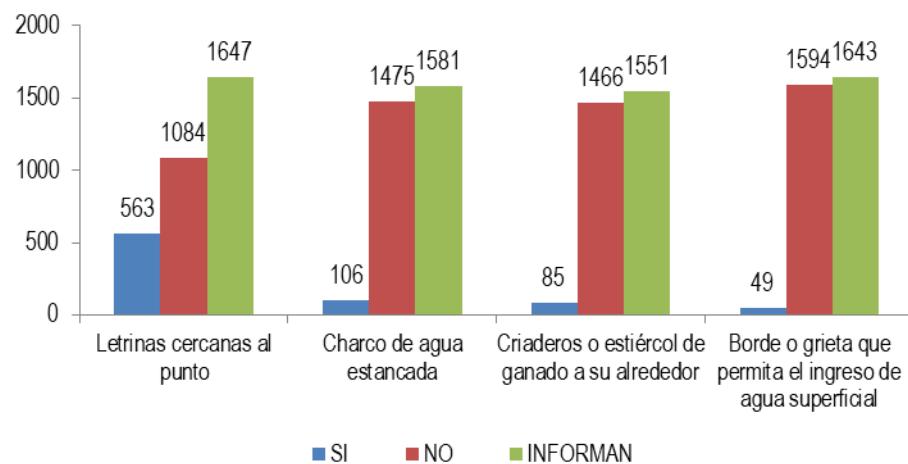


Figura 49. Condiciones sanitarias de los PAS.

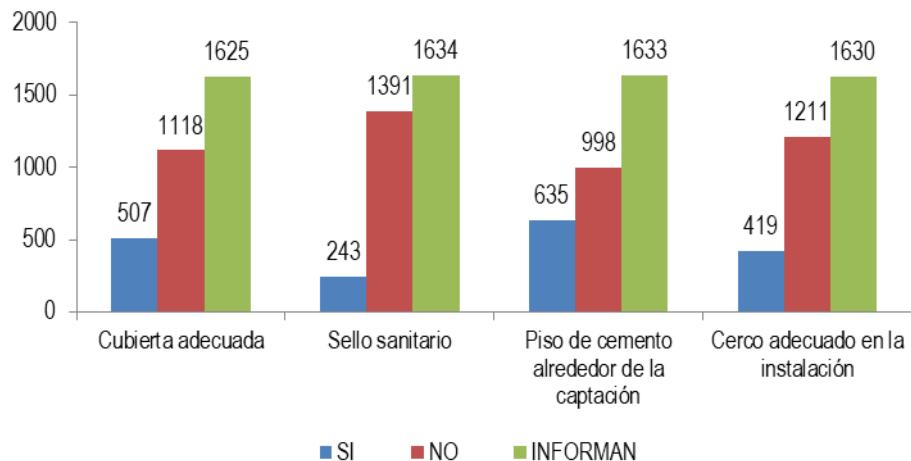


Figura 50. Condiciones de protección de los PAS.

2.3.8 Mapas de pH, temperatura y conductividad

Los mapas de pH, temperatura y conductividad fueron construidos con el inventario de PAS del año 2015. Los valores registrados de los parámetros fisicoquímicos de pH, Temperatura y Conductividad para ese año presentan una gran diferencia entre sus valores mínimos y máximos como se aprecia en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros fisicoquímicos (valores mínimos, máximos y promedio)

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio
pH	4.93	8.5	7.2
Temperatura (°C)	7.55	38	31.4
Conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	1.73	3130	357.4

Los valores de pH para el recurso hídrico subterráneo oscilan entre 4.93 y 8.5, con un promedio de 7.2. En esta variación se debe tener en cuenta que la regulación principal del pH en el agua subterránea se da por la relación de gases de dióxido de carbono disuelto, y carbonatos y bicarbonatos disueltos en las sales minerales; esta relación se ve alterada cuando hay variaciones en la temperatura o cuando los PAS son sometidos a procesos de bombeo para extraer el recurso puesto que, por el abatimiento se reduce la presión de la masa líquida y se presenta escape de parte del dióxido de carbono (Gómez, 1995).

En la Figura 51 se observa la distribución espacial del pH en el sistema acuífero Cesar, el máximo rango permisible de las normas OMS, para agua potable es 6.5 – 9.0; situación que se presenta en la mayor parte de la extensión de las formaciones geológicas área de estudio.

Se observa que el pH se relaciona con la demanda de recurso hídrico, es decir, el pH incrementa en la parte Norte del acuífero en donde está la mayor parte de los PAS, en comparación con la zona sur. Las captaciones que captan los depósitos de llanura aluvial (Qlla) en zonas mineras, se presentan valores de pH que tienen a aumentar imprimiendo una química alcalina a las aguas subterráneas.

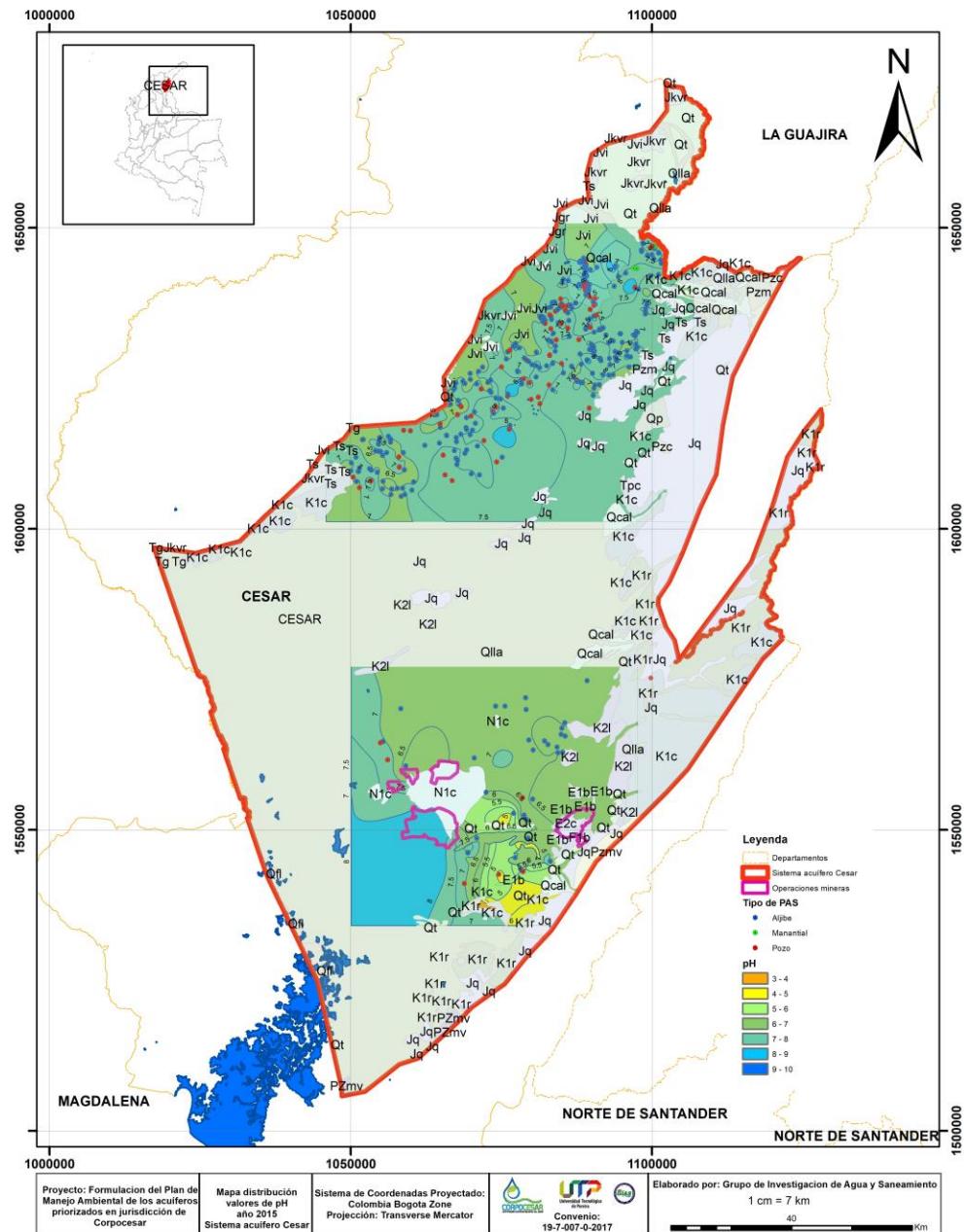


Figura 51. Mapa de distribución de pH en el sistema acuífero Cesar.

Con respecto a la temperatura se observa que sus valores oscilan entre 7.55°C y 38°C, con un promedio de 31.4°C. Es de señalar que el valor de 7.55°C es atípico en los PAS del sistema acuífero Cesar (solo un PAS presentó este resultado, y la siguiente temperatura mínima fue de 21.8°C).

En la Figura 52 se aprecia la distribución de la temperatura, los PAS captan de los depósitos de llanura aluvial (Qlla) y en la mayoría del área de estudio se puede hallar agua con temperatura que oscila entre 31°C y 37°C, seguido por zonas en donde la temperatura varía entre 25°C y 31°C. Generalmente la temperatura del

agua subterránea oscila en rangos muy estrechos y es igual o superior a la temperatura media anual registrada para la zona de estudio, en este caso 28.9°C (MINTIC, 2018).

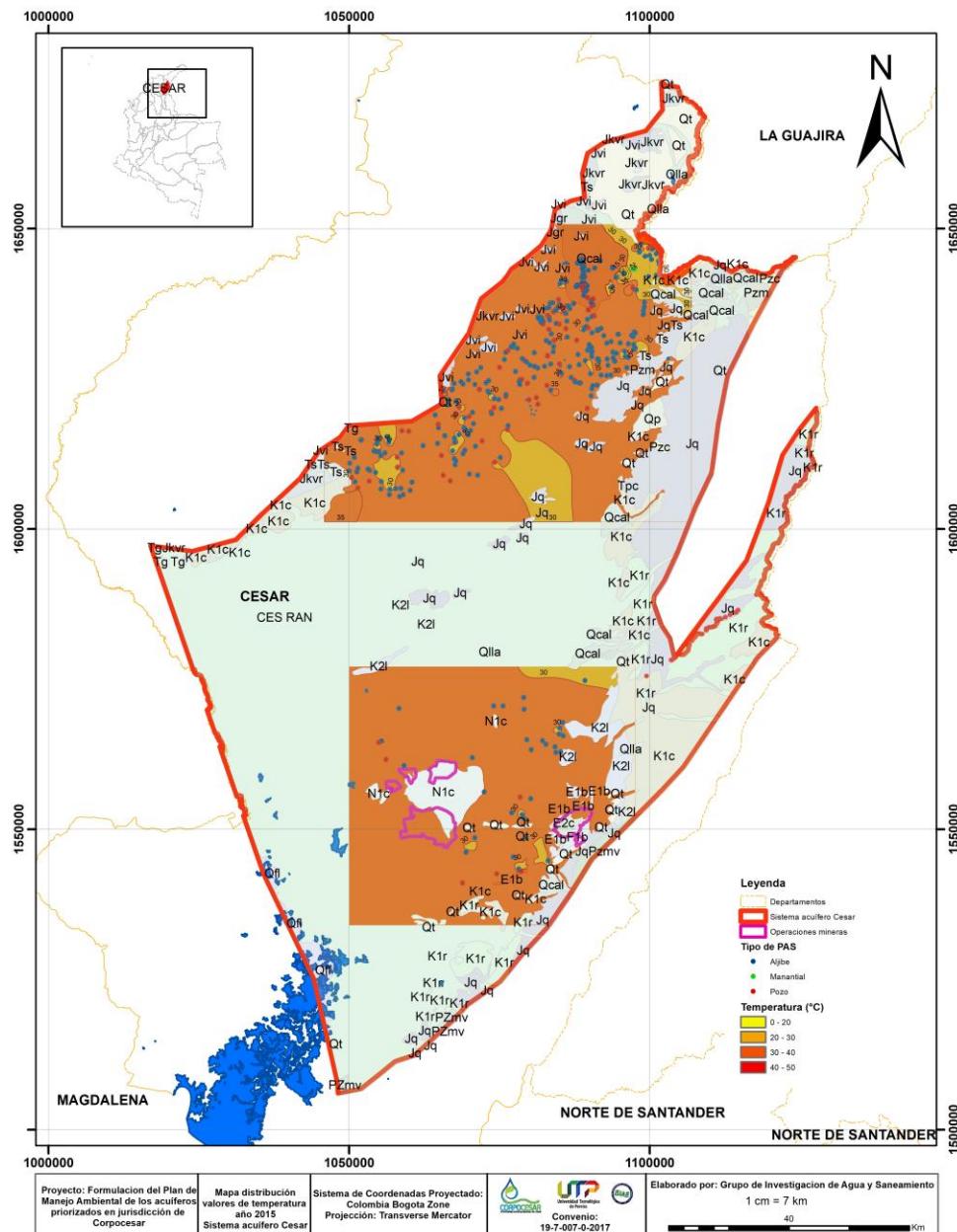


Figura 52. Mapa de distribución de temperatura en el sistema acuífero Cesar.

En lo referente a la conductividad eléctrica (capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica) se tienen valores que oscilan entre 1.73 y 3130, siendo 357.4 el valor promedio. Las variaciones en los valores de conductividad eléctrica se relacionan directamente con la temperatura, no obstante existen otros factores tales como los sistemas de riego, los usos del suelo, la recarga a través de fuentes superficiales cercanas, y la contaminación proveniente de efluentes domésticos y pecuarios. Los valores de conductividad de las aguas

subterráneas naturales varían considerablemente; valores normales en aguas dulces oscilan entre 100 y 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (IGME, 1985).

En la Figura 53 se observa la distribución espacial de la conductividad eléctrica, las aguas subterráneas de la primera capa acuífera de los depósitos de llanura aluvial (Qlla) captada principalmente por los aljibes o pozos de poca profundidad se clasifican como dulce.

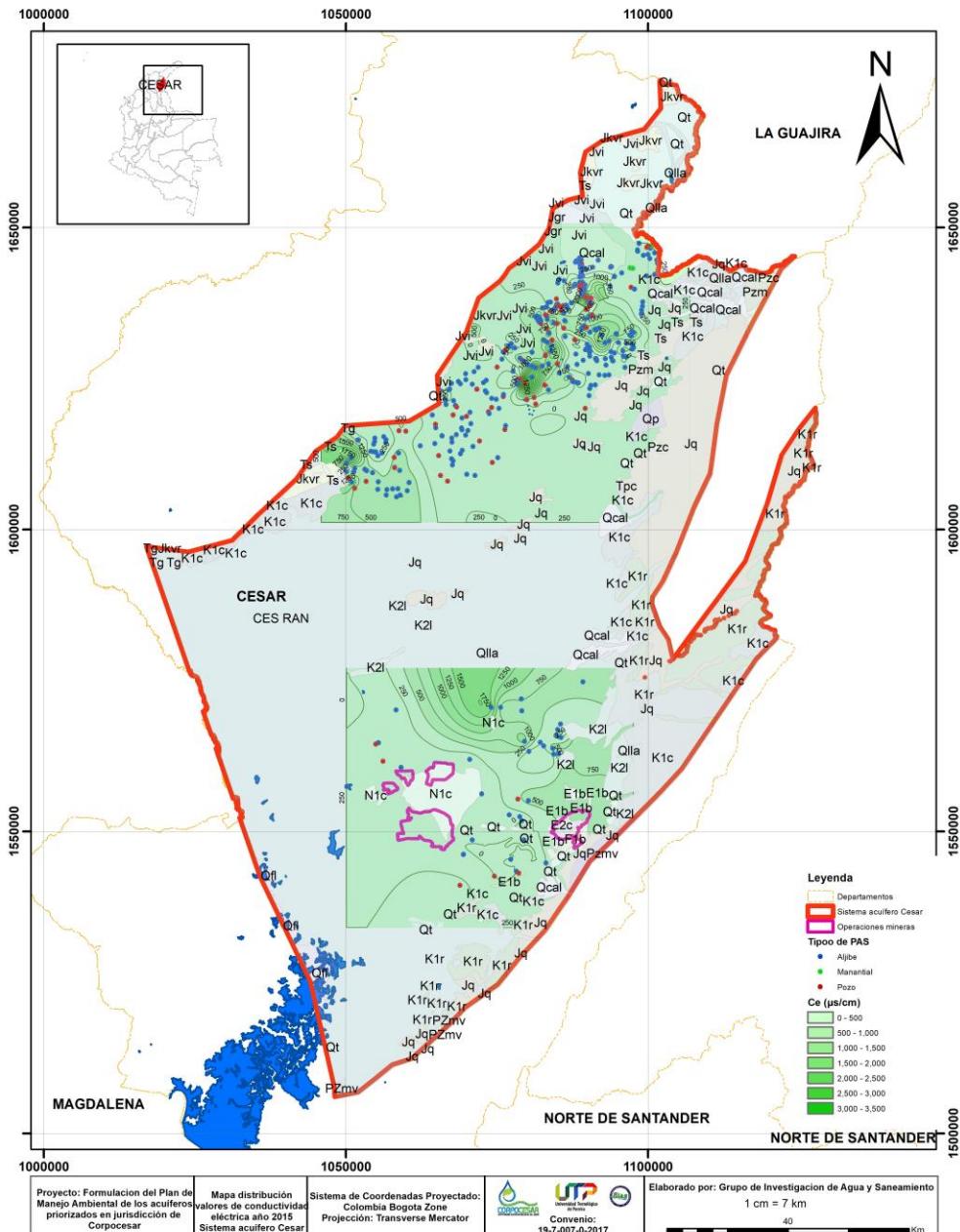


Figura 53. Mapa de distribución de la conductividad eléctrica en el sistema acuífero Cesar.

A continuación, se presenta de manera resumida la información más relevante del inventario de PAS para cada uno de los municipios de la zona priorizada (sistema acuífero Cesar).

2.3.9 Inventario de PAS del municipio de Valledupar

En el municipio de Valledupar se encuentran inventariados 1012 PAS de los cuales el 84.3% corresponden a puntos tipo aljibe, el 13.9% a pozos, el 1.1% a aljibe – pozo, el 0.3% a manantial y el 0.4% están sin identificar, como se muestra en la Figura 54. En el municipio se han otorgado 10 concesiones (para un total de 15 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 56.5% están productivos, el 6.7% en reserva, el 3.6% abandonados, el 1.2% inactivos y el 32% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 50.4% de los PAS y una población atendida de 10753 personas), seguido del pecuario (con el 35.6% de los PAS y 135626 animales beneficiados), agricultura (13.7% con una extensión de 23289.53 hectáreas) y uso industrial y servicios (con el 0.3% de los PAS). Aunque en el municipio, se cuenta con corrientes de agua superficiales en excelentes condiciones de calidad y cantidad, se puede observar que el agua subterránea se convierte en una importante fuente de abastecimiento para la zona rural del municipio.

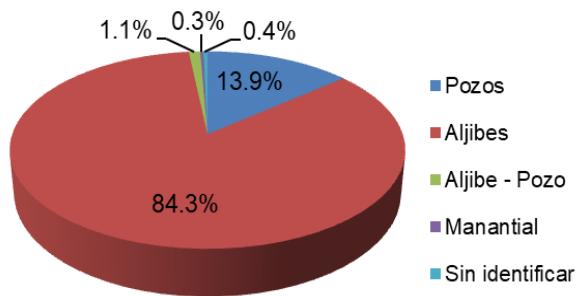


Figura 54. Distribución del tipo de PAS en el municipio de Valledupar.

2.3.10 Inventario de PAS del municipio de La Paz

En el municipio de La Paz se encuentran inventariados 258 PAS de los cuales el 69% corresponden a puntos tipo aljibe, el 15.5% a pozos, el 1.6% a aljibe – pozo, el 8.9% a manantial y el 5% sin identificar, como se observa en la Figura 55. En el municipio se han otorgado 2 concesiones de agua (para 2 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 54.7% están productivos, el 9.7% en reserva, el 11.6% abandonados, el 7.8% inactivos, el 1.6% secos, 0.4% sellados y el 14.3% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 63.1% de los PAS y una población atendida de 2585 personas), seguido del pecuario (con el 28.6% de los PAS y 11176 animales beneficiados) y agricultura (con el 8.4% de los PAS con una extensión de 88.5 hectáreas).

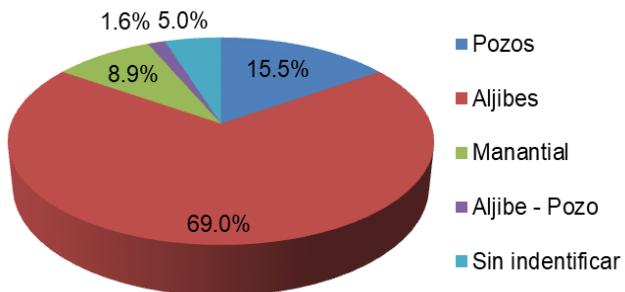


Figura 55. Distribución del tipo de PAS en el municipio de La Paz.

2.3.11 Inventario de PAS del municipio de San Diego

En el municipio de San Diego se encuentran inventariados 329 PAS de los cuales el 84.5% corresponden a puntos tipo aljibe, el 10.3% a pozos, el 2.7% a manantial y el 1.8% a aljibe – pozo, el 0.6% está sin identificar como se observa en la Figura 56. En el municipio se han otorgado 2 concesiones de agua (para 3 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 70.8% están productivos, el 10.3% en reserva, el 9.1% abandonados, el 0.9% seco y 8.8% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el pecuario (con el 48.5% de los PAS y 29858 animales beneficiados), seguido del consumo humano (con el 46.8% de los PAS y una población atendida de 3510 personas), agricultura (con el 4.4% de los PAS y con una extensión de 289.5 hectáreas) y servicios e industrial (con el 0.4% de los PAS).

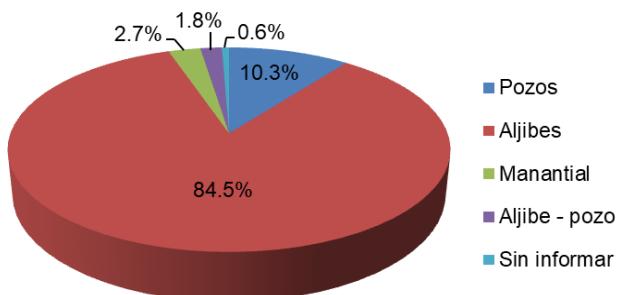


Figura 56. Distribución del tipo de PAS en el municipio de San Diego.

2.3.12 Inventario de PAS del municipio de Agustín Codazzi

En el municipio de Agustín Codazzi se encuentran inventariados 646 PAS de los cuales el 62.4% corresponden a puntos tipo aljibe, el 36.2% a pozos, el 0.3% a manantial y el 1.1% sin identificar como se observa en la Figura 57. En el municipio se han otorgado 3 concesiones de agua (para 7 PAS). En cuanto al

estado de los PAS, se tiene que el 54.3% están productivos, el 20% en reserva, el 20.1% abandonados, el 1.1% inactivo, el 0.2% sellado, el 0.9% obstruido, el 0.3% seco y el 3.1% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 62.1% de los PAS y una población atendida de 1736 personas), seguido del pecuario (con el 33.3% de los PAS y 62230 animales beneficiados) y agricultura (con el 4.7% de los PAS y con una extensión de 440 hectáreas).

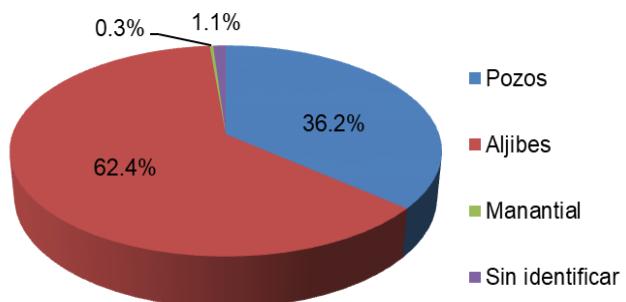


Figura 57. Distribución del tipo de PAS en el municipio de Agustín Codazzi.

2.3.13 Inventario de PAS del municipio de Chiriguaná

En el municipio de Chiriguaná se encuentran inventariados 398 PAS de los cuales el 51.8% corresponden a puntos tipo aljibe, el 45% a pozos, el 0.8 % a aljibe – pozo, el 2% a manantial y el 0.5% sin identificar como se observa en la Figura 58. En el municipio se han otorgado 5 concesiones de agua (para 6 PAS). En cuanto al estado de los PAS se tiene que el 68.6% está productivo, el 14.1% en reserva, el 6% abandonados, el 2% inactivo, el 0.3% en monitoreo, el 0.3% obstruido y el 8.8% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 76.8% de los PAS y una población atendida de 7834 personas), seguido del pecuario (con el 16.8% de los PAS y 17486 animales beneficiados), agricultura (con el 5.4% de los PAS y con una extensión de 64.77 hectáreas) y servicios e industrial (con el 1% de los PAS).

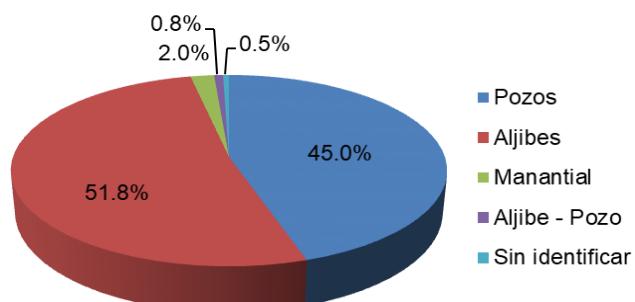


Figura 58. Distribución del tipo de PAS en el municipio de Chiriguaná.

2.3.14 Inventario de PAS del municipio de Curumaní

En el municipio de Curumaní se encuentran inventariados 542 PAS de los cuales el 56.6% corresponden a puntos tipo aljibe, el 42.8% a pozos y el 0.6% a manantial como se observa en la Figura 59. En el municipio se han otorgado 4 concesiones de agua (para 4 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 60.3% están productivos, el 9.2% en reserva, el 5% abandonados, el 5.4% inactivo, el 0.6% obstruidos, el 1.1% seco y el 18.5% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 74.8% de los PAS y una población atendida de 3449 personas), seguido del pecuario (con el 20.7% de los PAS y 11963 animales beneficiados), agricultura (con el 4.2% de los PAS y con una extensión de 1090.5 hectáreas) y servicios e industrial (con el 0.3% de los PAS).

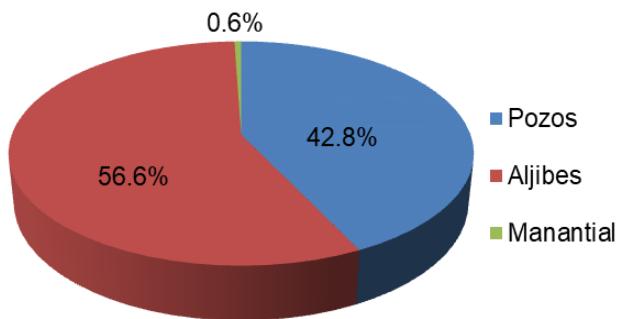


Figura 59. Distribución del tipo de PAS en el municipio de Curumaní.

2.3.15 Inventario de PAS del municipio de El Paso

En el municipio de El Paso se encuentran inventariados 477 PAS de los cuales el 70% corresponden a puntos tipo aljibe, el 18.4% a pozos, el 0.8% a piezómetros, el 9.6% a aljibe - pozo y el 1% sin identificar como se observa en la Figura 60. En el municipio se han otorgado 4 concesiones de agua (para 4 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 74.8% están productivos, el 8.2% en reserva, el 5% abandonados, el 6.1% inactivo, el 0.2% dañado, el 0.6% en monitoreo, el 0.2% seco y el 4.8% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 68.6% de los PAS y una población atendida de 47071 personas), seguido del pecuario (con el 25.8% de los PAS y 15515 animales beneficiados), agricultura (con el 4.5% de los PAS y con una extensión de 35.7 hectáreas) y servicios e industrial (con el 1.1% de los PAS).

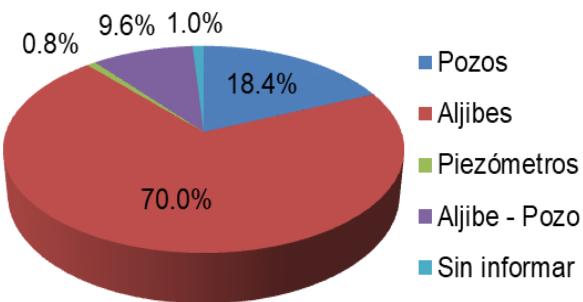


Figura 60. Distribución del tipo de PAS en el municipio de El Paso.

2.3.16 Inventario de PAS del municipio de Bosconia

En el municipio de Bosconia se encuentran inventariados 157 PAS de los cuales el 83% corresponden a puntos tipo aljibe, el 13% a pozos, el 3% a aljibe – pozo y el 1% a manantiales como se observa en la Figura 61. En el municipio se han otorgado 4 concesiones de agua (para 6 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 61% están productivos, el 22% en reserva, el 1% abandonado, el 1% obstruido, el 2% seco, el 13% no informan su estado. El uso predominante de los PAS es el pecuario (con el 50% de los PAS y 31875 animales beneficiados), seguido del consumo humano (con el 46.6% de los PAS y una población atendida de 142676 personas), agricultura (con el 3.1% de los PAS y con una extensión de 953 hectáreas) y servicios e industrial (con el 0.3% de los PAS).

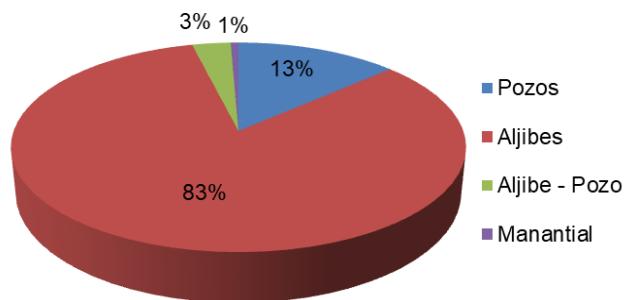


Figura 61. Distribución del tipo de PAS en el municipio de Bosconia.

2.3.17 Inventario de PAS del municipio de La Jagua de Ibiríco

En el municipio de La Jagua de Ibiríco se encuentran inventariados 304 PAS de los cuales el 74% corresponden a puntos tipo aljibe, el 19.1% a pozos, el 2.3% a manantial y el 4.6% sin identificar como se

observa en la Figura 62. En el municipio se ha otorgado 1 concesión de agua (para 1 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 68.8% están productivos, el 13.5% en reserva, el 4.3% abandonados, el 0.3% inactivo, el 0.3% sellado y el 12.8% no reportan su estado. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 81.6% de los PAS y una población atendida de 10984 personas), seguido del pecuario (con el 14.7% de los PAS y 2173 animales beneficiados), agricultura (con el 2% de los PAS y con una extensión de 229.28 hectáreas) y servicios e industrial (con el 1.7% de los PAS).

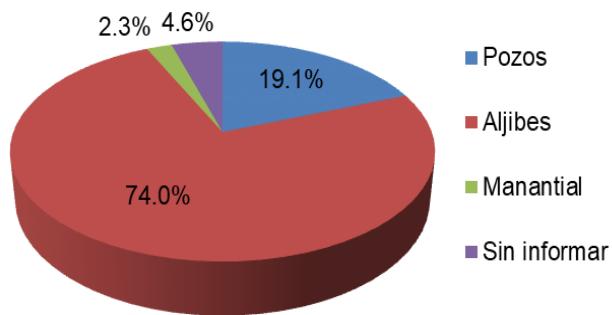


Figura 62. Distribución del tipo de PAS en el municipio de La Jagua de Ibiríco.

2.3.18 Inventario de PAS del municipio de Becerril

En el municipio de Becerril se encuentran inventariados 123 PAS de los cuales el 77.2% corresponden a puntos tipo aljibe, el 16.3% a pozos, el 2.4% a manantiales y el 4.1% sin identificar como se observa en la Figura 63. En el municipio se ha otorgado 1 concesión de agua (para 2 PAS). En cuanto al estado de los PAS, se tiene que el 65.9% están productivos, el 4.9% abandonados, el 18.7% en reserva, el 0.8% inactivo, el 2.4% en monitoreo y el 7.3% no informa. El uso predominante de los PAS es el consumo humano (con el 77.8% de los PAS y una población atendida de 162 personas), seguido del pecuario (con el 21.4% de los PAS y 3912 animales beneficiados) y agricultura (con el 0.9% de los PAS y con una extensión de 40 hectáreas).

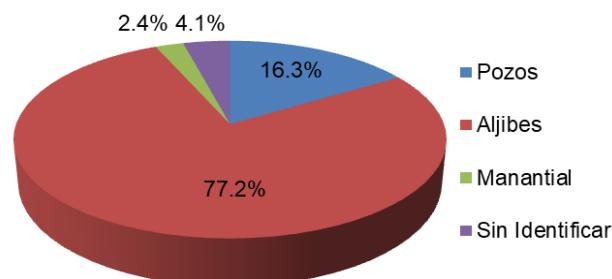


Figura 63. Distribución del tipo de PAS en el municipio de Becerril.

2.4 DETERMINACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO

2.4.1. Análisis de la información

De acuerdo con la base de datos suministrada por la Corporación Autónoma del Cesar -CORPOCESAR (2017-2018), entre los años 2004 y 2017 se han inventariado 4246 PAS (ver sección 2.3), de los cuales únicamente 3627 tienen información para ser localizados geográficamente. Existen vacíos de información en los años 2005, 2010 y 2016.

Los 3627 puntos que se tomaron como referencia para este análisis se encuentran distribuidos así: 1) Agustín Codazzi con 654 puntos, 2) Valledupar con 611 puntos, 3) Curumaní con 534 puntos, 4) El Paso con 463 puntos, 5) San Diego con 323 puntos, 6) La Jagua de Ibirico con 267 puntos, 7) La Paz con 251, 8) Chiriguaná con 247, 9) Bosconia con 154 y 9) Becerril con 123 (Figura 64). Adicional a esta información, se integraron algunas mediciones de las compañías mineras como complemento a la base de datos de la autoridad ambiental.

A continuación se describen los inventarios realizados en el sistema acuífero Cesar por anualidades y se hace referencia a cuál es el tamaño de la muestra representativa para la media de una población finita que será usada para el análisis y selección de los datos. Se toma un error de 0.75 m y un nivel de confianza del 95%.

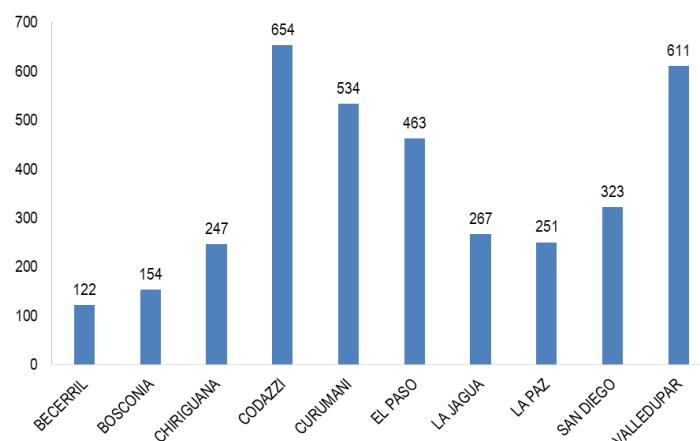


Figura 64. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados entre el 2004 y el 2017 en el sistema acuífero Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

A continuación, se describen los inventarios por anualidades realizados en el sistema acuífero Cesar:

INVENTARIO PARA EL AÑO 2004

Para el 2004 se tienen 750 registros que se concentran en los municipios de Becerril (89 puntos), Chiriguaná (141 puntos), Agustín Codazzi (234 puntos), Curumaní (6), El Paso (124), La Jagua de Ibirico (102), La Paz (45) y San Diego (9), siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 46 puntos inventariados. La mayoría de los puntos inventariados (533) son aljibes y los puntos restantes se distribuyen entre pozos, aljibe-pozos y manantiales (Figuras 65 y 66). Adicionalmente, de los puntos inventariados 106 fueron realizados en época de verano o tiempo seco y 644 en tiempo de lluvia.

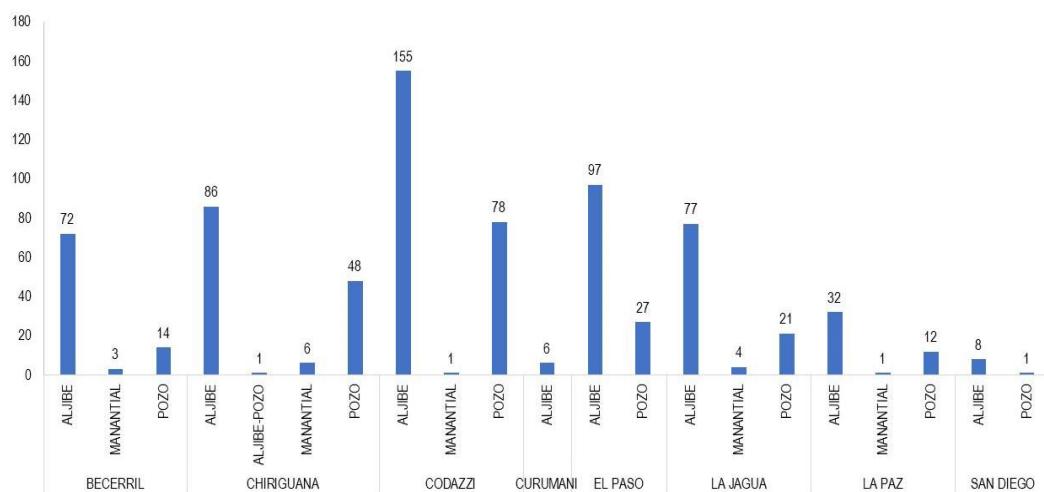


Figura 65. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2004 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

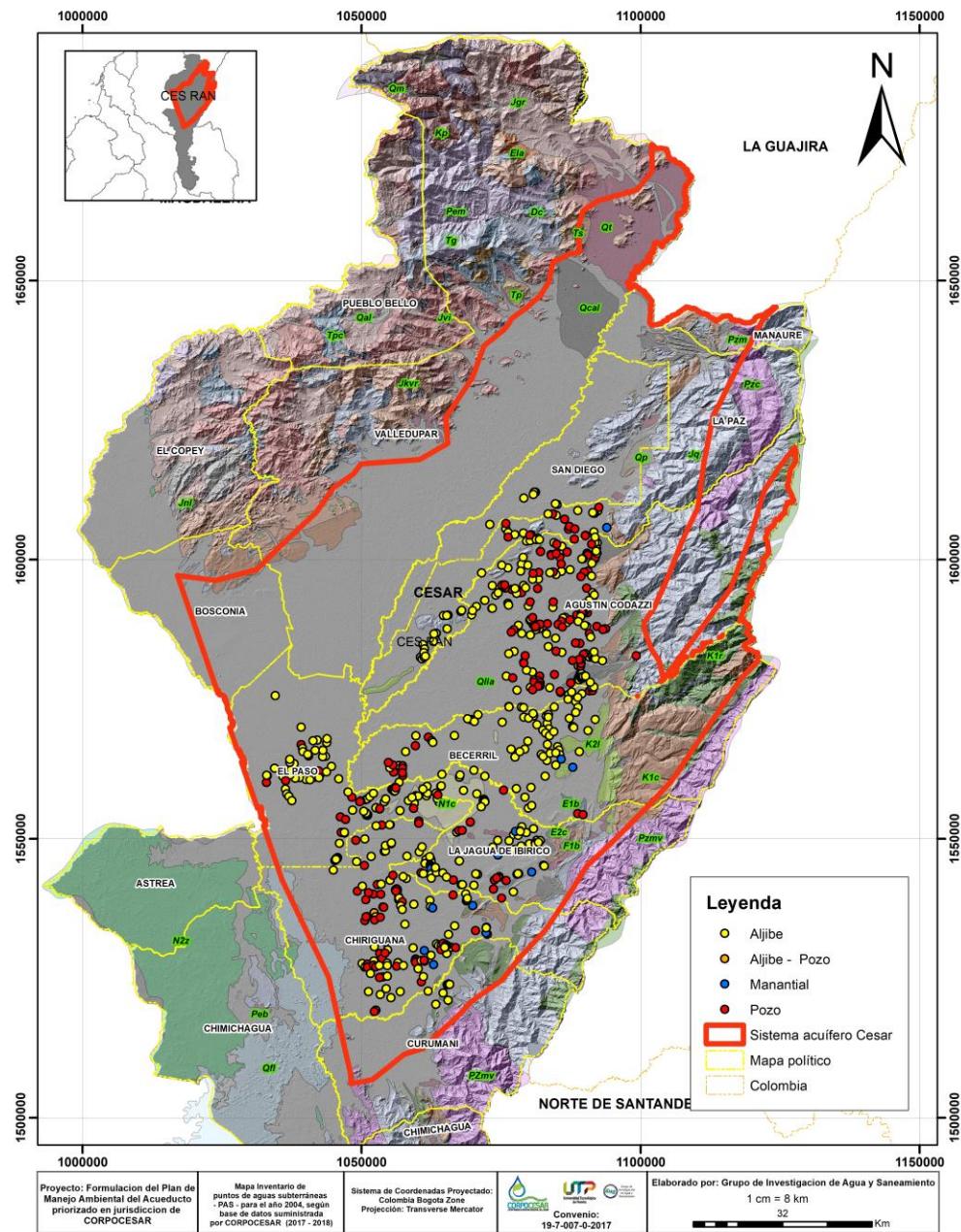


Figura 66. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2004 en el sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2006

Para el 2006 se tienen 512 registros en los municipios de Bosconia (128), Becerril (1), La Paz (86), San Diego (160) y Valledupar (137), siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 37 puntos inventariados. La mayoría de los puntos inventariados (436) son aljibes (Figuras 67 y 68). Del total de puntos inventariados 437 fueron realizados en época de verano o tiempo seco y 75 en tiempo de lluvia.

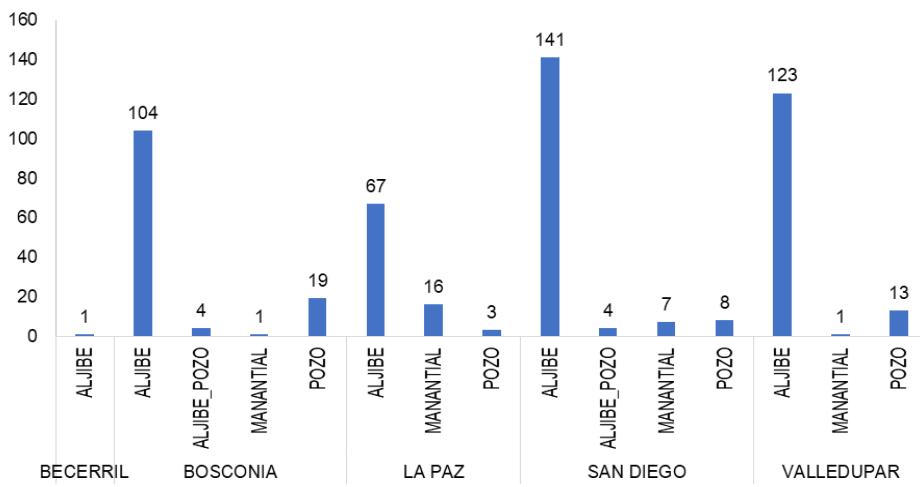


Figura 67. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2006 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

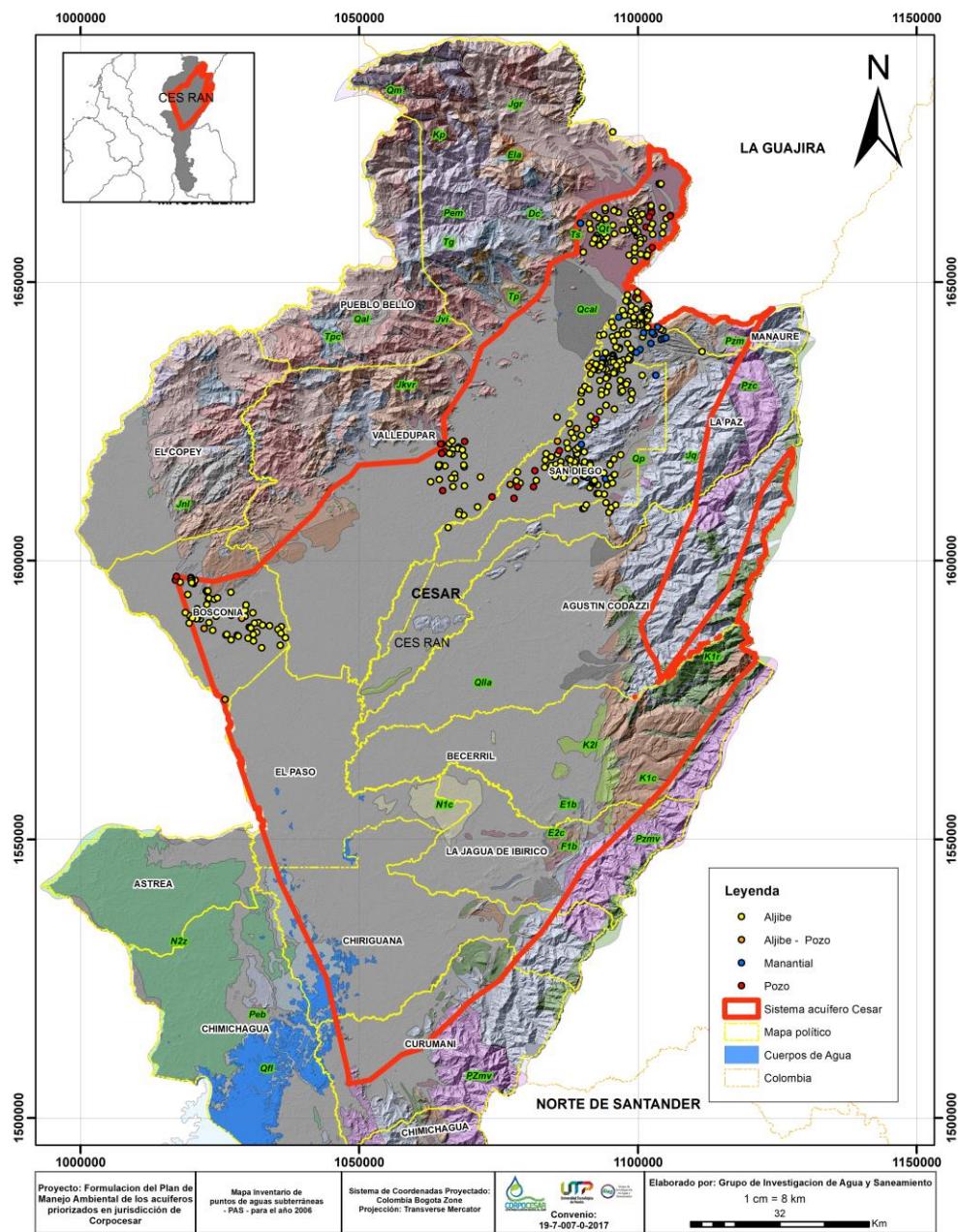


Figura 68. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2006 en el sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2007

Para el 2007 se tienen 464 registros de los cuales la mayoría son aljibes (351) y se encuentran distribuidos en los municipios de Bosconia (4 puntos), Chiriguaná (2 puntos), Curumaní (318) y Valledupar (140), siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 47 puntos inventariados. (Figuras 69 y 70). Del total de puntos inventariados 170 fueron realizados en época de verano o tiempo seco y 294 en tiempo de lluvia.

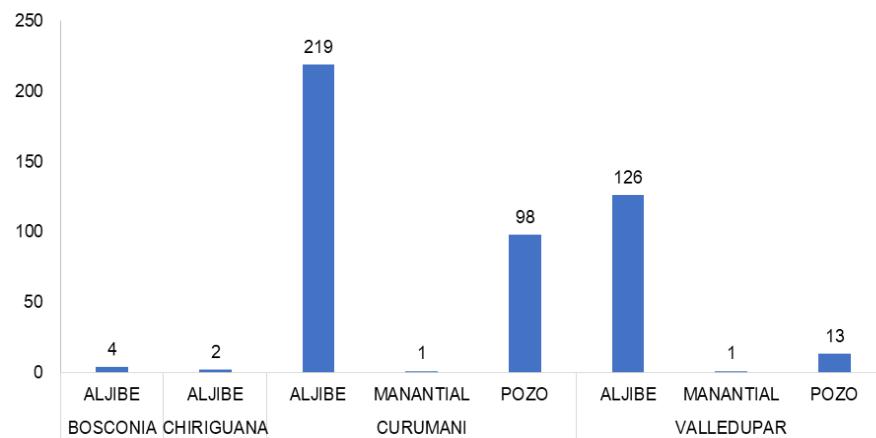


Figura 69. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2007 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

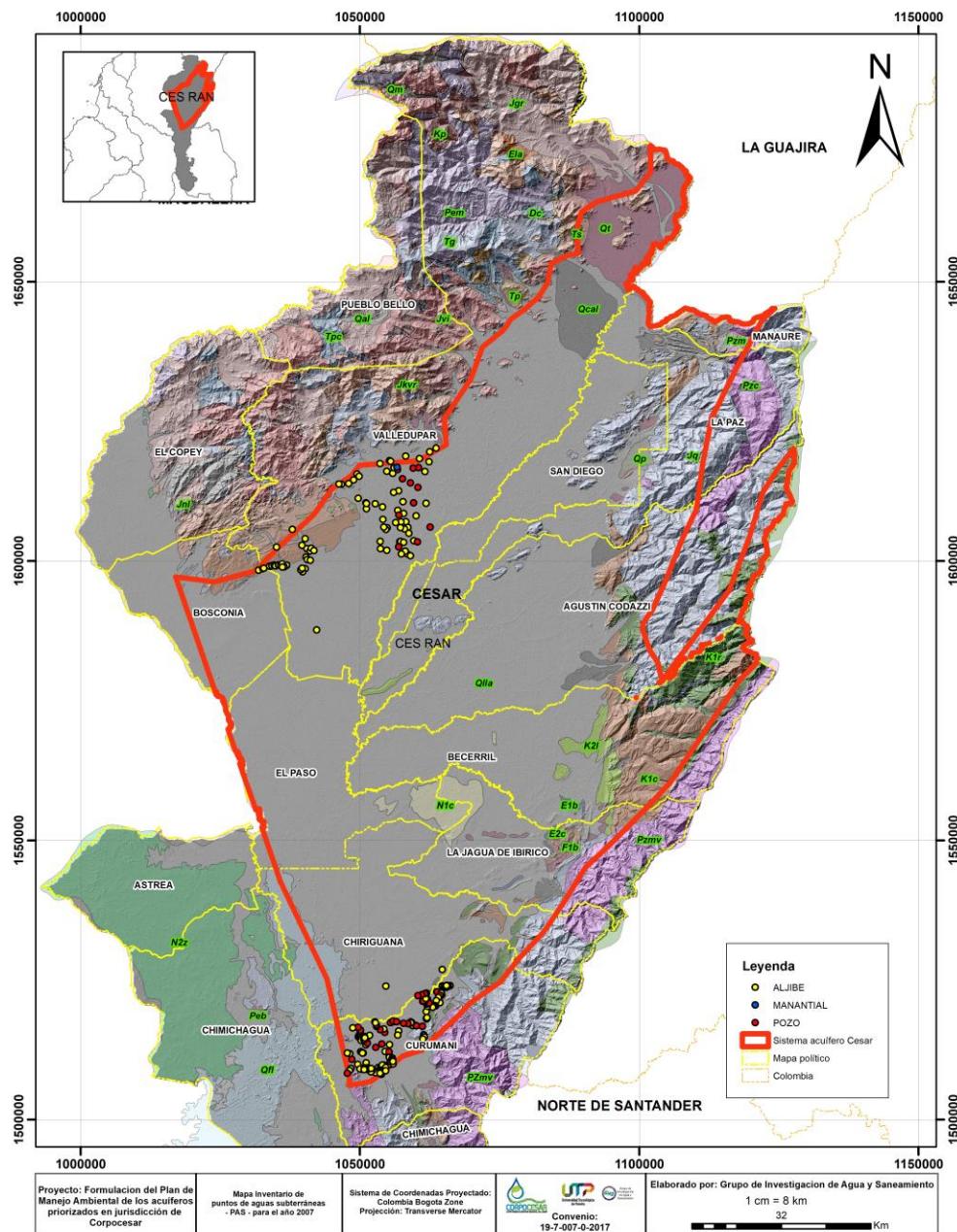


Figura 70. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2007 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2008

Para el año 2008 se tienen 81 registros que se concentran en los municipios de San Diego (43 puntos), La Paz (28), Agustín Codazzi (9) y Valledupar (1 punto), siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 20 puntos inventariados.. De los 81 registros 4 no cuentan con valores de medición

de niveles estáticos. Todos los puntos inventariados para este año fueron realizados en época de lluvia. En esta campaña se inventariaron 49 aljibes, encontrándose la mayor concentración en San Diego con 26 aljibes, 15 pozos localizados en San Diego y 11 en La Paz, 2 manantiales en La Paz y 1 en San Diego y finalmente 1 pozo -aljibe en La Paz y San Diego (Figuras 71 y 72).

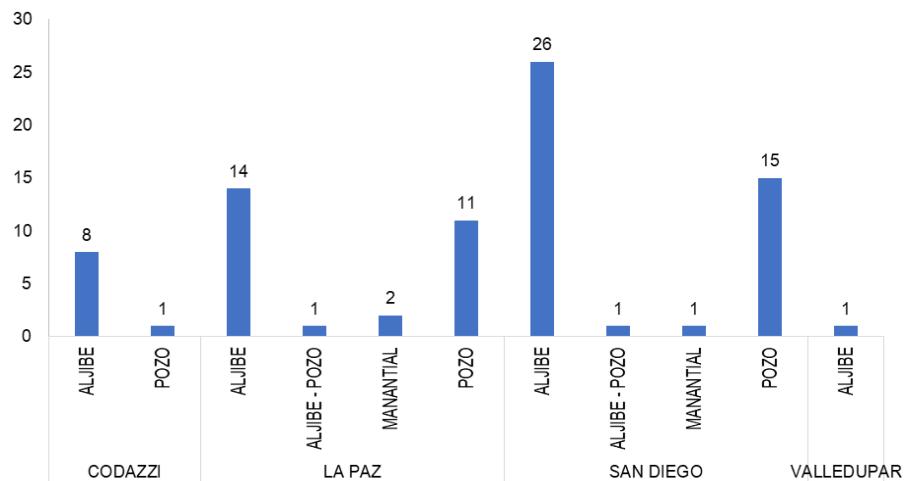


Figura 71. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2008 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

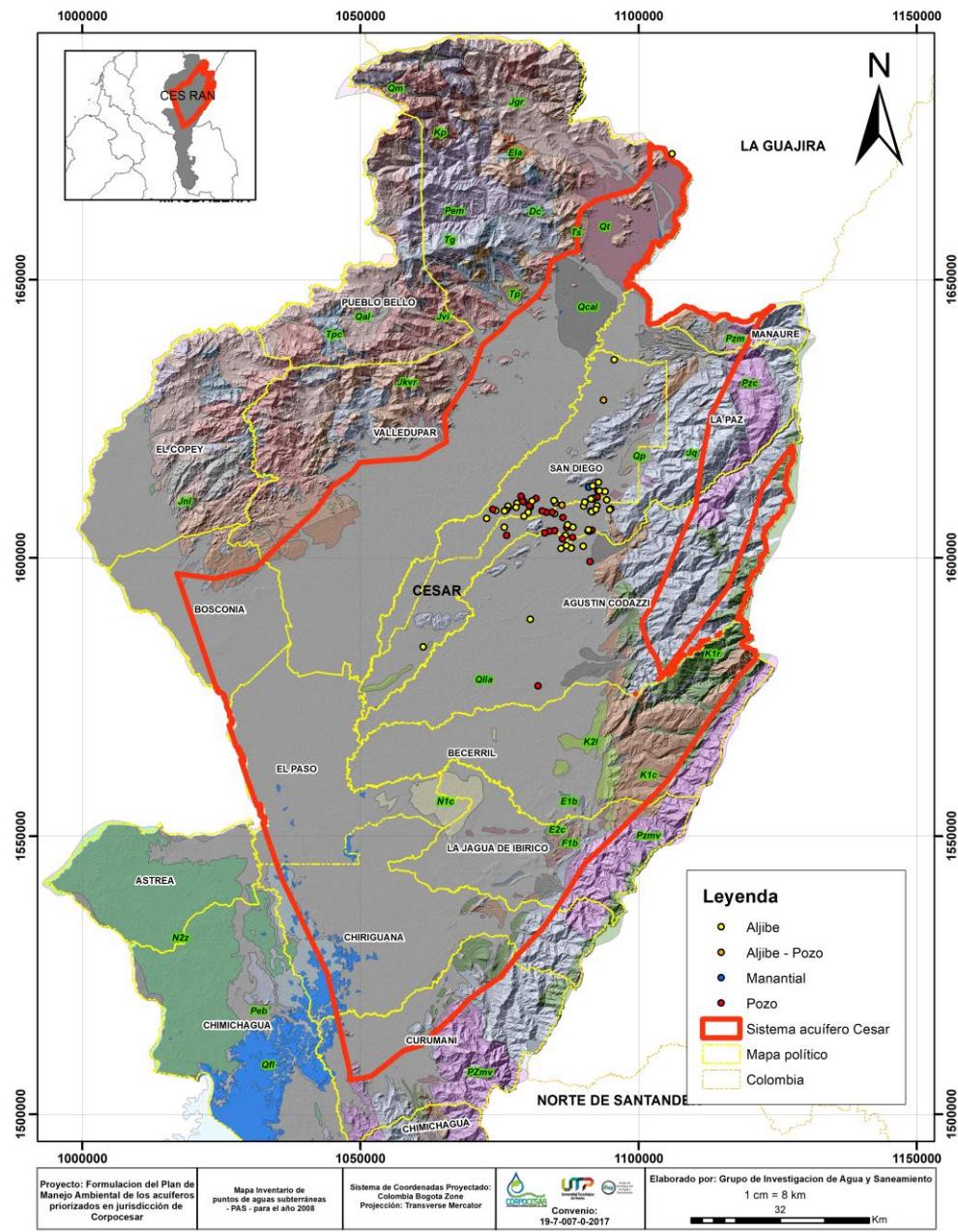


Figura 72. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2008 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2009

Para el 2009 se inventariaron 110 puntos que se concentran en los municipios de El Paso (46 puntos), San Diego (40 puntos), Bosconia (22 puntos), Agustín Codazzi y La Paz (1 punto), siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 31 puntos inventariados.. Todos los puntos inventariados para este año fueron realizados en época de lluvia. En esta campaña se inventariaron 94 aljibes,

encontrándose la mayor concentración en El Paso con 40 aljibes y 33 en San Diego, 5 pozos localizados en San Diego y 4 en El Paso, y finalmente 1 manancial en Agustín Codazzi y en San Diego (Figuras 73 y 74).

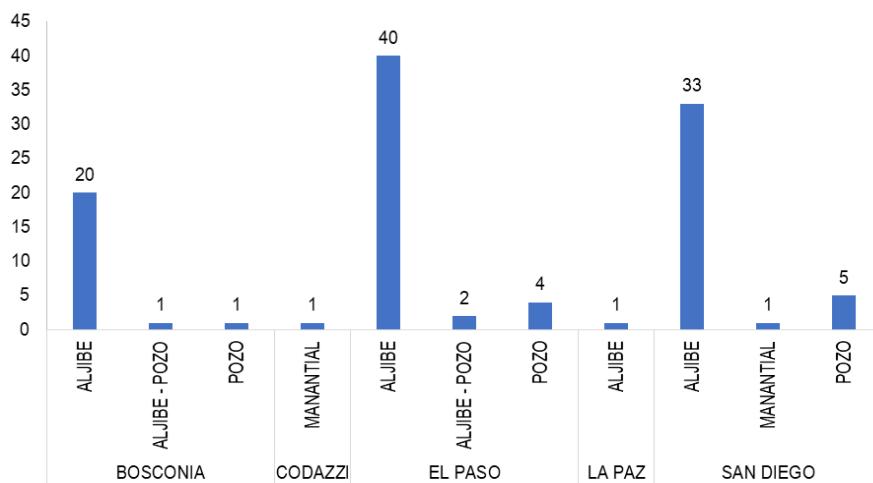


Figura 73. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2009 en el acuífero priorizado Cesar. **Fuente:** CORPOCESAR (2017-2018).

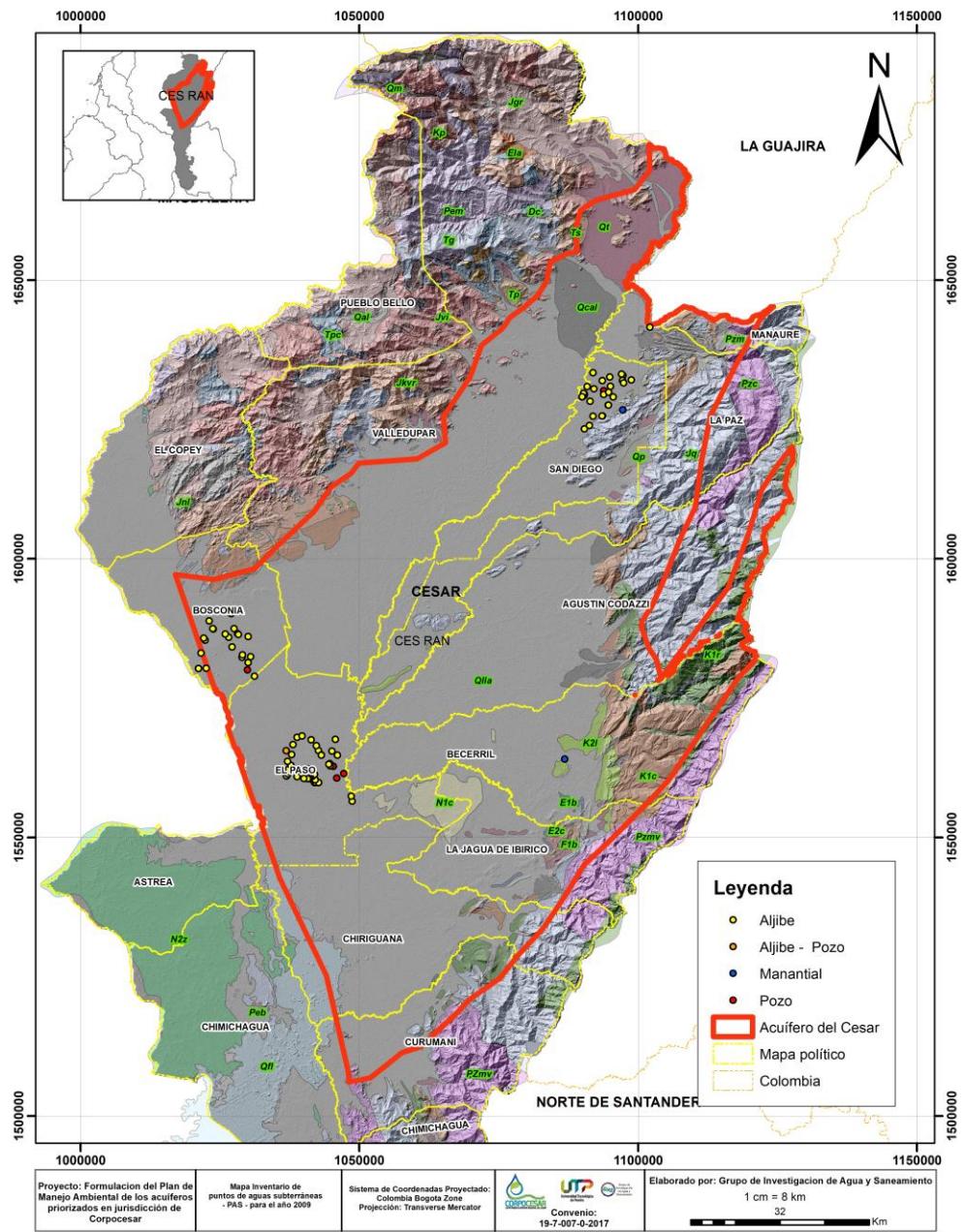


Figura 74. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2009 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2011

Para el 2009 se observó que existen 141 puntos inventariados que se localizan en los municipios de El Paso (38 puntos), La Jagua de Ibirico (9 puntos) y Valledupar (14 puntos), siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 32 puntos inventariados. De los 141 puntos

inventariados solamente 39 cuentan con valores de medición de niveles estáticos. Todos los puntos inventariados para este año fueron realizados en época de lluvia. En esta campaña se inventariaron 112 aljibes, encontrándose la mayor concentración en La Jagua de Ibirico con 74 aljibes y 27 en El Paso, 13 pozos en La Jagua de Ibirico y 11 en el Paso (Figuras 75 y 76).

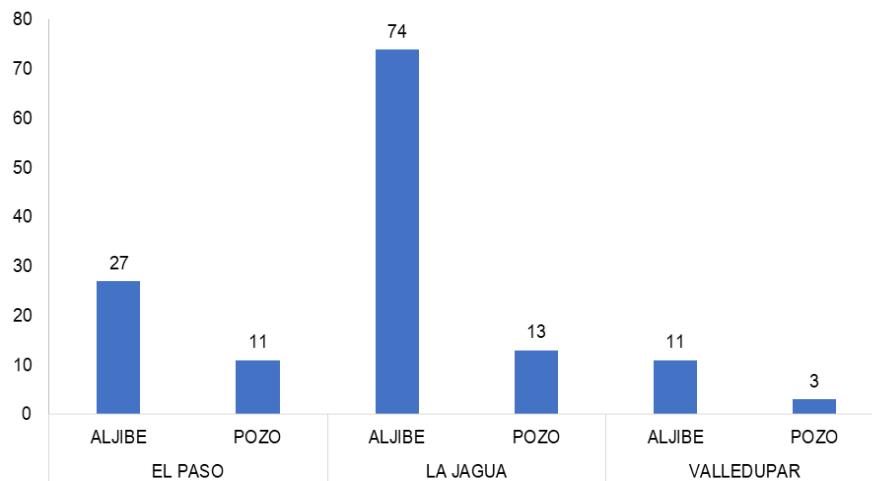


Figura 75. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2011 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

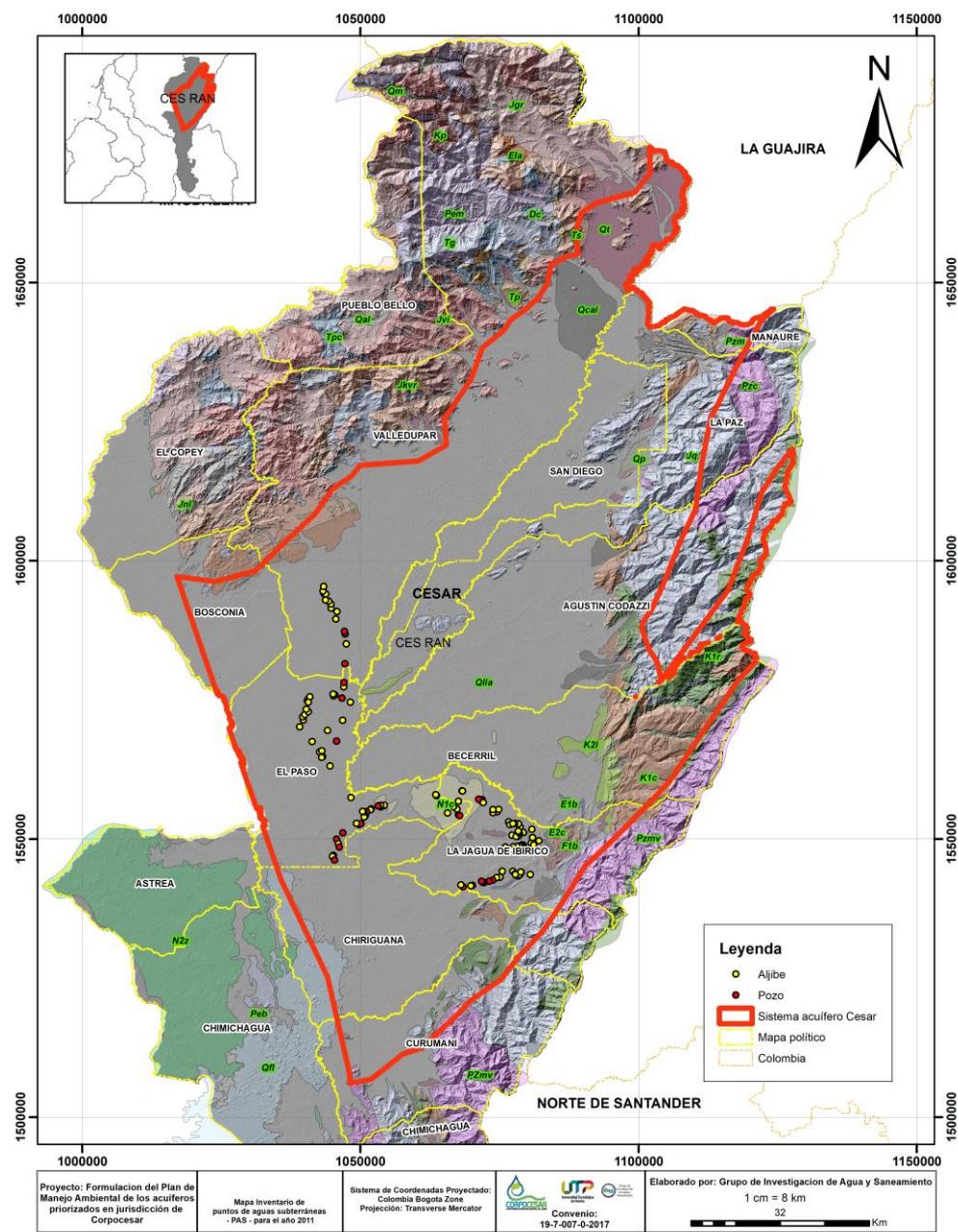


Figura 76. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2011 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2012

Para el 2012 se observó que existen 204 puntos inventariados, de los cuales solamente 77 cuentan con valores de medición de niveles estáticos y se encuentran en el municipio de El Paso (77 puntos). Todos los puntos inventariados para este año fueron realizados en época de lluvia. En esta campaña se identificaron 55 aljibes, 21 pozos y 1 piezómetro en El Paso (Figuras 77 y 78).

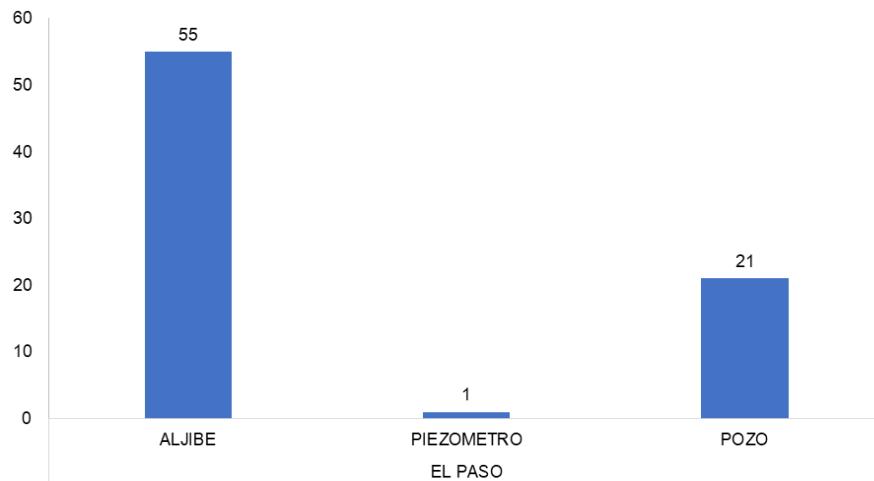


Figura 77. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2012 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

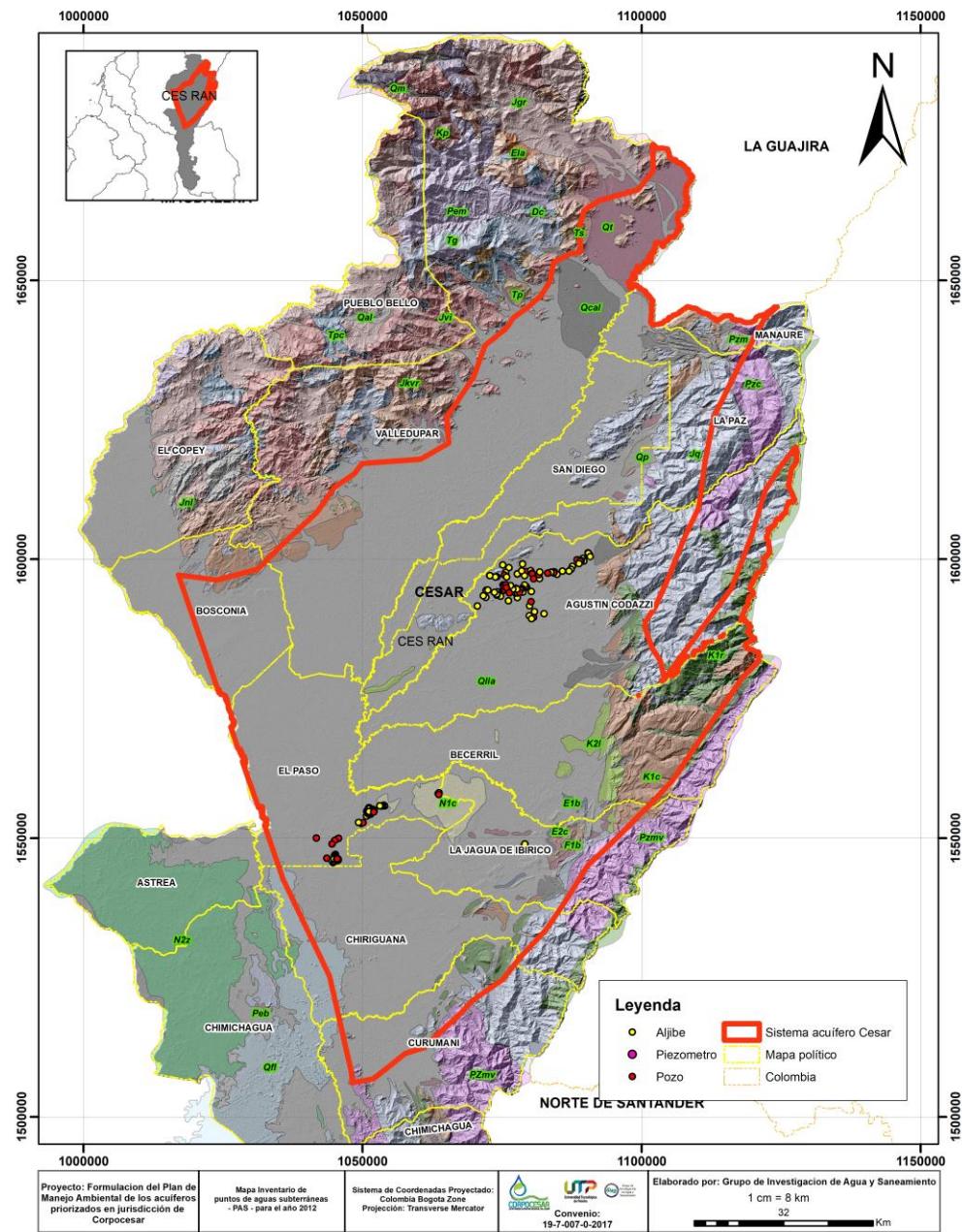


Figura 78. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2012 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2013

Para el 2013 se observó que existen 586 puntos inventariados, de los cuales solamente 86 cuentan con valores de medición de niveles estáticos. Los puntos inventariados se concentran principalmente en el municipio de Chiriguaná (85 puntos) y La Paz (1 punto), siendo estadísticamente más representativos el

tamaño de muestra por encima de 22 puntos inventariados.Todos los puntos inventariados para este año fueron realizados en época de lluvia. En esta campaña se identificaron 41 aljibes, 43 pozos y 2 manantiales en Chiriguaná (Figuras 79 y 80).

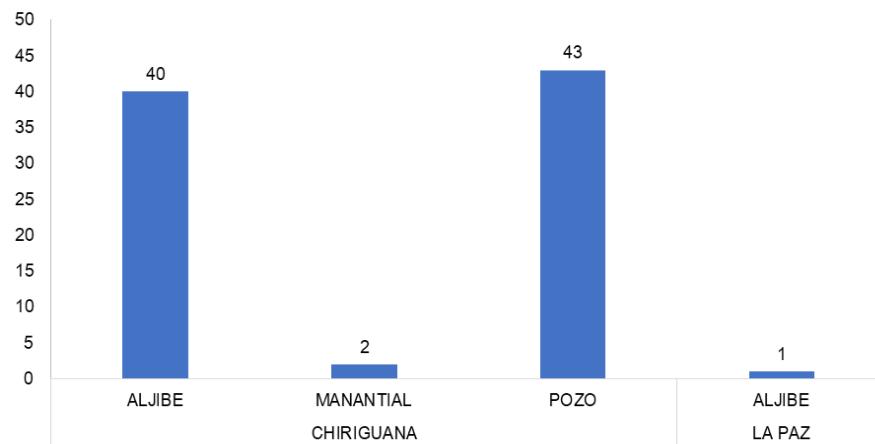


Figura 79. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2013 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

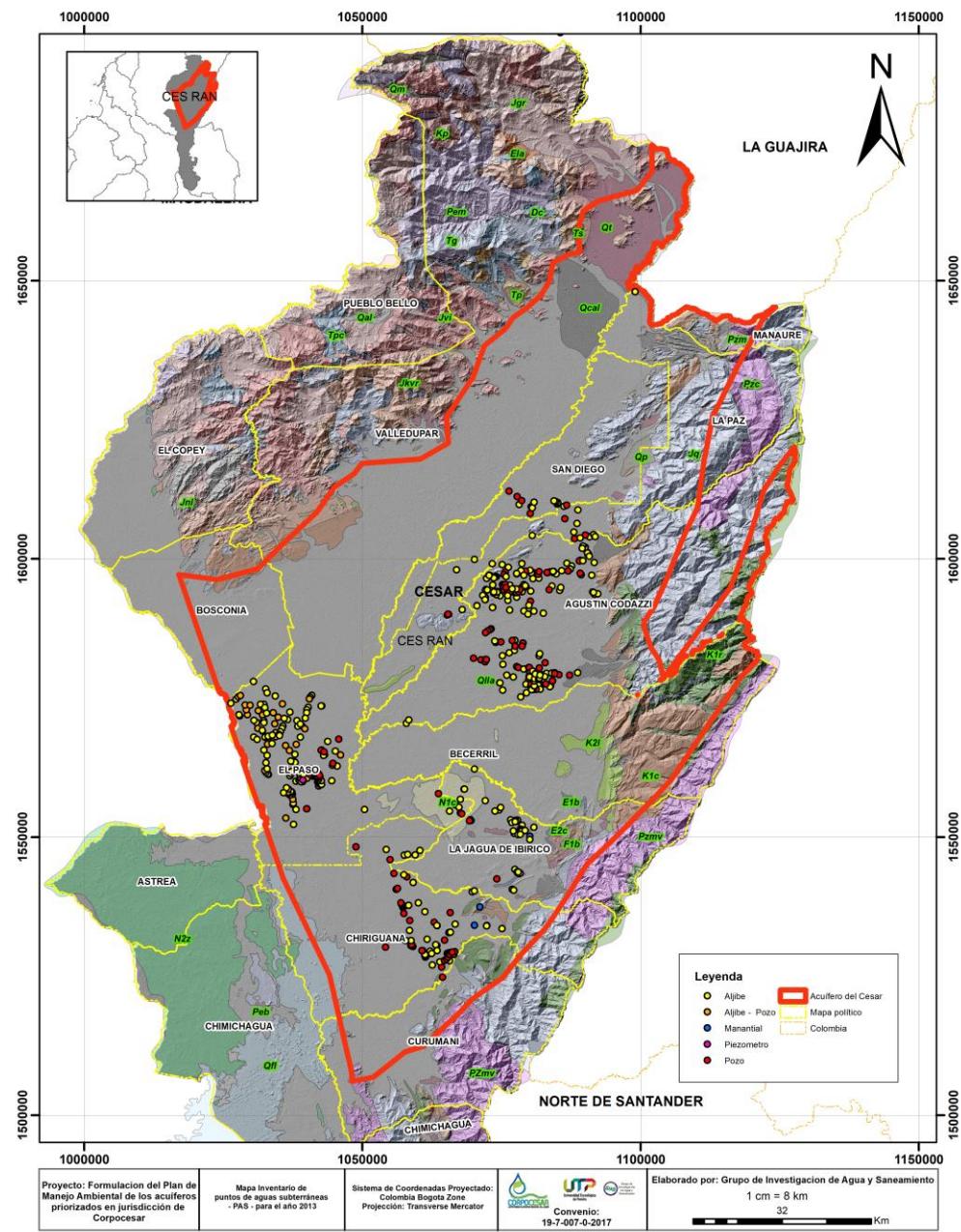


Figura 80. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2013 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2014

Para el 2014 se observó que existen 212 puntos inventariados que se concentran principalmente en el municipio de Curumaní (209 puntos) y La Paz (1 punto), valores que son aceptados estadísticamente de acuerdo al valor de referencia que es de 44 puntos. Todos los puntos inventariados para este año fueron realizados en época de lluvia. En esta campaña se identificaron 76 aljibes de los cuales 75 se encuentran en el municipio de Curumaní, 132 pozos y 2 manantiales en el mismo municipio, 1 aljibe se encuentra inventariado en el municipio de La Paz (Figuras 81 y 82).

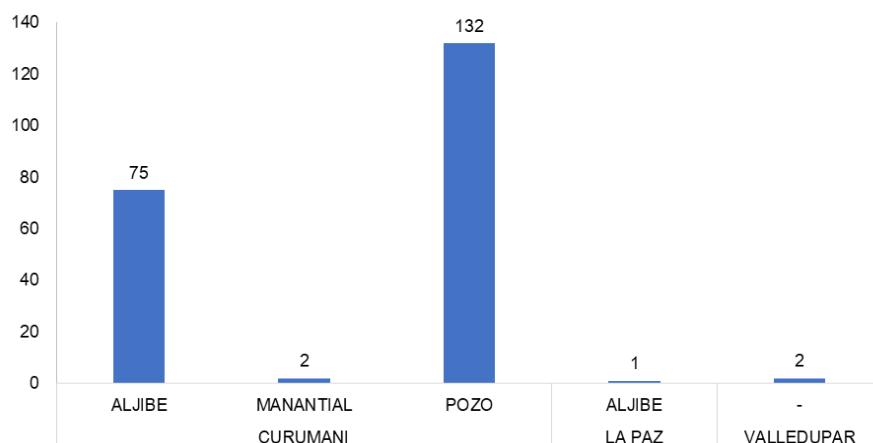


Figura 81. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2014 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

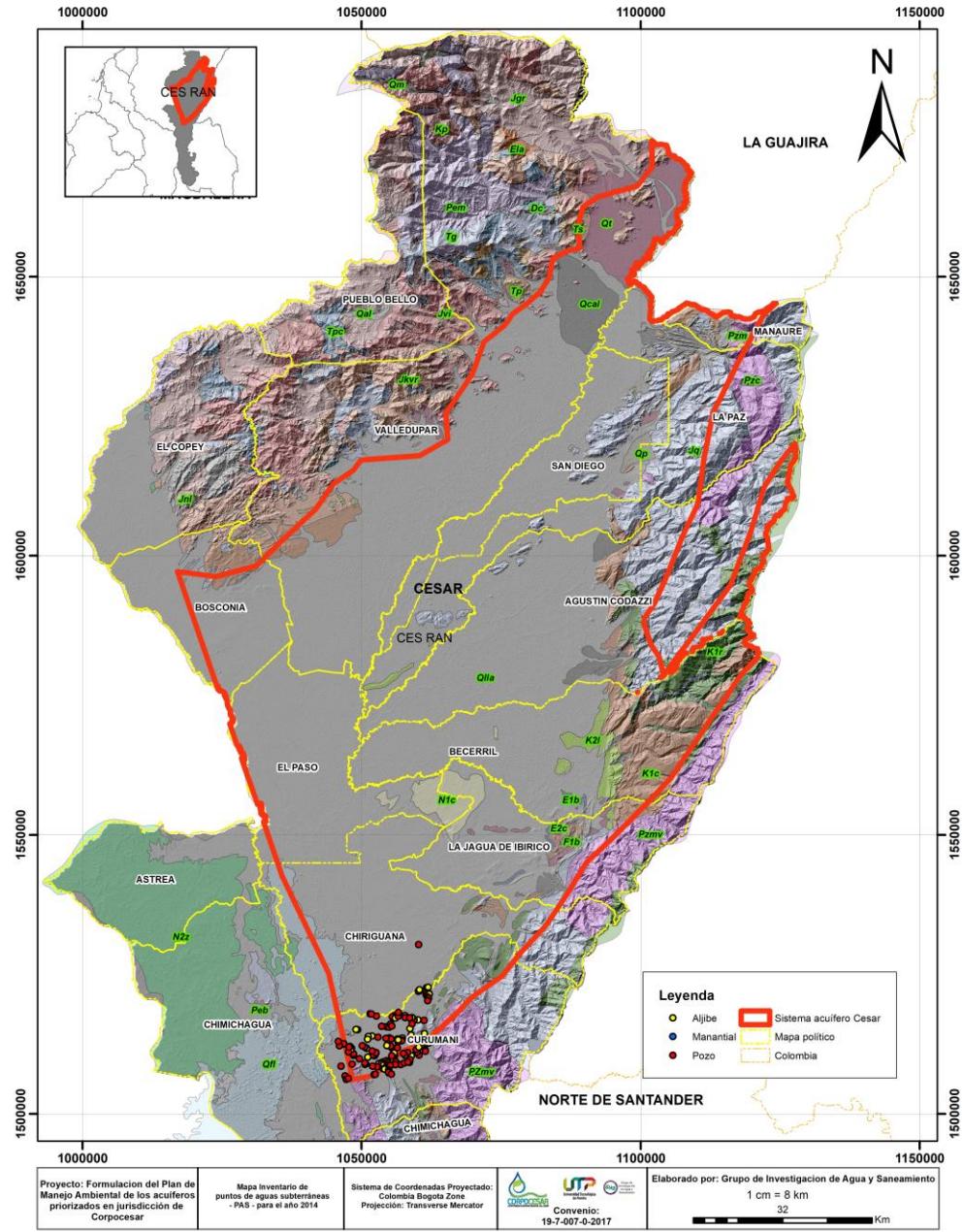


Figura 82. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2014 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2015

Para el 2015 se observó que existen 533 puntos inventariados, de los cuales 456 cuentan con valores de medición de niveles estáticos, existen 64 puntos sin identificar el tipo de punto. Los puntos inventariados se concentran principalmente en el municipio de Valledupar (252 puntos), La Paz (75 puntos), San Diego (65) y distribuidos en los municipios de Becerril, Chiriguaná, La Jagua de Ibirico y Agustín Codazzi (64 puntos) siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 44 puntos inventariados.. Del total de puntos inventariados 456 fueron realizados en temporada de lluvia.

En esta campaña se identificaron 354 aljibes de los cuales 206 se encuentran en el municipio de Valledupar y en menor proporción en San Diego y La Paz (60 y 55), 90 pozos de los cuales 42 se encuentran en Valledupar, 7 aljibes-pozo y 4 manantiales localizados en el municipio de La Paz (Figuras 83 y 84).

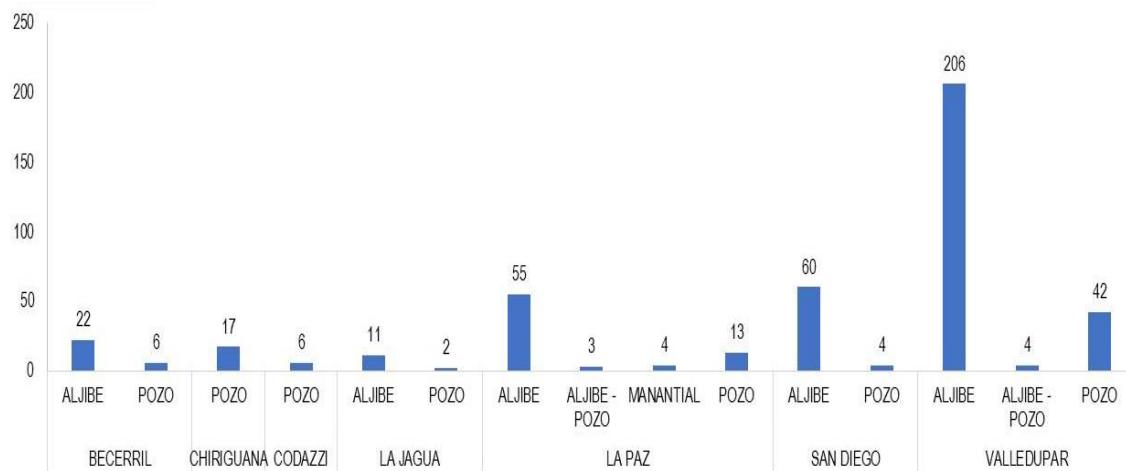


Figura 83. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2015 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

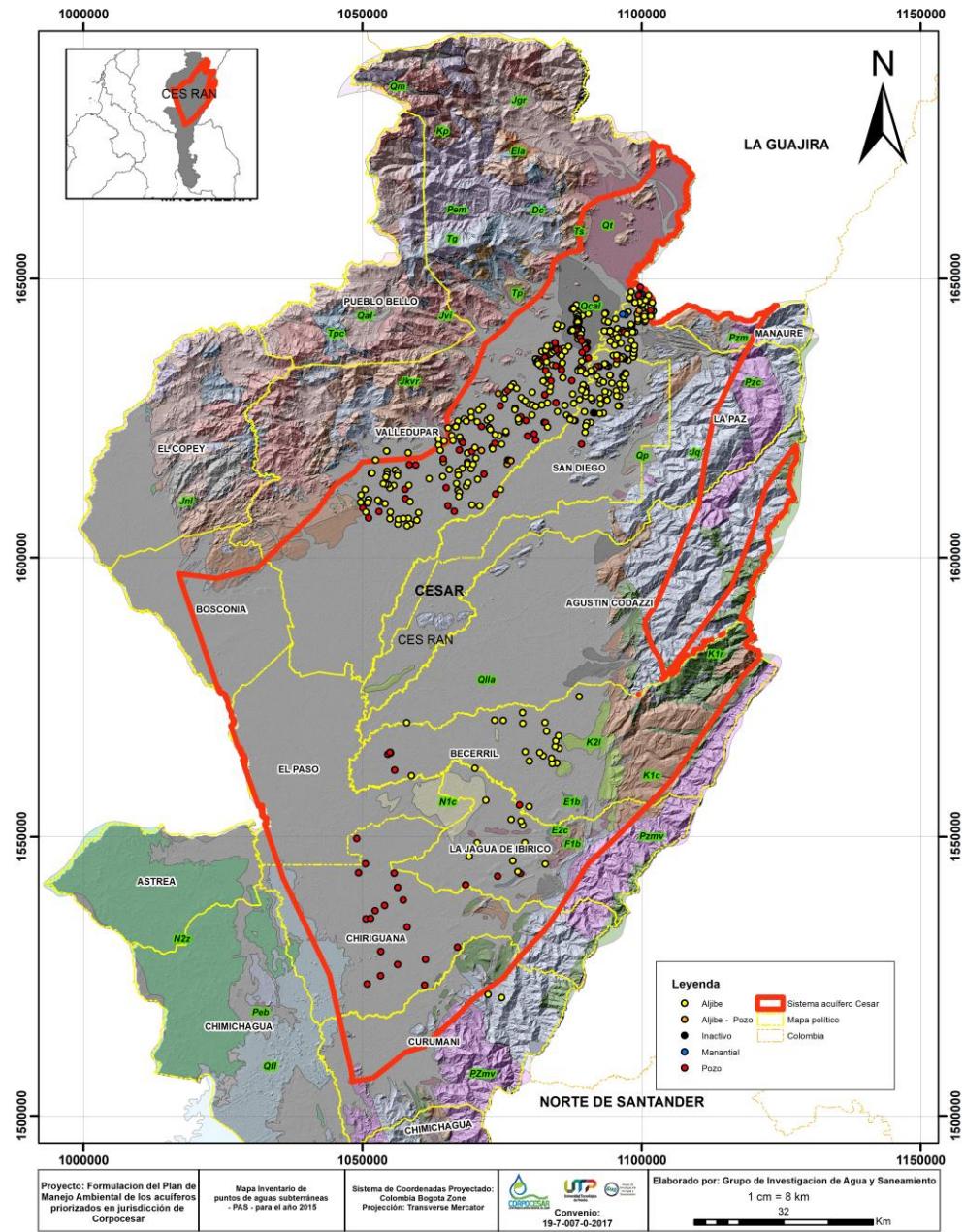


Figura 84. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2015 en la geología del sistema acuífero Cesar.

INVENTARIO PARA EL AÑO 2017

Para el 2017 existen 33 puntos inventariados, de los cuales los 31 cuentan con valores de medición de niveles estáticos; adicionalmente, en los municipios de La Paz, San Diego, Bucaramanga, Chiriquáná, El Paso, La Jagua de Ibirico, Valledupar y Agustín Codazzi se encuentran 31 puntos sin identificar sobre el tipo de punto. Los puntos inventariados se concentran principalmente en el municipio de La Paz (13 puntos) y distribuidos en los municipios de San Diego, Bucaramanga, Chiriquáná, El Paso, La Jagua de Ibirico, Valledupar y Agustín Codazzi (18 puntos), siendo estadísticamente más representativos el tamaño de muestra por encima de 23 puntos inventariados, tamaño de muestra que no fueron obtenidos para ningún municipio. Para esta fecha se tienen 33 registros, de los cuales los 31 fueron realizados en tiempo de lluvia y el restante no posee registro (Figuras 85 y 86).

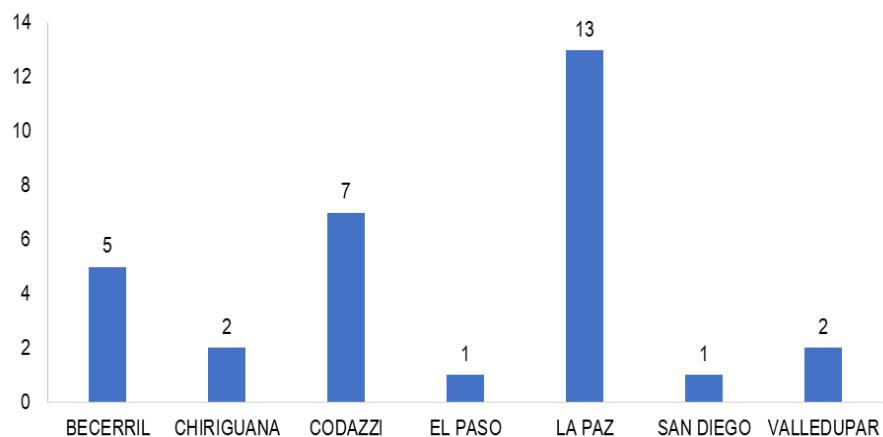


Figura 85. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados para el 2017 en el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

El análisis de los inventarios por anualidades permite concluir que de acuerdo al tamaño de las muestras obtenido, los municipios en los que el tamaño de la muestra es más representativo son: El Paso (2004, 2009, 2011 y 2012) y Valledupar (2006, 2008, 2009 y 2015), siendo evidente la existencia de ventanas de tiempo amplias que no permiten realizar seguimiento a las variaciones de los niveles piezométricos.

Los municipios en los que se han realizado mediciones en al menos dos años son: Chiriquáná (2004, 2013), La Jagua de Ibirico (2004 y 2011), San Diego (2006, 2015) y Curumaní (2007 y 2014). Estos municipios además cuentan con inventarios cuyo tamaño de la muestra es representativo estadísticamente. Finalmente, los municipios de Agustín Codazzi (2004), Bucaramanga (2004), Bosconia (2006) y La Paz (2015) tienen tamaño de muestra representativa para estos años y pueden ser usados para el análisis estadístico.

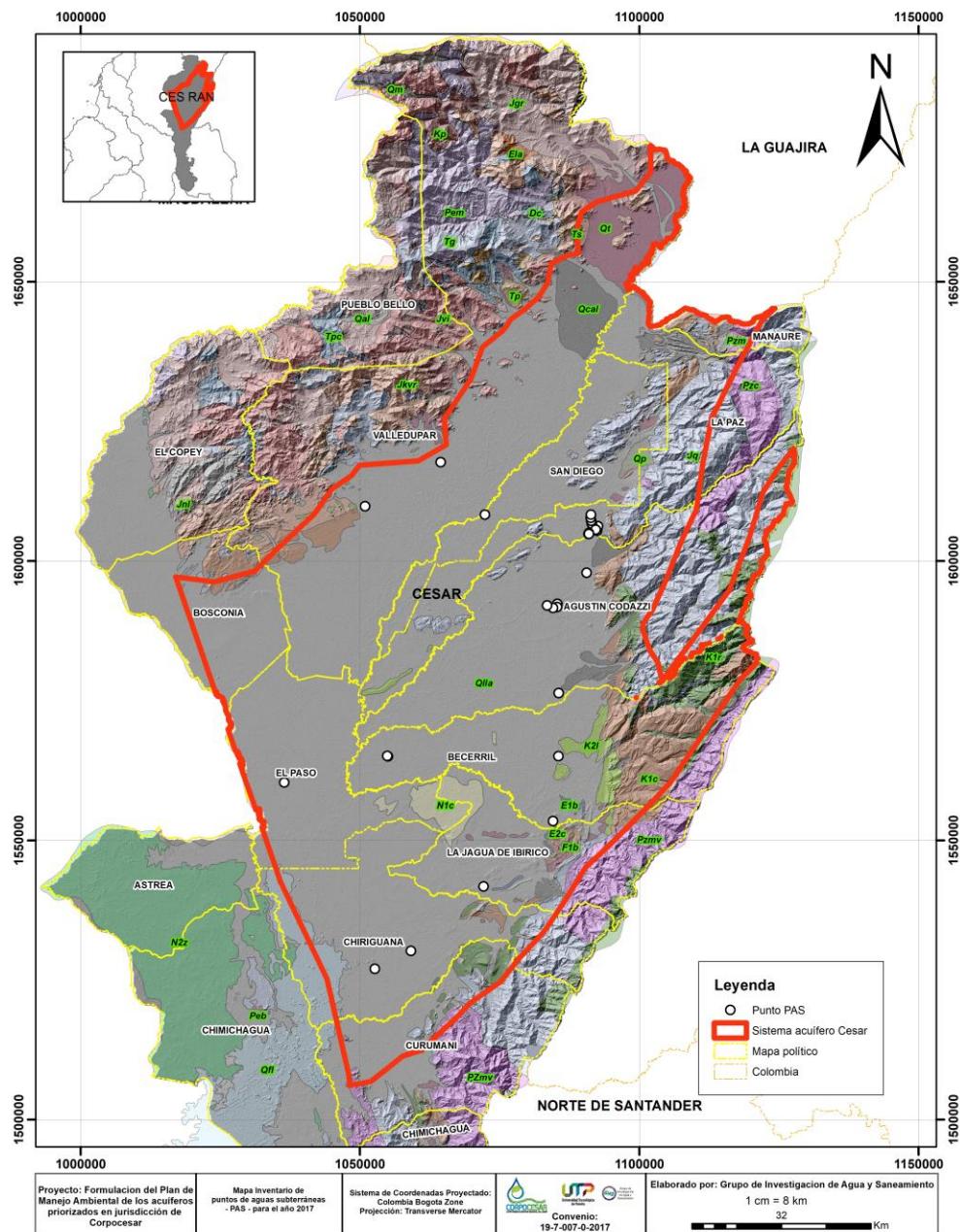


Figura 86. Mapa de distribución de los puntos de agua subterránea inventariados en el 2017 en la geología del sistema acuífero Cesar.

En el mismo análisis de la base de datos suministrada por CORPOCESAR (2017-2018) se determinó que existen 797 puntos inventariados que no reportan valores para el nivel estático, los cuales se encuentran concentrados en los municipios de Agustín Codazzi (396 puntos), El Paso (174 puntos), La Jagua de Ibiríco (151 puntos), Valledupar (74 puntos) y La Paz (2 puntos) (Figura 87).

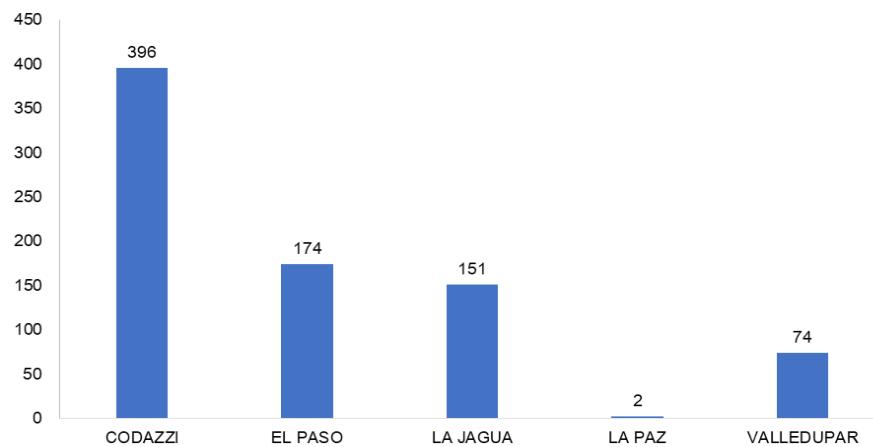


Figura 87. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados sin valores en nivel estático para el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

Adicionalmente, se determinó la existencia de 450 puntos que reportaron valores de cero “0” en los niveles estáticos de manera indiscriminada para aljibes, aljibes-pozos, manantiales, pozos y piezómetros. Estos puntos están localizados en los municipios de Becerril (10 puntos), Bosconia (23 puntos), Chiriguaná (73 puntos), Agustín Codazzi (62 puntos), Curumaní (85 puntos), El Paso (41 puntos), La Jagua de Ibirico (27 puntos), La Paz (42 puntos), San Diego (54 puntos) y Valledupar (33 puntos), valores que se encuentran asociados a los años 2004 (Becerril, Chiriguaná, Agustín Codazzi, El Paso, La Jagua y La Paz), 2006 (Bosconia, La Paz, San Diego y Valledupar), 2007 (Curumaní y Valledupar), 2009 (El Paso), 2012 (El Paso), 2014 (Curumaní) y 2015 (San Diego y Valledupar) (Figura 88).

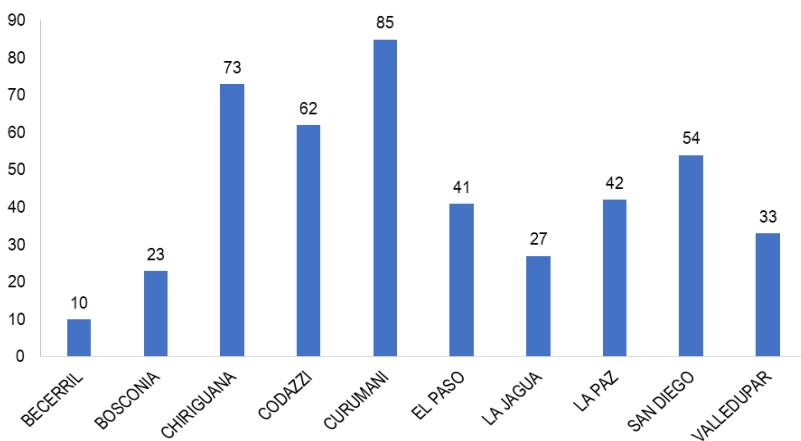


Figura 88. Distribución de los puntos de agua subterránea inventariados con valores de cero en nivel estático para el acuífero priorizado Cesar. Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

En ese orden de ideas, eliminando los puntos que no reportan valores de niveles estáticos y los que reportan el valor de cero, tenemos 2380 puntos para la construcción de los mapas piezométricos.

Por municipio se tienen los siguientes puntos con medidas en diferentes períodos de tiempo:

BECERRIL: Cuenta con dos pozos inventariados, uno entre el 23/07/2004 y el 14/09/2015 y el segundo entre el 1/09/2015 y el 20/09/2015; para el primer caso la ventana de tiempo es demasiado amplia para conocer el comportamiento en el nivel del agua, y en el segundo la ventana es demasiado corta para igualmente conocer su comportamiento.

BOSCONIA: El inventario indica, para la misma coordenada, dos tipos de estructuras, 1) pozo y 2) aljibe, con fecha de medición del 08/02/2006 para ambos, sin presentar medidas posteriores para evaluar su comportamiento.

CHIRIGUANÁ: En la base de datos se identificó la existencia de un pozo con medidas tomadas en una ventana de tiempo que va entre el 11/07/2013 y 06/06/2015, sin encontrarse medidas en años anteriores o posteriores que permitan determinar la variación del nivel freático.

AGUSTÍN CODAZZI: Para este municipio se encontraron dos puntos, 1) aljibe con ventana de tiempo entre el 02/04/2004 y 31/05/2004, siendo una ventana de tiempo demasiado corta y sin valores anteriores o posteriores que permitan realizar comparaciones en el comportamiento del nivel freático; y 2) aljibe con fecha de medida del 27/10/2008 y pozo con fecha de medida de junio de 2015, ambos se consideran como datos puntuales y sin valores anteriores o posteriores que permitan comparar su variación en el tiempo.

CURUMANÍ: Para este caso, en la base de datos se encuentra una irregularidad debido a que existe un punto referido tanto al municipio de Chiriguaná como de Curumaní, asociado a pozo y a un aljibe y una ventana de

tiempo entre el 01/04/2007 a 06/06/2015. Se presenta además un aljibe con medición realizada el 15/04/2007 y pozo con fecha del 30/11/2014, datos que presentan ventanas de tiempo demasiado amplias y sin valores de referencia anteriores o posteriores para comparar.

EL PASO: Se evidencia en la base de datos dos tipos de estructuras, 1) aljibe con fecha de medición del 13/10/2012 y 2) pozo de fecha 14/10/2012, sin presentar valores anteriores y posteriores en tiempo para su comparación.

LA JAGUA DE IBIRICO: En el inventario se presenta un punto conformado por un aljibe y un pozo con una ventana de tiempo entre el 20/07/2004 y 14/10/2012, y 07/08/2015 a 01/09/2015, siendo para el primero una ventana demasiadamente amplia y sin evidencias de continuidad en la medición y para el último una ventana muy corta; además, se presenta aparentemente un error de transcripción debido a que los dos puntos son referidos tanto en La Jagua de Ibirico-El Paso como en La Jagua de Ibirico-Valledupar.

LA PAZ: Este municipio cuenta con 26 puntos inventariados que corresponden a 13 pares de datos, siendo los 5 primeros pares medidos en el 2004 tanto en temporada seca como en lluvia, encontrándose una medida en aljibe con una ventana de tiempo entre el 06/04/2004 y 12/11/2004, pero no presenta medidas posteriores para su comparación. El resto de valores presentan fechas entre el 30/04/2004 (aljibe), 04/04/2004 (aljibe y pozo), 12/11/2004 a 19/11/2004 (aljibe y pozo) y entre 27/10/2004 a 12/11/2004 (aljibe y pozo), valores que como se ha indicado con anterioridad presentan ventanas demasiado cortas y sin valores posteriores para su comparación. Para el 2006 se cuenta con un punto inventariado como aljibe con 2 mediciones realizadas el 17/02/2006, lo que puede ser un error de transcripción. Otros puntos inventariados con 5 pozos y 5 aljibes, presentan mediciones realizadas entre el 22/10/2008 hasta el 24/10/2008 y el 30/10/2008, sin presentar más medidas que permitan su análisis de variación en el tiempo. Finalmente se presenta un punto con dos tipos de estructuras, 1) pozo con fecha de medición del 17/04/2015 y 2) aljibe de fecha de medición del 03/05/2015, valores que de manera general son considerados puntuales y sin continuidad para realizar análisis comparativos de niveles.

SAN DIEGO: De este municipio se presenta un punto el cual fue tomado tanto en temporada seca como húmeda entre el 06/04/2004 y 19/11/2004, sin embargo, no se evidencian valores posteriores que permitan realizarle monitoreo. En este inventario se resalta la existencia de tres aljibes localizados en la misma coordenada e inventariados entre el 20/08/2009 y el 21/08/2009, sin presentar continuidad en el tiempo para si análisis y comparación. El resto de puntos, 8 para este caso, presentan ventanas de tiempo muy cortas y sin valores anteriores o posteriores para su análisis.

VALLEDUPAR: En la base de datos se presenta un punto con ubicación en La Jagua de Ibirico y en Valledupar, considerándose este valor un error de transcripción, el cual fue inventariado como aljibe entre el 07/08/2015 y 01/09/2015; se presenta además un pozo con fecha entre el 31/07/2015 y 01/11/2015. Los últimos valores, 2 puntos, presentan ventanas de tiempo inferiores a 5 meses, sin presencia de datos que permitan realizar comparaciones en los niveles.

De acuerdo al análisis anterior, se considera que existen ventanas de tiempo demasiado amplias o cortas que no permiten evaluar y comparar de manera adecuada los datos con el fin de determinar el comportamiento o

la fluctuación de los niveles piezométricos ya que no existen registros continuos en los mismos puntos inventariados.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA BASE DE DATOS

Para conocer el comportamiento de los datos existentes se hace un análisis utilizando el vecino promedio más cercano mediante el software ArcGIS. Dado que el acuífero cubre una gran extensión y por lo tanto, existe una alta dispersión de los datos, es necesario realizar interpolaciones o extrapolaciones adecuadas de los datos para su análisis e interpretación. En ese sentido el vecino promedio más cercano indica que si la distancia promedio es menor que el promedio de una distribución hipotética aleatoria, se considera que la distribución de las entidades que se analiza es agrupada. Si la distancia promedio es mayor que la distribución hipotética aleatoria, se considera que las entidades están dispersas; entonces si el índice (relación de vecino más cercano promedio) es menor que 1, el patrón exhibe un clustering. Si el índice es mayor que 1, la tendencia es la dispersión.

El análisis estadístico de los datos de los niveles estáticos arrojó que para el 2004 la media (5.203 m) y la mediana (4.5 m) son diferentes, debido a que los datos no siguen una tendencia normal. La moda según el análisis indica un valor de 3.4 m, con valores máximos 21.7 m y mínimos de 0.5 m, en un análisis de 527 datos, con una desviación estándar de 3.22 y un error de 0.140.

Los valores hallados en el 2006 de media 6.490 m y mediana 4.84 m son ampliamente diferentes lo que sugiere que los datos arrojados en el inventario no siguen una tendencia normal. La moda según el análisis indica un valor de 1.65 m, con valores máximos 27.91 m y mínimos de 0.36 m, en un análisis de 395 datos, con una desviación estándar de 5.22 y un error de 0.262.

En el 2007 los datos analizados arrojaron valores de media 4.581 m y mediana 4.1 m son ligeramente diferentes debido a que los datos no siguen una tendencia normal. La moda según el análisis indica un valor de 2.6 m, con valores máximos 14.29 m y mínimos de 0.9 m, en un análisis de 363 datos, con una desviación estándar de 2.12 y un error de 0.111.

Para el 2008 la media 7.308 m y la mediana 6.2 m son muy diferentes, debido a que los datos no siguen una tendencia normal, son muy variables en las zonas muestreadas. La moda según el análisis indica un valor de 2 m, con valores máximos 21.14 m y mínimos de 0.94 m, en un análisis de 77 datos, con una desviación estándar de 5.00 y un error de 0.569, valores altos para un volumen de datos tan próximos (La Paz, San Diego y Agustín Codazzi).

Los valores hallados en el 2009 de media 6.839 m y mediana 5.75 m son ampliamente diferentes lo que sugiere que los datos arrojados en el inventario no siguen una tendencia normal. La moda según la evaluación de los datos indica un valor de 7.72 m, con valores máximos 19.88 m y mínimos de 0.89 m, en un análisis de 108 datos, con una desviación estándar de 3.71 y un error de 0.357.

En el 2011 los datos analizados arrojaron valores de media 7.020 m y mediana 6,97 m son similares debido a que los datos siguen aparentemente una tendencia normal, característica particular dado que estos datos se

encuentran ubicados principalmente en la zona minera, en el Municipio de El Paso. La moda según el análisis indica un valor de 5.06 m, con valores máximos 12.38 m y mínimos de 3.54 m, en un análisis de 39 datos, con una desviación estándar de 2.13 y un error de 0.341.

Los valores hallados en el 2012 de media 4.799 m y mediana 4.77 m son similares lo que sugiere que los datos arrojados en el inventario siguen una tendencia normal, valores localizados en el inventario realizado en el municipio de El Paso, zona Minera. La moda según el análisis indica un valor de 7.8 m, con valores máximos 11.39 m y mínimos de 0.77 m, en un análisis de 77 datos, con una desviación estándar de 2.42 y un error 0.276.

Para el 2013 la media 4.896 m y la mediana 3.24 m son muy diferentes, debido a que los datos no siguen una tendencia normal, a pesar de encontrarse ubicados en la misma área de influencia (municipio de Chiriguaná), indicando amplia variabilidad de los datos. La moda según el análisis indica un valor de 2.84 m, con valores máximos 15.64 m y mínimos de 0.04 m, en un análisis de 86 datos, con una desviación estándar de 4.83 y un error de 0.521.

En el 2014 los datos analizados arrojaron valores de media 5.576 m y mediana 5.42 m son muy similares debido a que los datos siguen aparentemente una tendencia normal, característica particular dado que estos datos se encuentran ubicados dominanteamente en el Municipio de Curumaní, cerca de la ciénaga de Zapatoza. La moda según el análisis indica un valor de 5.49 m, con valores máximos 13.22 m y mínimos de 0.77 m, en un análisis de 212 datos, con una desviación estándar de 2.476 m y un error de 0.170 m.

Para el 2015 la media 6.026 m y la mediana 5.375 m son diferentes, debido a que los datos no siguen una tendencia normal indicando una amplia variabilidad de los datos y espaciamiento de los mismos. La moda según el análisis indica un valor de 2 m, con valores máximos 22.5 m y mínimos de 0.07 m, en un análisis de 456 datos, con una desviación estándar de 3.654 m y un error de 0.171 m.

Finalmente, para el 2017 los datos analizados arrojaron valores de media 4.410 m y mediana 3.68 m son moderadamente diferentes debido a que los datos no siguen aparentemente una tendencia normal, debido a posiblemente a la dispersión de las muestras. La moda según el análisis indica un valor de 3.68 m, con valores máximos 14.755 m y mínimos de 1.23 m, en un análisis de 31 datos, con una desviación estándar de 2.829 m y un error de 0.508 m.

Es de resaltar que los datos del inventario de puntos realizada por CORPOCESAR no son continuos, los cuales son valores numéricos que surgieron de un proceso de medición directa de campo, durante los años 2004, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 y 2017 (Tabla 13). Según los elementos indicados anteriormente, para los años, 2004, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 y 2017, se presenta una distribución por clustering, toda vez que los valores arrojados en el análisis son <1 y la tendencia de los datos anormal según la relación media/mediana, modas que van desde los 1.65 m hasta los 7.8 m; además, se observa mediante el análisis de la mediana, que para los años 2008, 2009 y 2011 se presentaron los niveles piezométricos más bajos (6.839 m a 7.03 m) y los niveles más altos entre el 2007 y el 2017 (4.581 m y 4.41 m).

Tabla 13: Volumen de datos por anualidad tomados en el acuífero priorizado Cesar entre el 2004 y el 2017.

AÑO	NUMERO DE PAS
2004	527
VACÍO DE INFORMACIÓN	
2006	395
2007	363
2008	77
2009	108
VACÍO DE INFORMACIÓN	
2011	39
2012	77
2013	86
2014	212
2015	456
VACÍO DE INFORMACIÓN	
2017	42

Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

El mapa de direcciones de flujo de agua subterránea se construyó mediante el análisis de la base de datos suministrada por CORPOCESAR (2017-2018), la cual contenía inventarios hechos por la Corporación desde el año 2004 al 2017 y que fue revisada, analizada y filtrada para llegar a un número de 2380 puntos de aguas subterráneas -PAS- valores cuyas cotas o alturas fueron tomadas del DEM para minimizar o generalizar el error de las mismas.

Los resultados del análisis de la información suministrada por CORPOCESAR (2017-2018), previamente realizada, para las anualidades a interpolar se resume a continuación.

- Como resultado del análisis de los datos se tomaron 1768 puntos de valores de niveles estáticos para la construcción de los mapas de niveles piezométricos que corresponden a los inventarios de los años 2004, 2013 y 2015, siendo los de mayor volumen de datos los correspondientes a los años 2004 y 2015.
- Los datos tomados en el 2004, según la base de datos de CORPOCESAR (2017-2018), abarcan los meses de abril hasta diciembre (750 puntos), los cuales se encuentran distribuidos en el municipio de Becerril (90 puntos), Chiriguaná (141 puntos), Agustín Codazzi (234 puntos), Curumaní (6 puntos), El Paso (124 puntos), La Jagua (101 puntos), La Paz (45 puntos) y San Diego (9 puntos), lo que permitió construir el mapa exclusivamente para el área en la cual se encuentran distribuidos los puntos inventariados y que corresponden principalmente (647 puntos) a la llanura aluvial (Qlla) y en menor proporción (55 puntos) a la unidad denominada conos aluviales (Qcal); en este inventario se presentan en proporciones bajas en unidades geológicas denominadas y descritas en el capítulo de geológica como Qt (14 puntos), N1c (25 puntos), K1r (5 puntos) y Jq (3 puntos), consideradas como de bajo representatividad estadística para análisis piezométricos.
- Los inventarios para el año 2013, se tomaron principalmente entre los meses de junio y agosto, distribuidos espacialmente entre los municipios de La Paz (1 punto), El paso (167 puntos), Chiriguaná (85 puntos), La Jagua de Ibirico (45 puntos) y Agustín Codazzi (288). Como se observa en la Figura 80, estos se encuentran localizados distribuidos a manera de clusters en la zona centro sur del acuífero, pero con una dispersión amplia, exceptuando los localizados en los municipios de La Paz y Agustín Codazzi, en el

cual se encuentra una importante concentración de datos. Geológicamente los puntos inventariados se encuentran ubicados sobre las formaciones geológicas E1b (2 puntos), Jq (5 puntos), K1c (1 punto), K1r (2 puntos), N1c (9 puntos), y Qt (7 puntos), Qcal (4 puntos) y Qlla (554 puntos), esta última de interés regional toda vez que conforma la unidad acuífera de mayor importancia en el acuífero priorizado Cesar.

- El inventario del 2015 permite concluir que 521 puntos inventariados se encuentran distribuidos en los municipios de Becerril (28 puntos), Chiriguaná (17 puntos), La Jagua de Ibirico (16 puntos), La Paz (75 puntos), San Diego (70 puntos) y Valledupar (315 puntos); geológicamente 452 puntos se ubican en la Llanura aluvial (Qlla), 56 puntos en la unidad denominada Conos o Abanicos Aluviales (Qcal), Valledupar para este caso, 7 puntos en terrazas (Qt), 1 punto sobre la Formación Barco (E1b) y 2 puntos sobre la Formación La Quinta (Jq). Estos últimos no fueron tomados en cuenta por su bajo peso en el análisis espacial de los datos. La información anteriormente descrita, permitió la elaboración de dos mapas piezométricos, el primero localizado en la parte centro y a lo largo del acuífero priorizado y el último localizado principalmente en Valledupar (Figura 84), ubicado geológicamente en el Abanico de Valledupar (Qcal).
- Según el inventario de PAS del año 2015, para la Llanura aluvial (Qlla) a escala regional (Figura 84) se presentan valores máximos de niveles estáticos de 22.50 m y mínimos de 0 m, con un promedio de 5.17 m. Los valores mínimos de cero corresponden posiblemente a zonas donde el nivel freático o piezométrico se encuentra superficial o el valor no fue tomado.
- En el municipio de Valledupar el abanico o cono aluvial (Qcal) presenta para el 2015 valores máximos de niveles estáticos de 11.57 m de profundidad a superficiales (Valores de cero “0”), con un promedio de 5.42 m y valores mínimos de 0, sugiriendo la presencia de manantiales o pozos principalmente.
- En cuanto a la unidad denominada Llanura aluvial (Qlla) hacia Chiriguaná, Agustín Codazzi, El Paso, La Jagua y La paz, presenta niveles estáticos máximos de 15.64 m y mínimos de 0.04 m de profundidad a superficiales (474 datos), con valores recurrentes de 0.04 m (Moda) y un promedio de 49.22 m de profundidad, según la información obtenida para el 2015.
- Las Formaciones Paleozoicas (PZmv), Cretácicas (K1c y K1r), Jurásicas (Jq, Jgr, Jkvr y Jvi) y terciarias (Tg, Tpc, Tc, N1c y N1b) se inventariaron en el 2004, 2006 al 2008, y 2012 al 2015 con un valor global de 104 puntos visitados, lo que equivale a 17 puntos (PZmv), 9 puntos (Jgr), 18 puntos (Jkvr), 24 puntos (Jq), 7 puntos (Jvi), 11 puntos (K1c), 10 puntos (K1r), 4 puntos (Tg), 3 puntos (Ts), 1 punto (Tpc), 7 puntos (E1b), 62 puntos (N1c) y 136 puntos (Qt); datos que presentan ventanas de tiempo amplias y sin puntos de referencia para un análisis de variaciones de los niveles, por lo tanto se descartan por su baja densidad para el análisis espacial de datos. Como ejercicio para mostrar lo local de los datos se realiza evaluación de los niveles piezométricos para el 2015 en la unidad N1c que se describe más adelante.
- Para la zona minera, según el inventario realizado en los municipios de El Paso y La Jagua (CORPOCESAR, 2017-2018) se encuentran períodos de mediciones entre el 2004, 2011 al 2013 y 2015, presentando una ventana importante entre el 2004 y el 2011 y entre el 2011 y el 2015; los valores medidos presentan un promedio de 2.71 m de nivel piezométrico, resaltando que existen 33 puntos con valores de cero “0” en la base de datos y 36 puntos con niveles piezométricos que en promedio arrojan un valor de 5.19 m de profundidad del nivel piezométrico.

En ese orden de ideas, se consideraron los años 2004, 2013 y 2015 para el análisis piezométrico y de direcciones de flujo, para esto se realizaron interpolaciones mediante dos métodos a través del Software ArcGIS, el primero denominado vecino natural y el segundo mediante interpolación spline con barreras, los

cuales se comparan y se interpretan en el siguiente numeral; esta interpolación se realiza teniendo en cuenta un modelo homogéneo y un medio discontinuo, que para este caso son las fallas presentes en la región. Es importante mencionar que una limitación determinante de las interpolaciones es que no consideran el análisis de los sesgos inducidos por la densidad de pozos en diferentes zonas y el ajuste no lineal de los datos tomados para el análisis.

2.4.2 Red de flujo

Antes de realizar la descripción de la red de flujo para el sistema acuífero Cesar, se presentan algunas generalidades sobre esta temática con el fin de argumentar los planteamientos realizados en este documento frente a la tendencia de los flujos identificados en el acuífero y que son predictivos debido a amplia dispersión y amplias ventanas temporales de los datos colectados para el mismo.

Los sistemas de flujos de aguas subterráneas comprenden tanto la recarga como la descarga del agua y el flujo horizontal, conformando sistemas hidrogeológicos hidrodinámicos que pueden recuperarse permanentemente mediante la precipitación como parte del ciclo hidrogeológico; por lo tanto, un sistema de flujo de agua subterránea puede pasar por varios acuíferos de diferentes tipos que pueden tener o no contacto entre sí, lo que sugiere tener un conocimiento lo suficientemente amplio para comprender el funcionamiento hidrogeológico de estos sistemas (Werner, 1996).

Los flujos subterráneos poseen componentes como condiciones límite (límite de no flujo y cabeza constante), zonas o áreas de recarga (infiltración directa en el afloramiento, a través de los lechos de corrientes o reservorios y flujo interinformacional) y descarga (discreta, corriente ganadora o lago, bombeo de un pozo, flujo interinformacional o por evaporación) (Uliana, 2012).

Los flujos de agua subterránea regionales están definidos por las siguientes características: a) una gran área, entre los 101-102 Km, b) cubrimiento de ciudades o estados completos, c) contienen varios sistemas de flujos locales (áreas de recarga y descarga dentro del sistema general) y d) pueden tener recargas locales o descargas en grandes sistemas (Uliana, op.cit.).

Las condiciones de los límites de fallas dependen de: 1) si estas son abiertas y permeables, las cuales se pueden convertir en zonas de recarga hacia el acuífero, 2) en el caso de que estas se presenten abiertas y llenas de materiales impermeables pueden convertir el movimiento de agua en un régimen permanente y en equilibrio, 3) cerradas con baja permeabilidad convirtiéndose en barreras que impiden el avance del agua, y 4) cerradas impermeables consideradas como barreras hidráulicas o zonas límite de acuíferos. Estas condiciones de borde o de frontera afectan el cálculo hidráulico de las aguas subterráneas debido a que se pueden presentar una serie de condiciones isotrópicas y homogéneas o anisotrópicas y limitadas; por lo tanto, los límites de borde o fronteras acuíferas son factores que influyen o no directamente la recarga directa de un río, como también la presencia de barreras estructurales o fallas, el radio de influencia de otros pozos (conos de abatimiento), el mar (intrusiones marinas), condiciones petrológicas (factor geológico) y extensión infinita (acuíferos libres).

Las superficies piezométricas modeladas y las direcciones de flujo subterráneo para el sistema acuífero Cesar, fueron agrupadas tomando la información de los años 2004, 2013 y 2015, períodos en los cuales se

cuenta con el mayor número de puntos de agua subterránea inventariados. Con el fin de realizar la identificación de los flujos locales-regionales del sistema hidrogeológico se consideraron los valores máximos de los niveles piezométricos estáticos para la evaluación de los flujos de aguas subterráneas asociados al sistema acuífero Cesar, como son: 1) Llanura Aluvial (Qlla) 21.70 m para el 2004 (punto de referencia inicial), 15.64 m para el 2013 (ascenso del nivel piezométrico) y 22.50 m para el 2015 (descenso del nivel), 2) Cono o Abanico Aluvial (Qcal) con valores de 12.60 m de profundidad para el 2004 (valor de referencia inicial) y 8.8 m para el 2015 (descenso del nivel piezométrico); permitiendo concluir que los niveles piezométricos en general se encuentran localizados en las formaciones cuaternarias y han sido dinámicos aparentemente en estas amplias ventanas de tiempo. Se presenta además, de manera puntual, para la zona minera el mapa piezométrico y de direcciones de flujo para la formación denominada Cuestas para el año 2013.

Para el análisis de las direcciones de flujo se realizaron los siguientes mapas:

INTERPOLACIÓN POR VECINO NATURAL O CERCANO (medio homogéneo)

1. Llanura Aluvial (Qlla) para el año 2004 (Figura 89).
2. Llanura Aluvial (Qlla) para el año 2013 (Figura 90).
3. Llanura Aluvial (Qlla) para el año 2015 (Figura 91).
4. Conos o Abanicos Aluviales (Qcal) para el año 2015 (Figura 92).

Para el año 2004 se observa una distribución de los datos hacia la zona centro-sur del sistema acuífero Cesar, donde las isopiezas inician con valores de gradientes hidráulicos altos hacia la Serranía del Perijá y disminuyen hacia la parte baja de la misma con valores hidráulicos o alturas piezométricas bajas (30 m). Lo anterior, permite inferir para la llanura aluvial un sentido de flujo del agua subterránea preferencial hacia el W a ligeramente SW hacia el centro del Valle del Río Cesar, concordantes con la red de drenaje presente en la zona. Los gradientes altos hacia la Serranía del Perijá sugieren posiblemente un aporte de flujo de agua subterránea hacia el pie de monte y el valle, como también zonas potenciales de recarga por infiltración superficial (Figura 89). Para el año 2013, se mantienen las tendencias ligeramente al W (N80W), con deflexiones hacia el centro del valle donde el flujo regional presenta una tendencia S10W concordante con el eje del río Cesar en el Valle del mismo; se observa zonas de isopiezas amplias y líneas de flujo concordantes con la dirección de las corrientes presentes en el valle cuyas aguas son entregadas al río Cesar (Figura 91). Finalmente para el 2015, hacia la parte norte de la cuenca, se presenta una tendencia al SW (aproximada S70W) a NW (N10W) producto del estrangulamiento de la cuenca en zonas donde se acercan más a las rocas asociadas con la Sierra Nevada de Santa Marta al NW, al NE con la Serranía de Perijá y hacia el sur de la cuenca se presentan tendencias al W (S70W) convergiendo hacia el eje central del valle del Río Cesar. Lo anterior marca de manera regional las tendencias concordantes con las direcciones de la red de drenaje que constituye el valle o llanura aluvial del Río Cesar, siendo aparentemente la red hídrica uno de los principales mecanismos de recarga del acuífero de la llanura aluvial (Qlla) probablemente por infiltración en las formaciones geológicas (Figura 91).

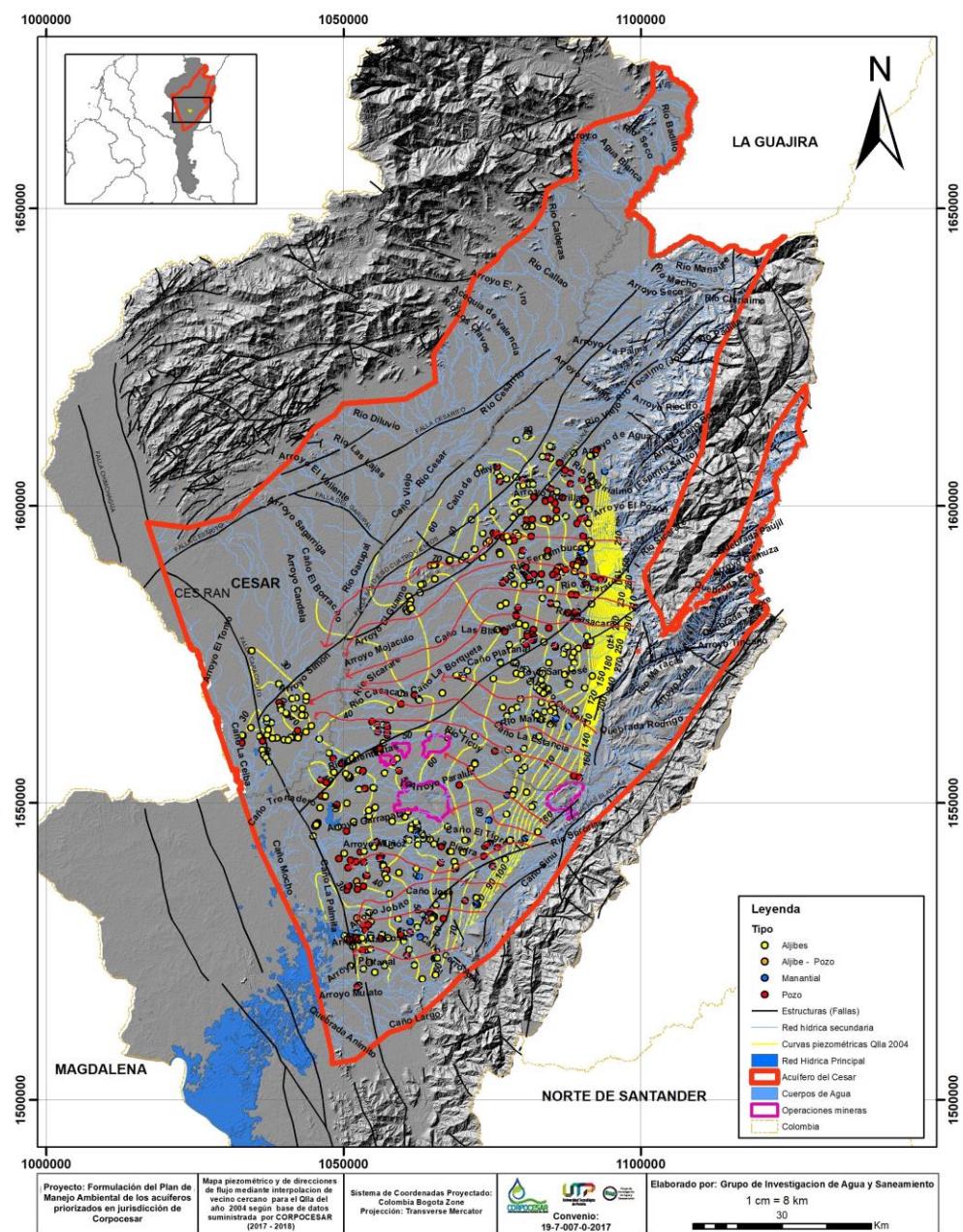


Figura 89. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de vecino natural para la Llanura aluvial de Cesar (Qlla) del año 2004.

Es de resaltar que debido a las amplias ventanas de tiempo entre los datos es difícil observar cambios importantes en el comportamiento de los niveles piezométricos, a pesar de que en algunos puntos se presentan abatimientos: en los años 2004 y 2013 de acuerdo a la interpolación por vecino natural (Figuras 89 y 90). Para el año 2015 se presentan de manera puntual abatimientos hacia la parte norte o alta del sistema acuífero Cesar (Figura 91).

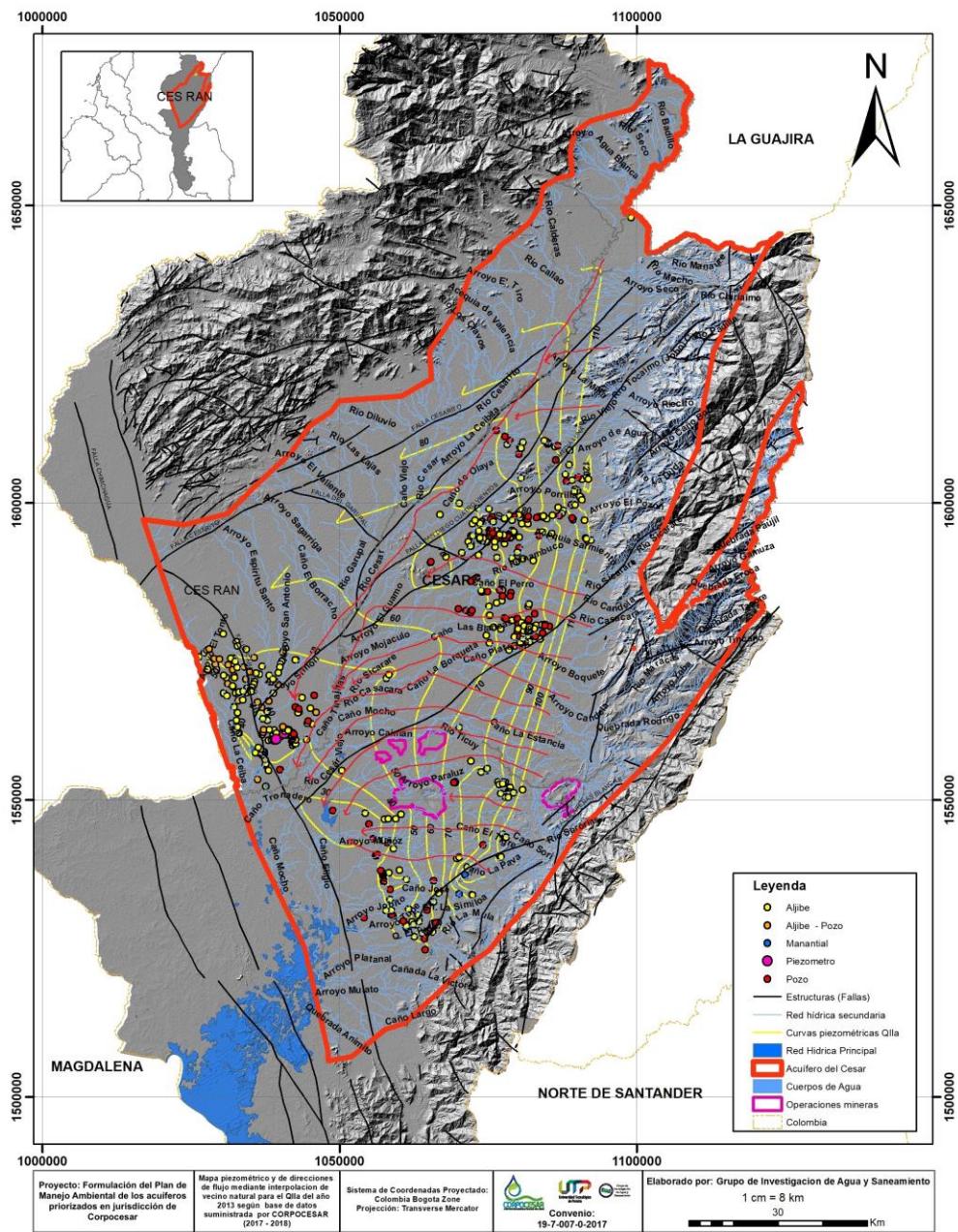


Figura 90. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de vecino natural para la Llanura aluvial de Cesar (Qlla) del año 2013.

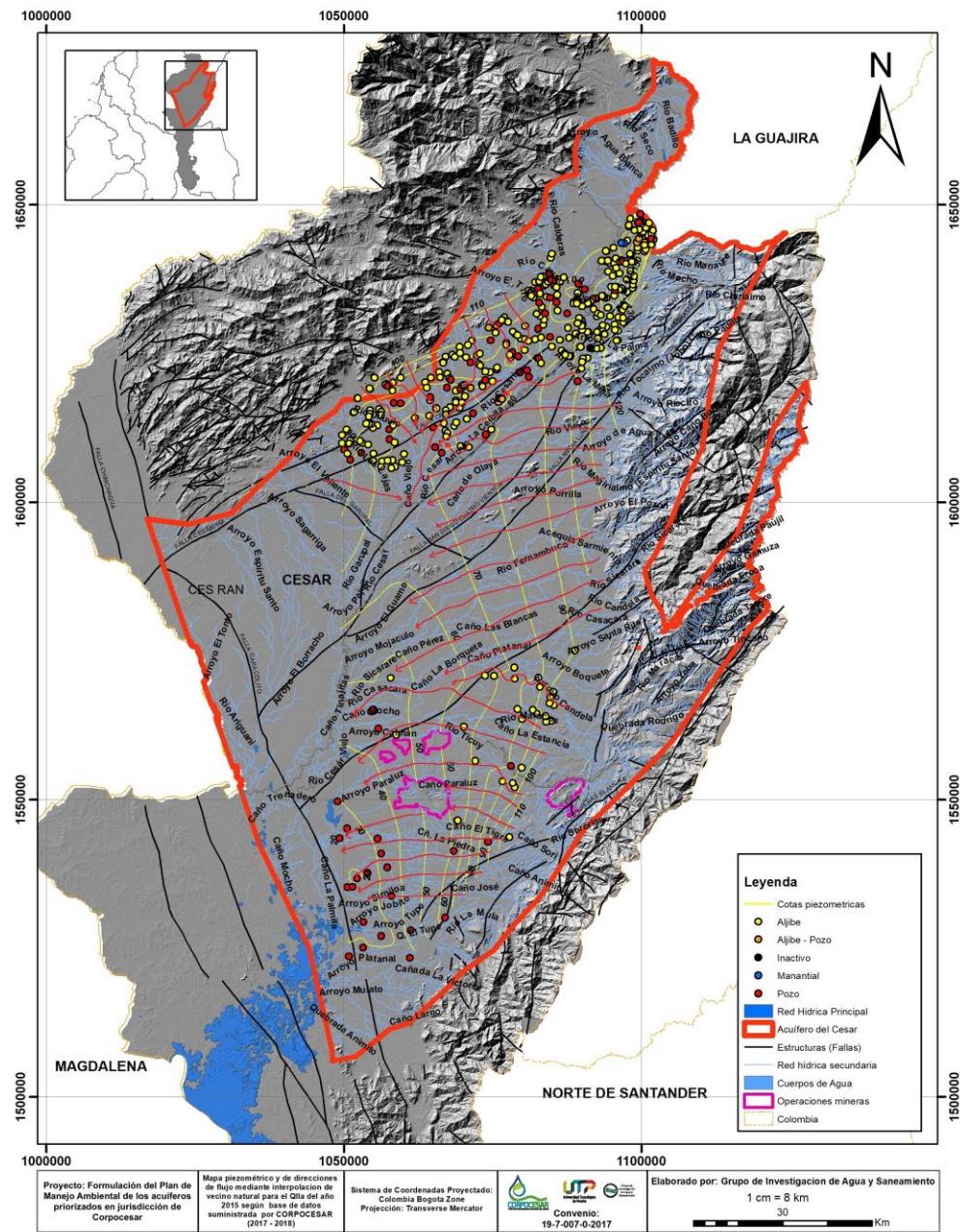


Figura 91. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de vecino natural para la Llanura aluvial de Cesar (Qlla) del año 2015.

El cono aluvial (Qcal) asociado al abanico aluvial de Valledupar con dirección de emplazamiento o deposición NE, presenta direcciones de flujo con tendencias desde SE a S para el año 2015, hacia la parte distal del abanico, donde probablemente se concentran las facies más finas de esta unidad geológica, presentando gradientes hidráulicos o alturas piezométricas moderadas (130 m) hacia la parte media baja del abanico y bajos en límites con la unidad aluvial (Qlla) en inmediaciones del arroyo Guasimal, donde al parecer

confluyen las isopiezas producto de un abatimiento por explotación del pozo localizado en dicha área (Figura 92).

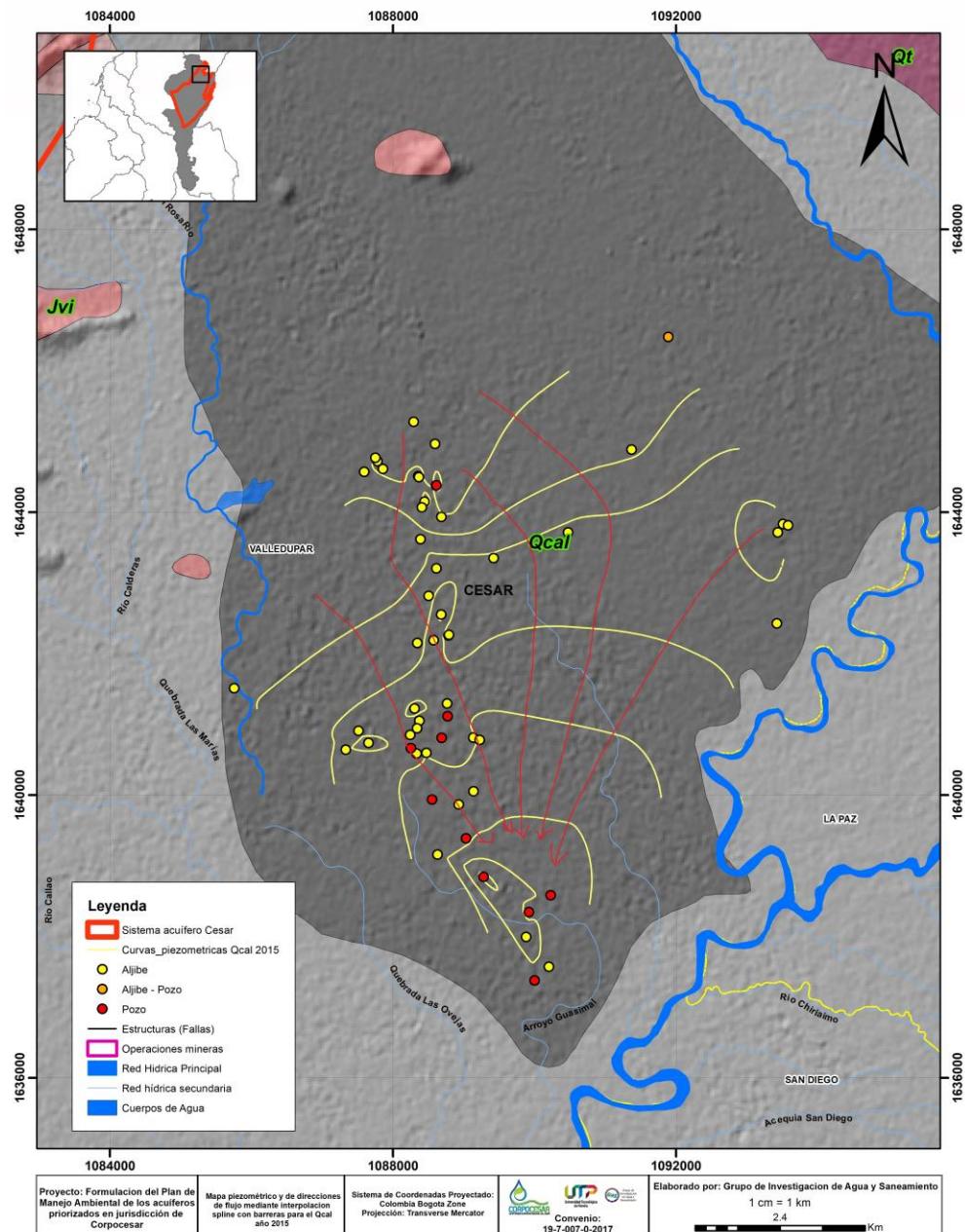


Figura 92. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de vecino natural para el Cono o abanico Aluvial (Qcal) del año 2015.

INTERPOLACIÓN POR SPLINE CON BARRERAS (medio discontinuo)

1. Llanura Aluvial (Qlla) para el año 2004 (Figura 93).
2. Llanura Aluvial (Qlla) para el año 2013 (Figura 94).
3. Llanura Aluvial (Qlla) para el año 2015 (Figura 95).
4. Conos o Abanicos Aluviales (Qcal) para el año 2015 (Figura 96).
5. Formación Cuestas (N1c) para el año 2015 (Figura 97).

La interpolación realizada mediante este método incluye las trazas de las fallas tomadas de la cartografía geológica suministrada por la autoridad ambiental, como posibles fronteras en el acuífero, metodología que en los mapas obtenidos arrojaron isopiezas en zonas donde no existen valores, generando por lo tanto sesgos en la interpolación como se observa en la Serranía del Perijá, en la zona de influencia del río Maracas y Fernambuco, entre otros, como también en algunos casos la intersección de algunas isopiezas. No obstante, la carga hidráulica para los años 2004, 2013 y 2015, sugieren que algunas fallas como San Diego-Cuatro Vientos, Media Luna, entre otras, influyen directamente en el flujo de agua subterránea; sin embargo, se mantienen las tendencias generales tanto de carácter local como regional concordantes con las direcciones de flujos de las corrientes superficiales (W y SW), las cuales evidentemente están controladas estructuralmente (Figuras 93, 94 y 95). De igual manera, para las cargas hidráulicas de los años 2013 y 2015, la interpolación sugiere que el sistema de fallas presenta una marcada influencia en el control de los flujos subterráneos, con valores de isopiezas altos hacia la Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía del Perijá y bajos hacia la planicie del río Cesar considerada de manera general como zona mixta (recarga y descarga) y el pie de monte como zona de transitos de los flujos subterráneos. Los abatimientos son comunes y de manera puntual, de los cuales se destaca el observado para el año 2013 en la zona de explotación de la Jagua, hacia el costado oeste de la operación, donde la altura piezométrica de un aljibe inventariado es de 110 m (Figura 94).

Para el año 2015, el cono aluvial (Qcal) asociado al abanico aluvial de Valledupar presenta direcciones de flujo con tendencias desde SE a S hacia la parte distal del abanico, donde probablemente se concentran las facies más finas de esta unidad geológica, presentando gradientes hidráulicos o alturas piezométricas moderadas (140 m) hacia la parte media alta del abanico y bajos en límites con la unidad aluvial (Qlla) en inmediaciones del arroyo Guasimal y Río Cesar, donde al parecer confluyen las isopiezas producto de un abatimiento por explotación del pozo localizado en dicha área, abatimientos (Figura 96). Es posible que esta unidad acuífera descargue los flujos subterráneos al Río Cesar, convirtiéndolo de manera puntual en un río que gana y la zona de tránsito inicie desde el ápice del abanico hasta la entrega al río Cesar.

La Formación Cuesta en la zona minera dadas sus características de permeabilidad y porosidad presenta direcciones de flujo locales bidireccionales entre W-SW, NW y W-N a localmente E-NE, asociados a la deformación plástica presente en las capas que conforman esta unidad (plegamientos), presentando gradientes o alturas piezométricas moderadas hacia el este (79 m) y medias hacia la zona del río Calenturitas (45 m), con presencia de abatimientos puntuales. Existe al parecer una divisoria entre Pribbenow (DRUMMOND) y Calenturitas (PRODECO) con dirección NE, que separa dos familias de flujos subterráneos identificados, según la interpolación spline con barreras para dicha área (Figura 97).

En ese orden de ideas, ambos métodos marcan tendencias generales concordantes con la red de drenaje la cual se encuentra controlada estructuralmente por el sistema de fallas regional de la cuenca del Río Cesar con direcciones N30-40E y sistemas locales con tendencias N20-30W. Es de resaltar que las fallas se comportan como barreras acuíferas que pueden ser permeables o impermeables transmitiendo o no las aguas subterráneas. Así mismo, la presencia de abatimientos de carácter local son evidenciados en diferentes años sin ser estos aparentemente constantes en el tiempo. Las zonas de recarga están asociadas claramente a la Serranía del Perijá al SE y a la Sierra Nevada de Santa Marta al Oeste y una dirección de flujo regional proveniente de la parte alta de la cuenca del Río Cesar.

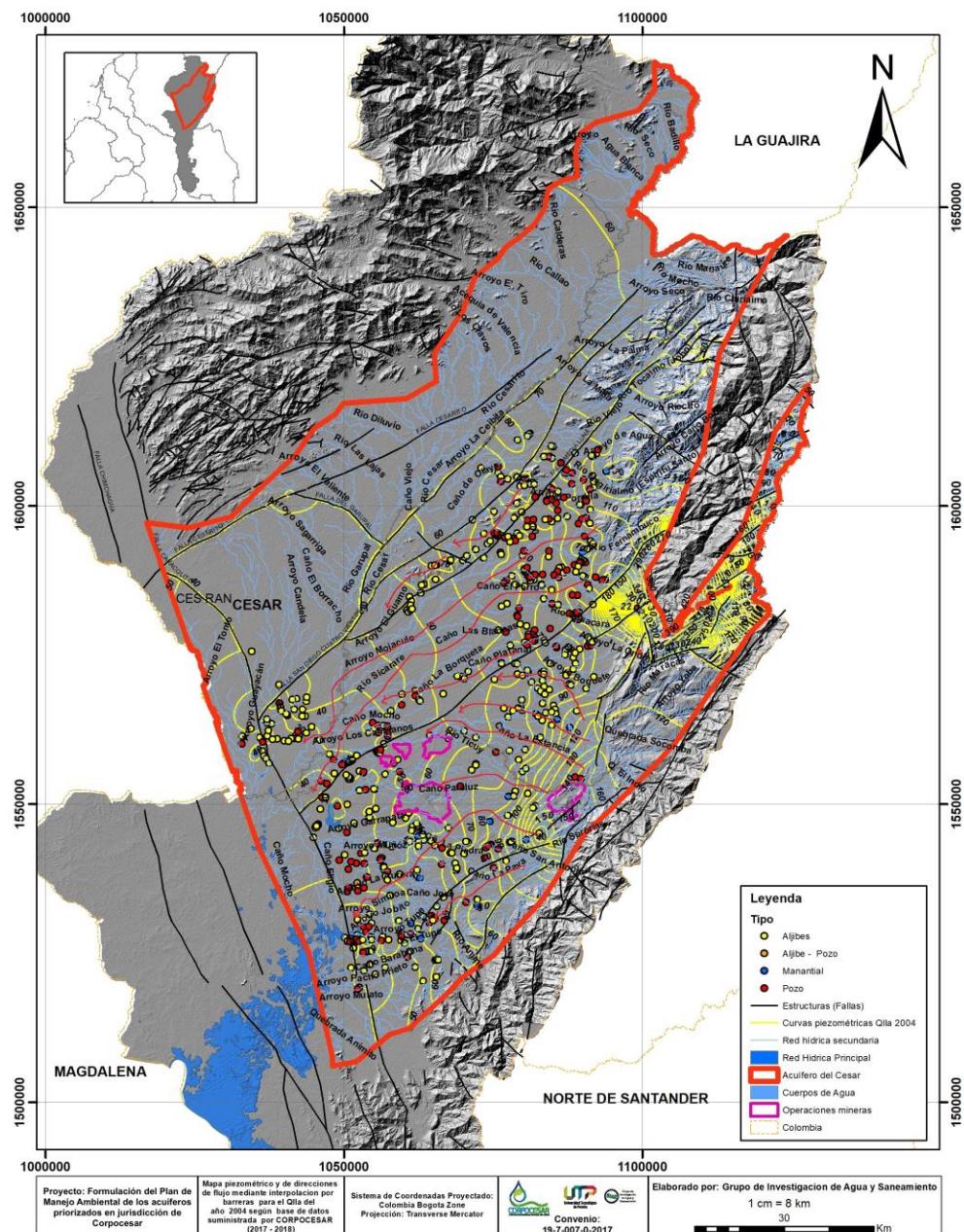


Figura 93. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de spline con barreras para la llanura Aluvial (Qlla) del año 2004.

Comparando los modelos obtenidos mediante el procesamiento de los datos a través de ArcGIS para la unidad Qlla del 2004, se observa correspondencia con los mapas elaborados por CORPOCESAR (2004, Convenio CORPOCESAR-IDEAM, 2003), donde los flujos subterráneos bajan desde la Serranía de Perijá, en el área de influencia de los municipios de San Diego, La Paz, Agustín Codazzi, Becerril y La Jagua de Ibirico principalmente, y transitan a lo largo de la llanura aluvial; es de anotar que en estos planos se toman como barreras los drenajes de mayor importancia de la zona.

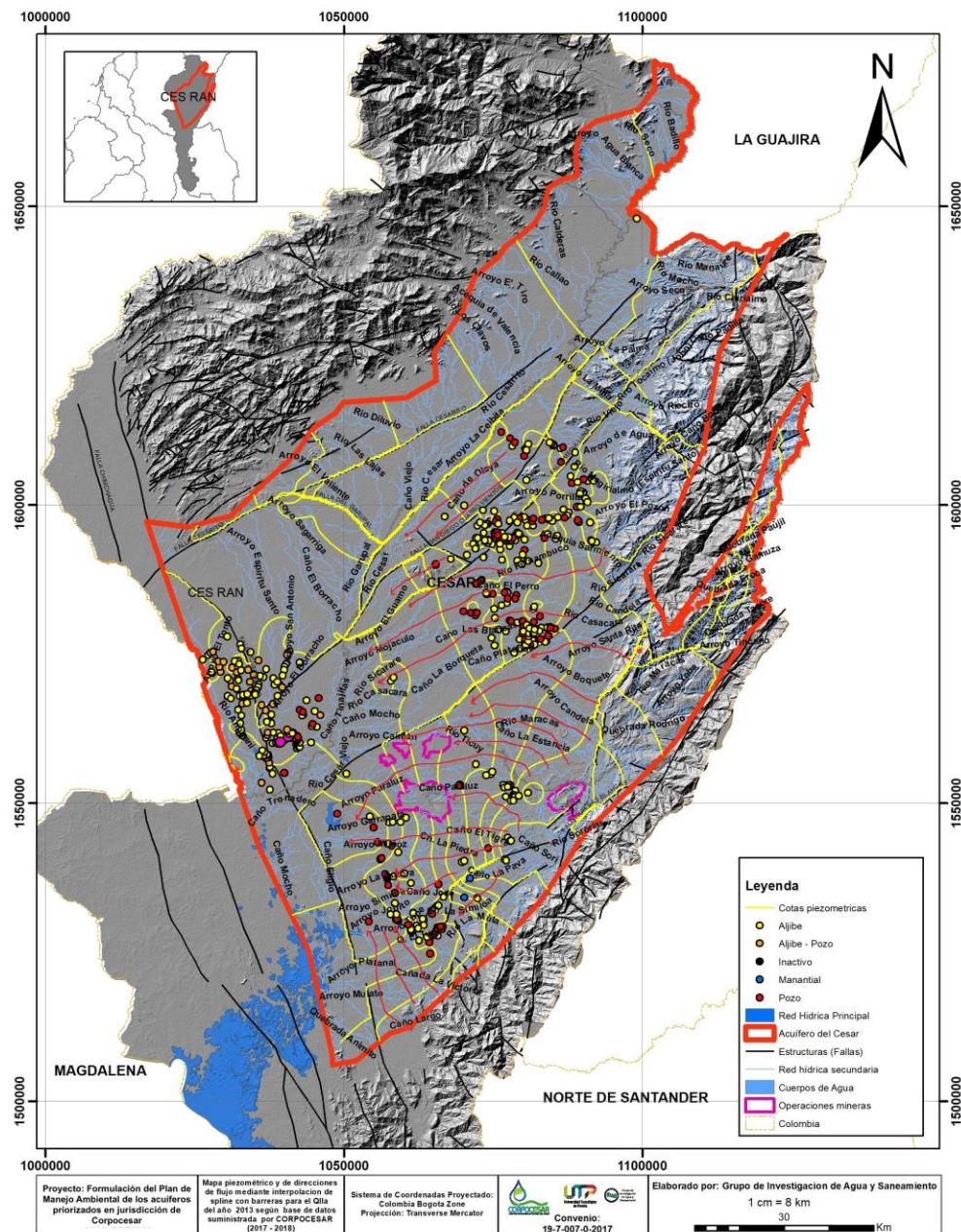


Figura 94. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de spline con barreras para la Llanura Aluvial (Qlla) del año 2013.

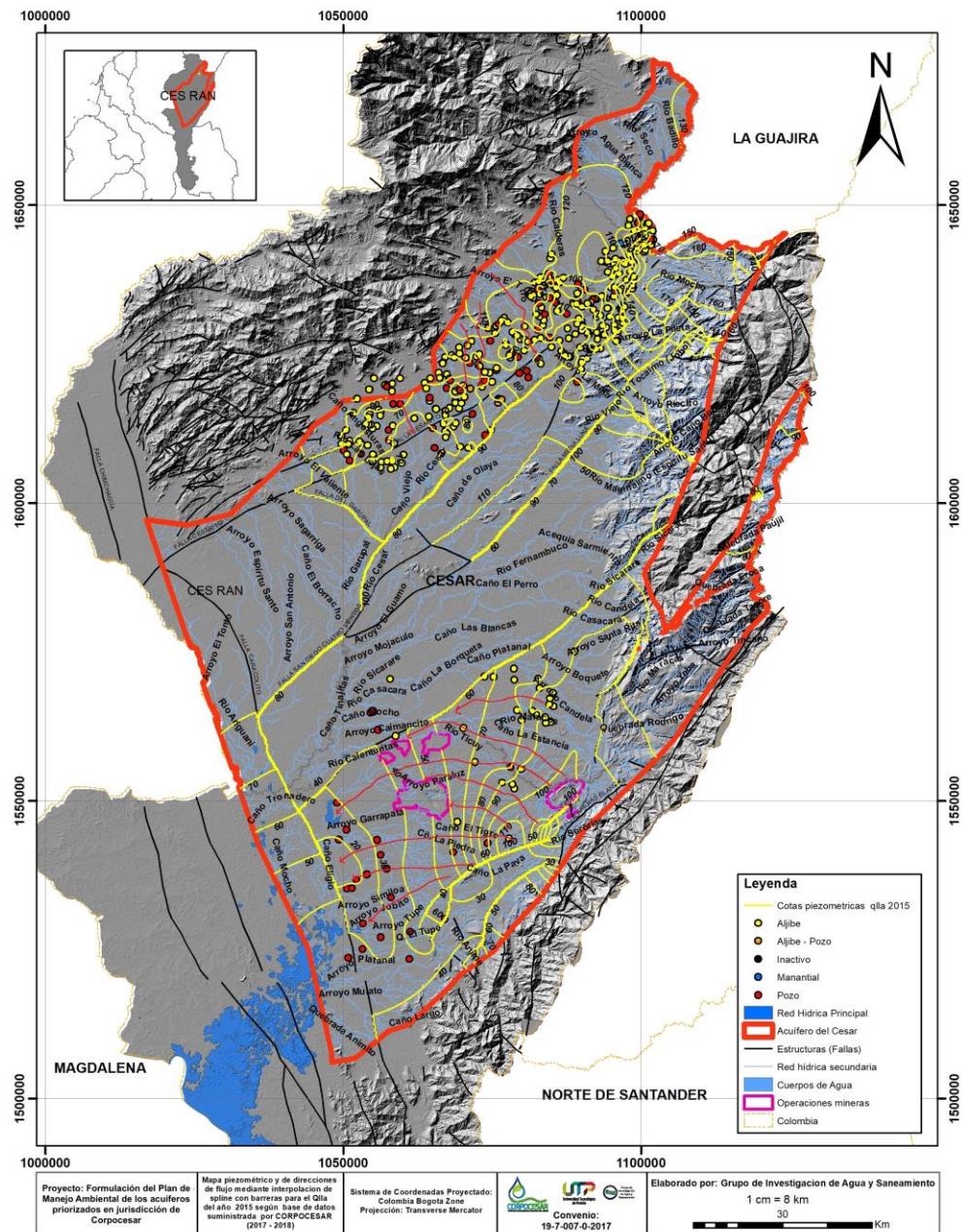


Figura 95. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de spline con barreras para la llanura Aluvial (Qlla) del año 2015.

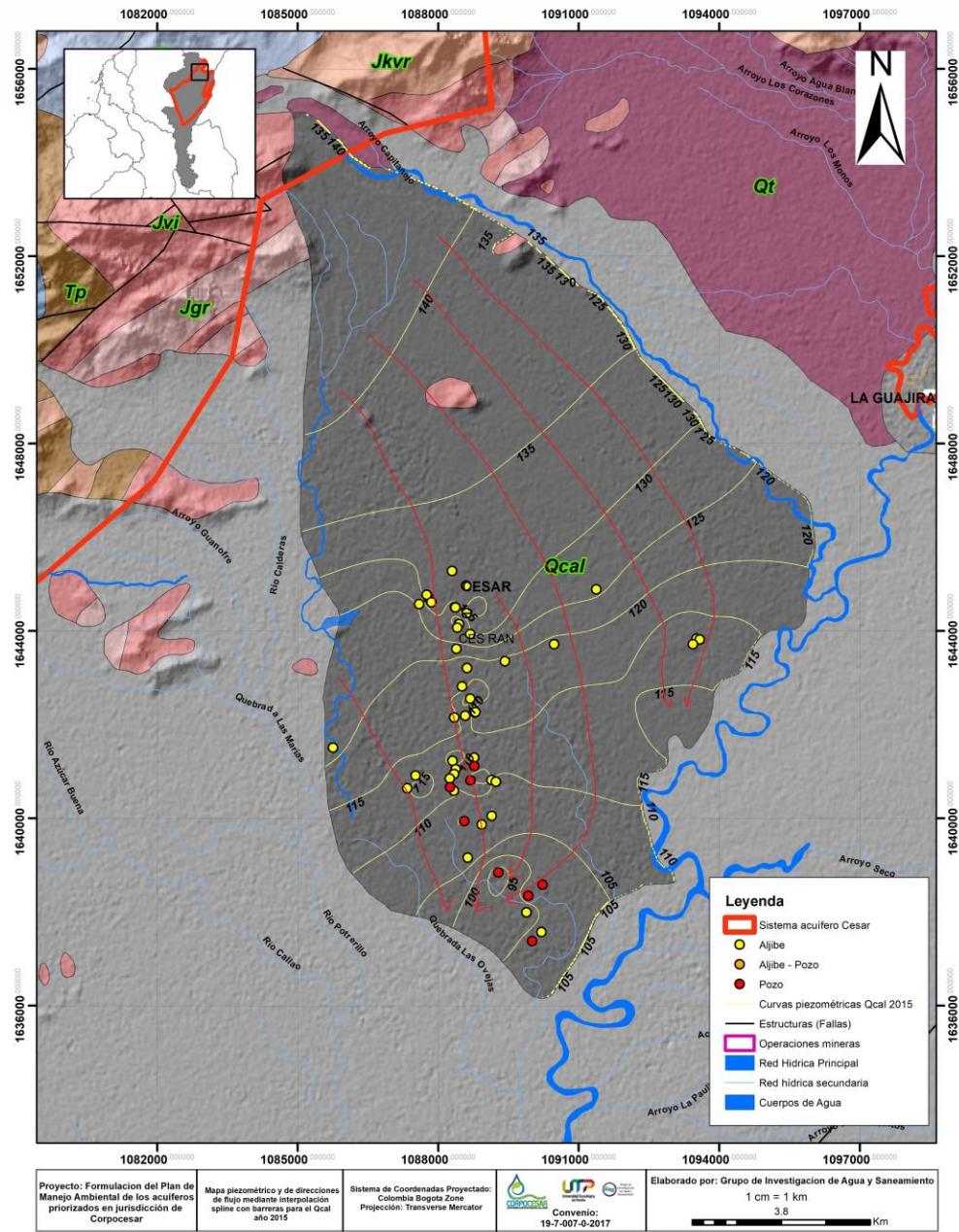
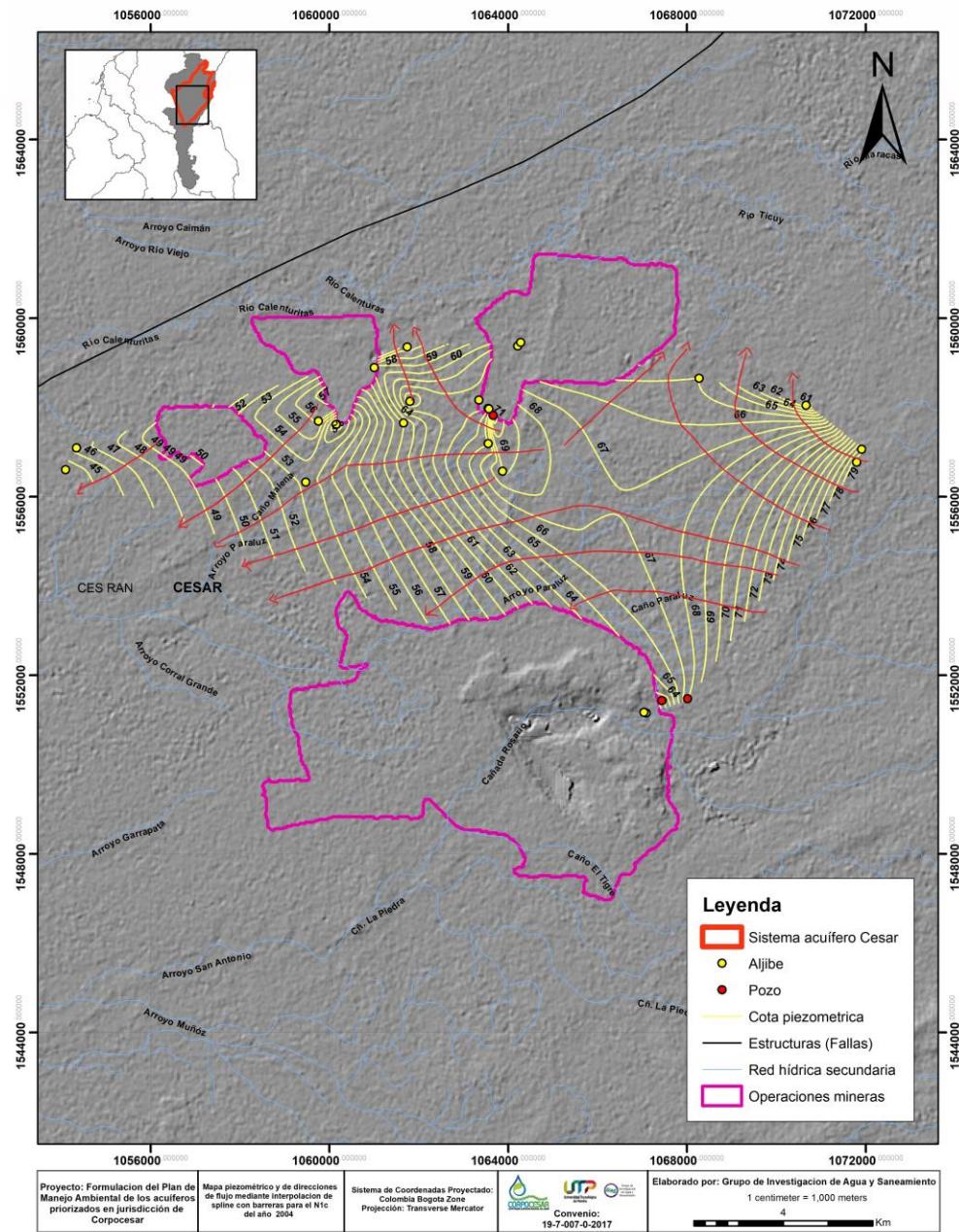


Figura 96. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de spline con barreras para el Cono o Abanico Aluvial (Qcal) del año 2015.



Figura

97. Mapa piezométrico y direcciones de flujo mediante interpolación de spline con barreras para la Formación Cuestas (N1c) del año 2015.

2.5 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

La evaluación hidrológica del sistema acuífero Cesar, se ha desarrollado a partir de información de registros históricos de las variables hidroclimatológicas (precipitación, temperatura, evaporación, humedad, etc.) e información detallada de la zona; que a su vez han permitido calcular la Recarga Potencial de acuífero por el método del balance hídrico y aplicando las ecuaciones empíricas expuestas en la Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos del MADS (2014).

2.5.1 Balance hídrico

La recarga de agua subterránea se define como la entrada de agua dentro de la zona saturada, donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas de agua (Bradbury et al., 2000; Balek, 1988; Scanlon et al., 2002). Custodio (1997) la define como el volumen de agua que penetra en un cierto período de tiempo en las reservas subterráneas o como el flujo unitario que alcanza el nivel freático.

Para la estimación de la recarga potencial por precipitación, el método más utilizado es el balance hídrico: aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de frontera durante un determinado período de tiempo. La diferencia entre el total de entradas y el total de las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua.

Esta ecuación puede ser aplicada a sistemas de cualquier tamaño, y es dependiente del tiempo, es decir, los elementos del flujo que entran al sistema en estudio deben ser medidos sobre el mismo período de tiempo que los del flujo de salida. En general, las técnicas de balance aplicadas a evaluación de recursos de agua subterránea, tratan la recarga como el residual de otros flujos en la ecuación de balance (Ecuación 1):

$$BH = P - Evt - Esc - dS \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde,

BH: balance hídrico (mm)

P: precipitación media de la zona de estudio (mm)

Evt: evapotranspiración (mm)

Esc: escorrentía superficial (mm)

dS: almacenamiento de humedad en el suelo (mm)

2.5.2 Análisis de información

El principal objetivo de llevar a cabo análisis de información hidroclimatológica en la estimación de la recarga potencial y en general estudios que involucren la planeación y diseño relacionados con recurso hídrico, es obtener resultados confiables que caractericen el comportamiento hidroclimatológico de cualquier zona de estudio. Aunque en los últimos años la información ha aumentado en cantidad (debido al incremento del número de estaciones hidrometeorológicas) y en calidad (aumento de los años de registro), es necesario ser cada día más exigentes en el tratamiento previo de dicha información con el fin de evitar que el objeto del estudio en que se use, no sea alterado debido a factores naturales tales como la incidencia de períodos de sequía y/o lluvia prolongados y los eventos climáticos extremos, que en los últimos años van en ascenso (Lasso, 2016; Castro & Carvajal, 2010).

Para la zona de influencia del sistema acuífero Cesar, este proceso fue aplicado a estaciones climatológicas que se encuentran cerca del área de estudio (Tabla 14). En total, se identificaron veinticinco (25) estaciones, las cuales, son operadas y/o administradas por el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); del total de estaciones seis (6) son Climáticas Ordinarias –CO-, nueve (9) son Climáticas Principal –CP-, nueve (9) son Pluviométricas –PM- y una (1) Sinóptica Principal –SP.

Tabla 14. Identificación de las estaciones cercanas a la zona de estudio.

Estación	Tipo	(x)*	(y)*	Lat	Long	Altura (m.s.n.m)	Municipio	Departamento
Apto las Flores [25025090]	SP	1011728,2	1492144,1	9,05	-73,97	34	El Banco	Magdalena
Astrea [25020220]	PM	1011487,7	1541540,7	9,49	-73,97	50	Astrea	Cesar
Batallón No. 6 Autom [29065120]	CP	1016392,4	1649099,5	10,47	-73,93	1280	Fundación	Magdalena
Cañaverales [15060080]	PM	1134792,0	1681711,0	10,76	-72,85	230	San Juan Del Cesar	La Guajira
Centenario Hda. [28025090]	CO	1089074,4	1581166,9	9,85	-73,27	100	Agustín Codazzi	Cesar
Chiriguana [25025250]	CO	1053179,5	1526984,9	9,36	-73,59	40	Chiriguano	Cesar
Col Agro Pailitas [25025330]	CP	1049204,5	1481984,6	8,95	-73,63	50	Pailitas	Cesar
Difícil El Camp [25021250]	PM	999090,0	1587885,8	9,91	-74,09	120	Ariguano (El Difícil)	Magdalena
El Difícil Autom [25025000]	CP	999090,0	1587885,8	9,91	-74,09	120	Ariguano (El Difícil)	Magdalena
Fedearroz Autom [28035060]	CP	1090811,7	1649021,5	10,46	-73,25	184	Valledupar	Cesar
Guatapuri Autom [28035070]	CP	1074940,4	1678687,9	10,73	-73,39	1315	Valledupar	Cesar
Guayamaral [28035040]	CO	1047156,8	1587135,9	9,90	-73,65	50	Valledupar	Cesar
Hatico D Los Indio [28010200]	PM	1105335,1	1692939,0	10,86	-73,11	594	San Juan Del Cesar	La Guajira
La Loma Carbones Del [28025130]	CP	1060758,7	1557920,7	9,64	-73,52	60	El Paso	Cesar
Manaure Autom [28015110]	CP	1118268,1	1638232,1	10,37	-73,00	1918	Manaure Balcon Del	Cesar
Primavera La [25020920]	PM	1072622,5	1511048,7	9,22	-73,42	500	Curumano	Cesar
Pto. Barco [16070010]	PM	1129821,9	1487012,0	9,00	-72,90	50	Tibo	Norte de Santander
Rincón El [28025020]	CO	1103649,1	1627792,9	10,27	-73,13	350	San Diego	Cesar
San Roque Alertas [25021380]	PM	991664,0	1494945,1	9,07	-74,15	24	El Banco	Magdalena
San Sebastián De [29060090]	PM	1051845,0	1659968,7	10,56	-73,60	2000	Pueblo Bello	Cesar
Serranía Del Perija [28025120]	CP	1113068,3	1601016,4	10,03	-73,05	2256	Agustin Codazzi	Cesar
Socomba [28025080]	CP	1091852,6	1563078,5	9,69	-73,24	170	Becerrill	Cesar
Sta. Rosa De Lima [29060100]	PM	996661,1	1642170,4	10,40	-74,11	75	Fundacion	Magdalena
Urumita [28015070]	CO	1116139,5	1660467,7	10,57	-73,02	255	Urumita	La Guajira
Villa Rosa [28035010]	CO	1058088,5	1618759,2	10,19	-73,55	70	Valledupar	Cesar

*Sistema de coordenadas: MAGNA_Colombia_Bogota

A partir de la tabla anterior se procedió a realizar el proceso de selección de estaciones. Este análisis consistió en:

- **Estado de la estación:** las estaciones se clasificaron en Activas o Inactivas de acuerdo con el estado actual de éstas de acuerdo con el catálogo nacional de estaciones al año 2017 emitido por IDEAM (IDEAM, 2017). Por lo tanto, el primer paso fue verificar si la estación estaba activa (actualmente reporta información) o inactiva (reportó información en un determinado tiempo). De estar activa la estación y verificar que tiene una antigüedad igual o mayor a quince (15) años, se aplicó el criterio de modalidad, en caso contrario, esta fue rechazada.
- **Criterio de modalidad:** una estación cumple el criterio de modalidad si se encuentra que al menos el 20% de los registros históricos pertenecen a años modales, o sea, años donde no se tuvo ocurrencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) que en Colombia se asocia al fenómeno de El Niño (sequía) y La Niña (lluvias) (Montealegre, 2007; Pabón, 2009; NOAA, 2016). Finalmente, de cumplirse dicha condición, se procedió a realizar el criterio de confiabilidad.

Por el contrario, si la estación analizada se encuentra inactiva, se procedió a analizar si el registro histórico fue superior a quince (15) años. De ser así, se aplicó el criterio de modalidad para ver si se aplica el criterio de confiabilidad o se rechaza la estación totalmente.

- **Criterio de confiabilidad:** el criterio de confiabilidad se aplicó en función de la disponibilidad de datos faltantes de la estación. Por lo tanto, se asumió que una estación es confiable si el número total de datos ausentes o faltantes no supera el 20%. De ser así, se procedió a rechazar la estación, dado que se asume que no tiene consistencia en el registro (Jiménez, 1992; Aparicio, 1982; Monsalve, 1995).

Finalmente, se obtuvo que si la estación supera cada uno de los criterios planteados, ésta es aceptada y por ende, se procede a realizar la estimación de datos faltantes aplicando el método de Proporciones Normales (Loaiza et al., 2014; Jiménez, 1992; Aparicio, 1982) y posteriormente el AED.

En la Figura 98 se relacionó de manera gráfica el esquema metodológico llevado a cabo para el análisis de la información en el sistema acuífero Cesar.

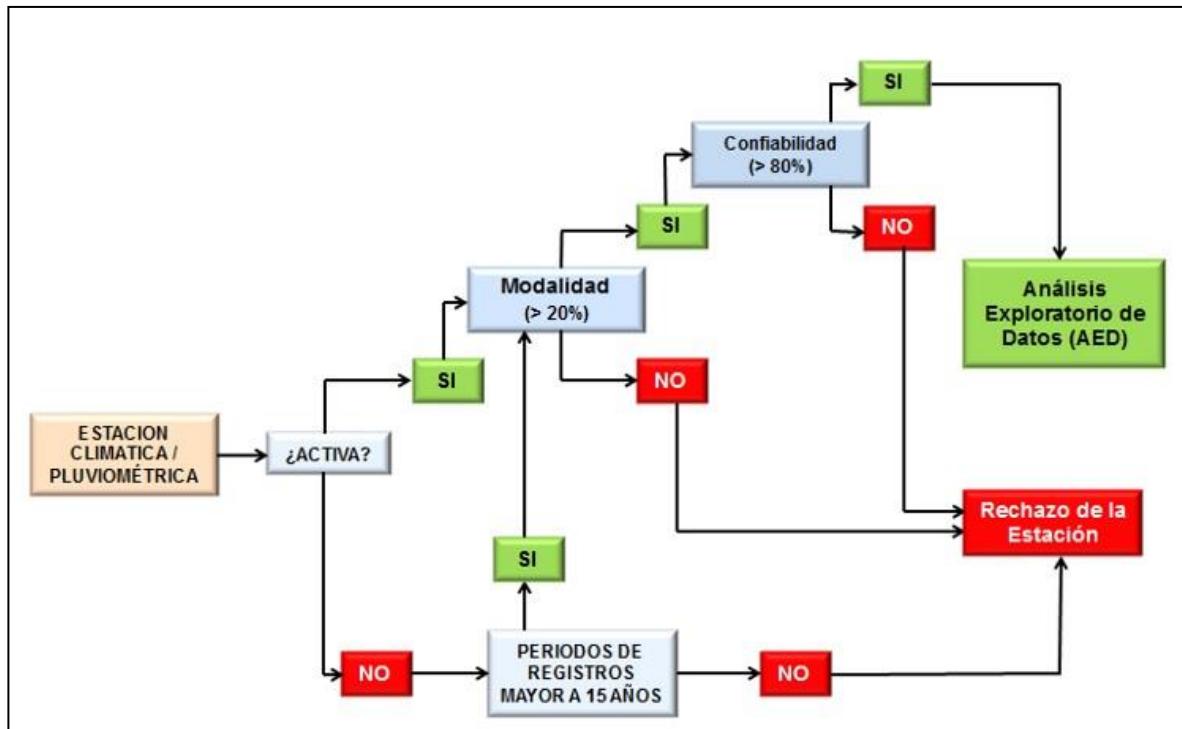


Figura 98. Esquema de proceso de selección de estaciones.

En la Tabla 15 se relacionaron las estaciones actualizadas y que pasaron el proceso de selección con los resultados finales de los criterios explicados anteriormente.

Tabla 15. Estaciones seleccionadas en la zona de estudio.

Estación	Tipo	(x)	(y)	Registro	No. Años	Activa	> 15 años	Criterio del estado de la estación	No. Años modales	Modalidad modal > 20%	Criterio modalidad	No. Total datos	No. Datos faltantes	%	Criterio de confiabilidad < 20%	Selección
Apto las Flores [25025090]	SP	1011728,2	1492144,1	1968 2016	49	ACT	SI	ACEPTA	32	65,3	ACEPTA	588	41	7,0	ACEPTA	SI
Astrea [25020220]	PM	1011487,7	1541540,7	1965 2016	52	ACT	SI	ACEPTA	33	63,5	ACEPTA	624	3	0,5	ACEPTA	SI
Batallón No. 6 Autom [29065120]	CP	1016392,4	1649099,5	S.I. S.I.	S.I.	ACT	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	NO
Cañaverales [15060080]	PM	1134792,0	1681711,0	1965 2016	52	ACT	SI	ACEPTA	33	63,5	ACEPTA	624	0	0	ACEPTA	SI
Centenario Hda. [28025090]	CO	1089074,4	1581166,9	1978 2016	39	ACT	SI	ACEPTA	27	69,2	ACEPTA	468	10	2,1	ACEPTA	SI
Chiriguana [25025250]	CO	1053179,5	1526984,9	1973 2015	43	ACT	SI	ACEPTA	28	65,1	ACEPTA	516	30	5,8	ACEPTA	SI
Col Agro Pailitas [25025330]	CP	1049204,5	1481984,6	1987 2016	30	ACT	SI	ACEPTA	20	66,7	ACEPTA	360	71	19,7	ACEPTA	SI
Difícil El Camp [25021250]	PM	999090,0	1587885,8	1956 2016	61	ACT	SI	ACEPTA	41	67,2	ACEPTA	732	1	0,1	ACEPTA	SI
El Difícil Autom [25025000]	CP	999090,0	1587885,8	S.I. S.I.	S.I.	ACT	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	NO
Fedearroz Autom [28035060]	CP	1090811,7	1649021,5	S.I. S.I.	S.I.	ACT	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	NO
Guatapuri Autom [28035070]	CP	1074940,4	1678687,9	S.I. S.I.	S.I.	ACT	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	NO
Guaymaral [28035040]	CO	1047156,8	1587135,9	1972 2016	45	ACT	SI	ACEPTA	28	62,2	ACEPTA	540	10	1,9	ACEPTA	SI
Hatico d los Indio [28010200]	PM	1105335,1	1692939,0	1970 2016	47	ACT	SI	ACEPTA	30	63,8	ACEPTA	564	37	6,6	ACEPTA	SI
La Loma Carbones del [28025130]	CP	1060758,7	1557920,7	S.I. S.I.	S.I.	ACT	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	NO
Manaure Autom [28015110]	CP	1118268,1	1638232,1	S.I. S.I.	S.I.	SUS	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	NO

Estación	Tipo	(x)	(y)	Registro		No. Años	Activa	> 15 años	Criterio del estado de la estación	No. Años modales	Modalidad modal > 20%	Criterio modalidad	No. Total datos	No. Datos faltantes	%	Criterio de confiabilidad < 20%	Selección
Primavera La [25020920]	PM	1072622,5	1511048,7	1972	2015	44	ACT	SI	ACEPTA	28	63,6	ACEPTA	528	22	4,2	ACEPTA	SI
Pto. Barco [16070010]	PM	1129821,9	1487012,0	1973	2016	44	ACT	SI	ACEPTA	28	63,6	ACEPTA	528	20	3,8	ACEPTA	SI
Rincón El [28025020]	CO	1103649,1	1627792,9	1965	2016	52	ACT	SI	ACEPTA	33	63,5	ACEPTA	624	9	1,4	ACEPTA	SI
San Roque Alertas [25021380]	PM	991664,0	1494945,1	1980	2016	37	ACT	SI	ACEPTA	25	67,6	ACEPTA	444	33	7,4	ACEPTA	SI
San Sebastián de [29060090]	PM	1051845,0	1659968,7	1974	2016	43	ACT	SI	ACEPTA	28	65,1	ACEPTA	516	3	0,6	ACEPTA	SI
Serranía del Perijá [28025120]	CP	1113068,3	1601016,4	S.I.	S.I.	S.I.	ACT	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	S.I.	S.I.	S.I.	NO ACEPTA	NO
Socomba [28025080]	CP	1091852,6	1563078,5	1972	2011	40	ACT	SI	ACEPTA	25	62,5	ACEPTA	480	89	18,5	ACEPTA	SI
Sta. Rosa de Lima [29060100]	PM	996661,1	1642170,4	1973	2016	44	ACT	SI	ACEPTA	28	63,6	ACEPTA	528	21	4,0	ACEPTA	SI
Urumita [28015070]	CO	1116139,5	1660467,7	1975	2016	42	ACT	SI	ACEPTA	28	66,7	ACEPTA	504	14	2,8	ACEPTA	SI
Villa Rosa [28035010]	CO	1058088,5	1618759,2	1968	2016	49	ACT	SI	ACEPTA	32	65,3	ACEPTA	588	29	4,9	ACEPTA	SI

En la Figura 99, las estaciones que pasaron el proceso de selección fueron espacializadas.

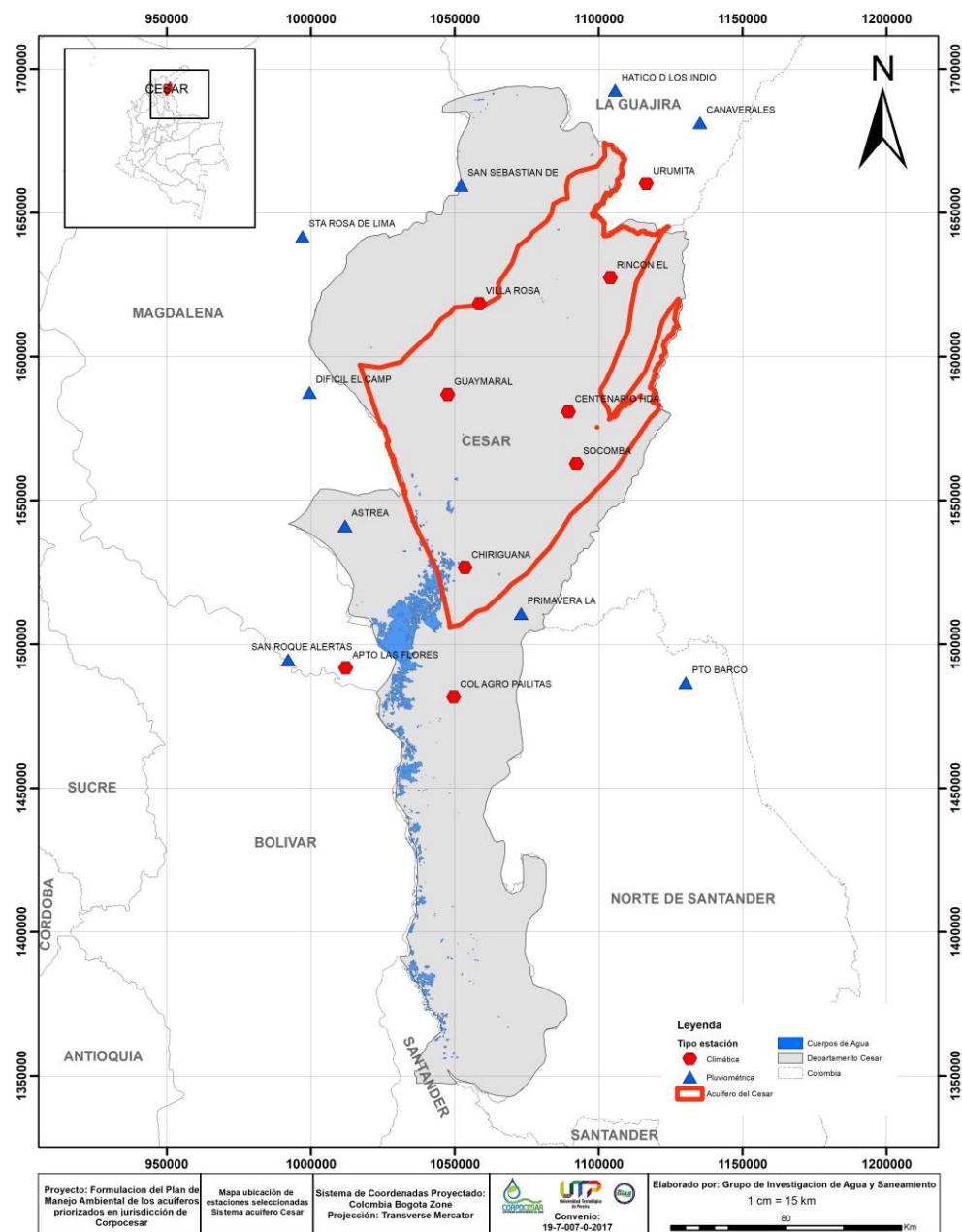


Figura 99. Mapa de localización de las estaciones seleccionadas.

2.5.3 Diagramas de Cajas

Los diagramas de Cajas son una representación gráfica que relaciona la dispersión de los registros de precipitación a escala mensual, asumiendo que cuando los datos de una estación presentan dispersión, se debe a registros fuera de un comportamiento normal, asumiendo éstos como datos atípicos. En el análisis de

oferta hídrica son utilizados para garantizar una menor dispersión de los registros de trabajo y reducir la incertidumbre de éstos para obtener una precipitación media confiable, y por ende, el caudal de oferta especialmente cuando la zona de estudio no cuenta con información o es muy escasa.

Para el sistema acuífero Cesar, los diagramas de cajas se utilizaron para determinar los valores de precipitación atípicos de cada una de las estaciones de trabajo, los cuales se determinaron aplicando la herramienta estadística MINITAB V. 17.0 (versión estudiantil). De los datos atípicos identificados por estación (Figura 100), se procedió a normalizar el registro de precipitación a partir de la eliminación del dato atípico y su estimación como dato faltante aplicando el método de Proporciones Normales (Jiménez, 1992; Montalegre, 2007), obteniendo como resultado los diagramas de cajas agrupados en la Figura 101, donde se asume que los registros se ubican dentro de un comportamiento promedio y ya pueden ser utilizados para procesar información relacionada con éstos.

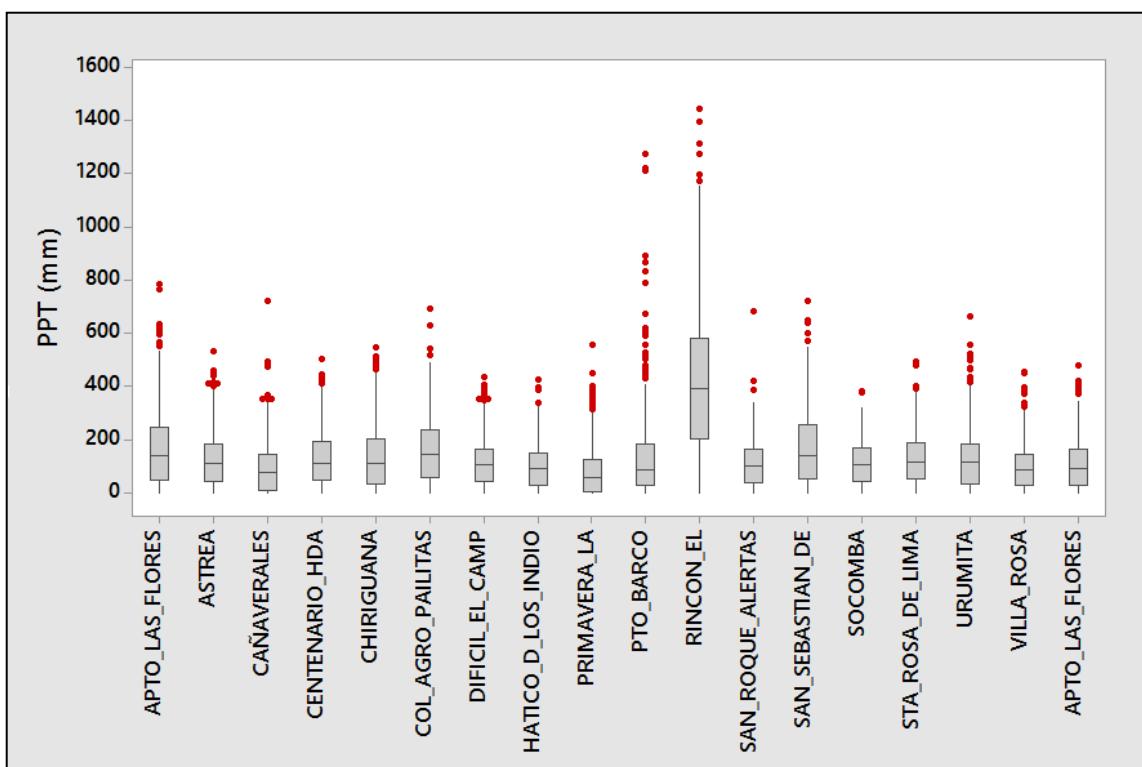


Figura 100. Diagramas de Caja con datos atípicos por Estación.

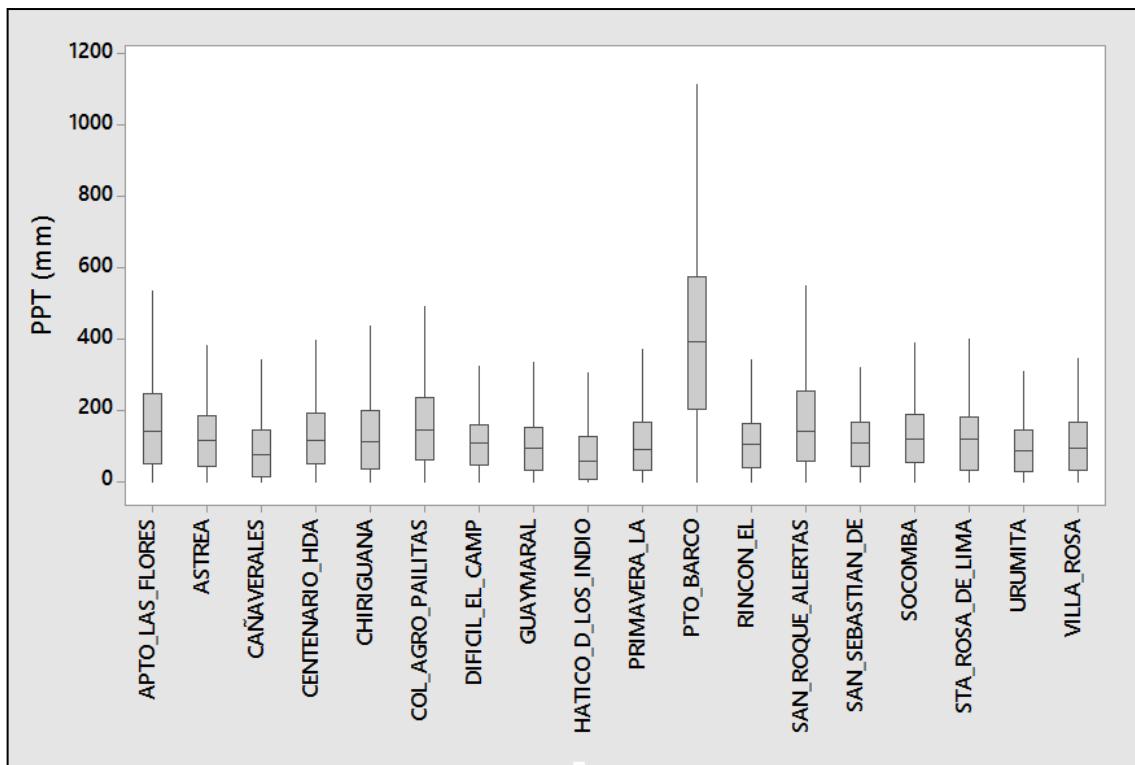


Figura 101. Diagramas de Caja calibrados por Estación.

2.5.4 Precipitación media

Una vez identificados los cambios o tendencias en el comportamiento de la precipitación de cada una de las estaciones por medio del AED gráfico y los ajustes sugeridos, se procedió a determinar la precipitación media para la zona de estudio aplicando el método de Isoyetas (Ecuación 2).

$$Pm = \frac{\sum_{j=1}^n Pj * Aj}{A} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde,

Aj = Área de la franja i – éSIMA determinada por isoyetas consecutivas (m^2).

Pj = Precipitación media de la franja iésima (mm/mes).

A = Área total de la cuenca o zona (m^2).

En la Figura 102 se relacionó el comportamiento de la precipitación media, la cual se caracteriza por tener un régimen bimodal propia de la región Caribe, con una temporada seca bien marcada a principio de año, y una segunda con volúmenes de precipitación cercanos a los 100 mm. La época de lluvias que se extiende desde Abril a Noviembre, se caracteriza por un régimen de lluvias abundantes. En esta época suelen presentarse los

denominados Ciclones Tropicales, Anticiclones subtropicales, ondas del este y colas de frentes, los cuales pueden aumentar el régimen de lluvias en todo el Caribe colombiano (IDEAM, 2014).

También se observó que los meses de Mayo (176,5 mm) y Octubre (204,8 mm) son los meses de mayor precipitación y los meses de Enero (13,9 mm) y Febrero (30,36 mm) los de menor precipitación.

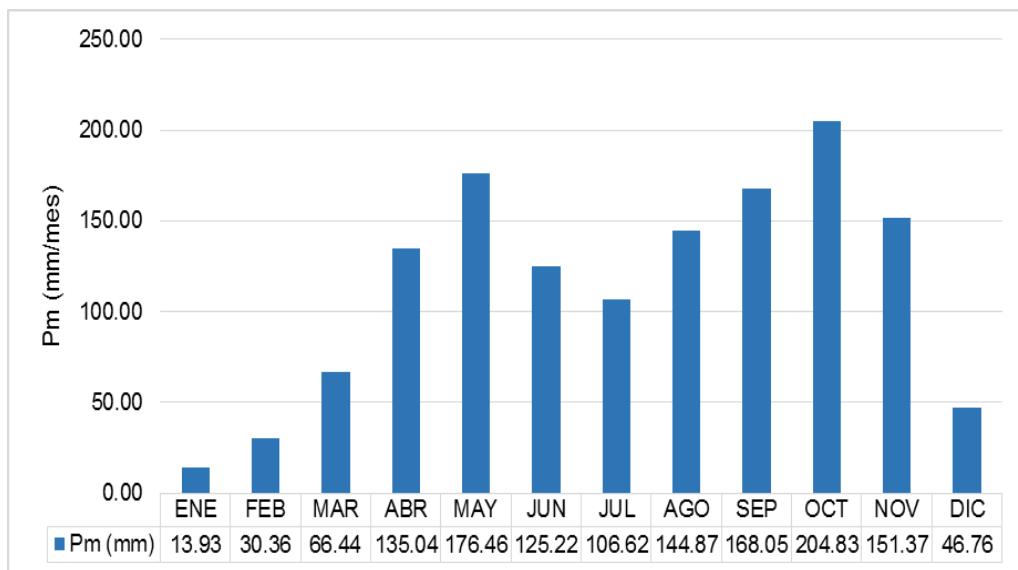


Figura 102. Precipitación media mensual sistema acuífero Cesar.

En la Figura 103 se presentó la distribución de la precipitación anual en el sistema acuífero Cesar, donde se observó que existe una mayor precipitación en la parte sur-este de la zona de estudio, con precipitaciones anuales que oscilan entre 1500 y 1600 mm. Mientras que hacia el norte de la zona de estudio, se presentan las precipitaciones anuales más bajas en un rango 1000 y 1200 mm. En la Figura 104 se muestra la distribución de la precipitación mensual, la cual tiende en general a no presentar una variación considerable. En cuanto a los cálculos de la recarga potencial, es posible que la mayor recarga se presente hacia el sur de la zona de estudio; y para el caso de la zona norte se presentaría todo lo contrario.

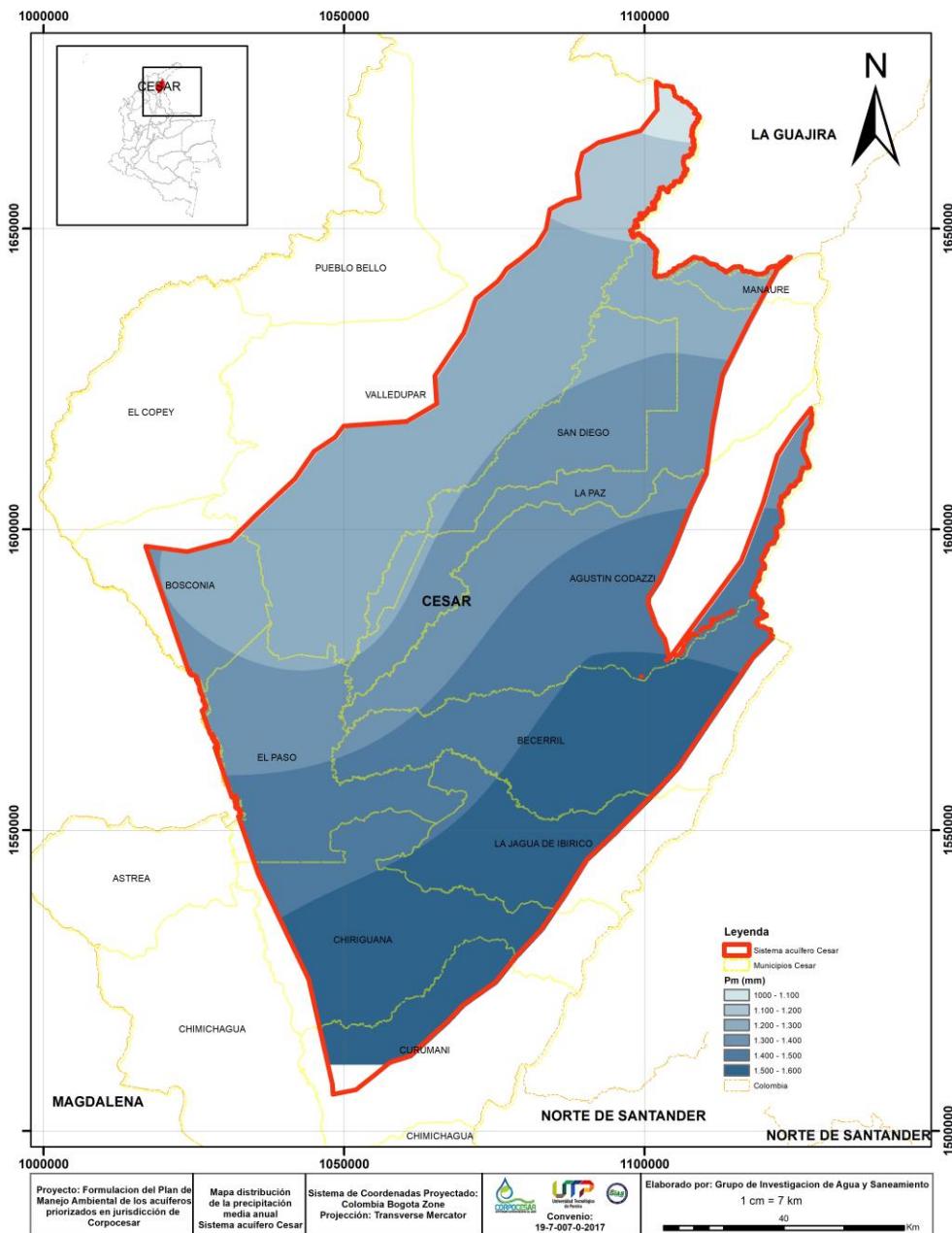


Figura 103. Distribución de la precipitación media anual en el sistema acuífero Cesar. Cambiar

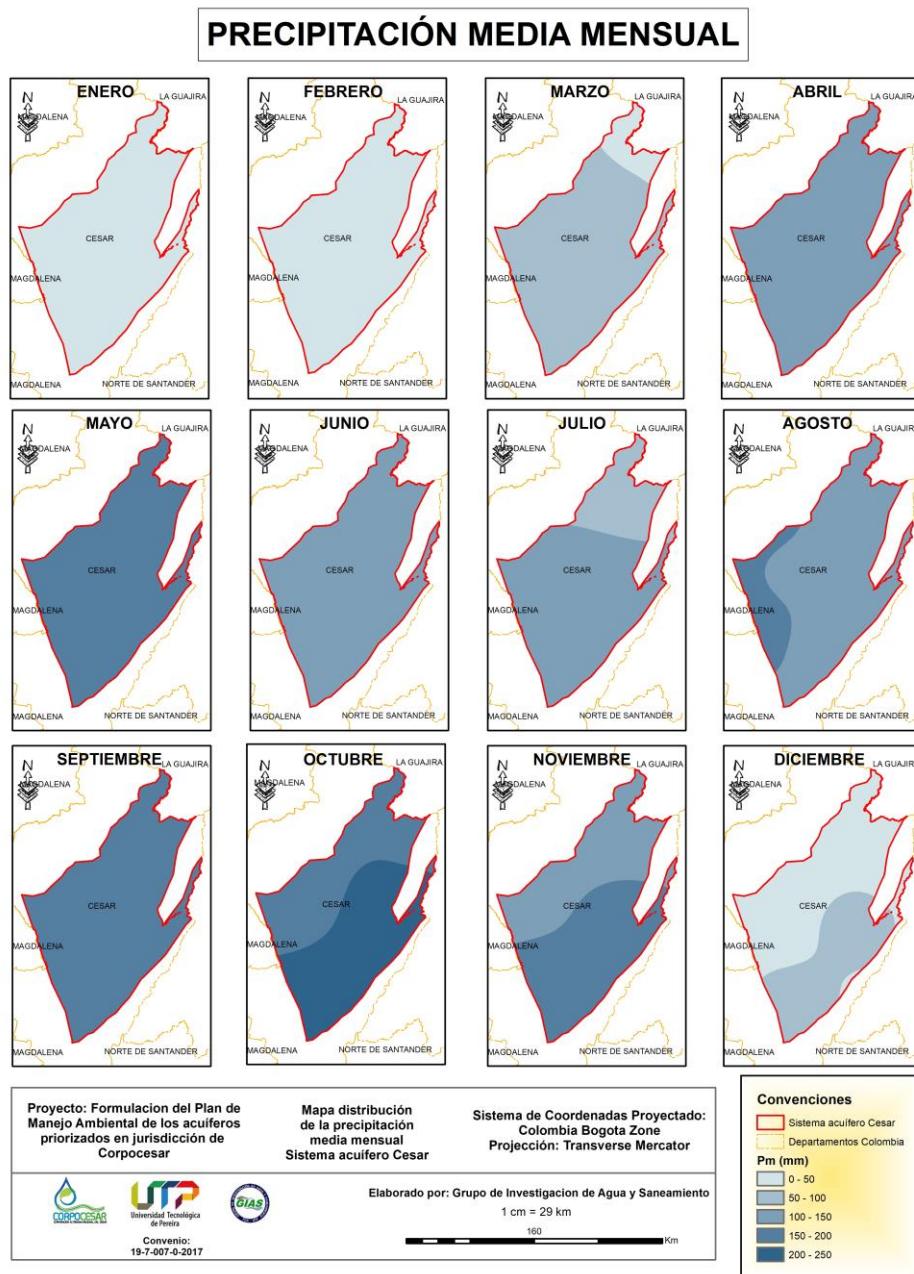


Figura 104. Distribución de la precipitación media mensual en el sistema acuífero Cesar.

2.5.5 Precipitación en ocurrencia fenómeno Niño y Niña

En la Figura 105 se observó que en la zona del sistema acuífero Cesar la precipitación en los periodos donde hay incidencia del fenómeno de El Niño, tiende a comportarse igual que en los períodos normales, sin embargo, existe una alta probabilidad de disminución en las precipitaciones durante los meses Junio, Julio y Agosto, comportamiento similar al estudiado por el IDEAM (2012) en la región Caribe, el cual se ve reflejado en este caso.

Para los períodos donde hay incidencia del fenómeno de La Niña, se observó un aumento de la precipitación durante todos los meses, exceptuando el mes de Enero y Abril, donde la precipitación media en ourrencia de El Niño es mayor a la precipitación media en ourrencia de La Niña. Este comportamiento se debe a que las probabilidades de que las precipitaciones estén ligeramente por debajo de lo normal van hasta un 60%, en los primeros cuatro meses del año y el resto tienden a comportarse con precipitaciones más altas a las normales (IDEAM, 2012). Bajo este escenario, se espera que la recarga aumente durante algunos períodos (días o semanas) de los meses secos.

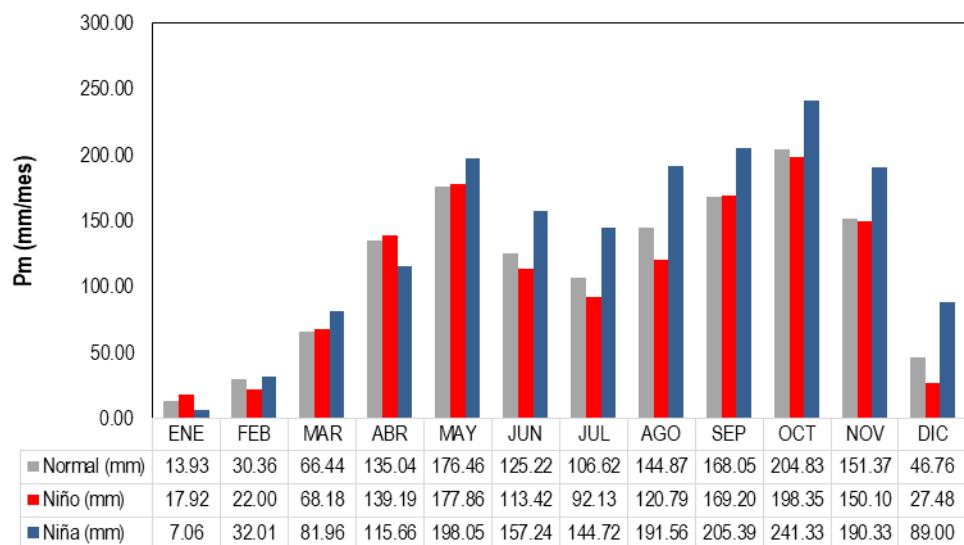


Figura 105. Precipitación media bajo ourrencia de períodos de El Niño y La Niña.

2.5.6 Evapotranspiración media

La evapotranspiración hace referencia al retorno del agua a la atmósfera por medio de dos procesos que se presencian de manera simultánea (la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación establecida en la zona de estudio) y se asume como el principal parámetro de pérdida de cantidad de lluvia disponible dentro del balance hídrico superficial (Jiménez, 1992; Aparicio, 1982; FAO, 2006a). Los factores que afectan o inciden en su comportamiento en una zona de estudio son el tipo de cultivo, el desarrollo del follaje, el estado y manejo de la vegetación. De igual manera, también tiene incidencia la temperatura, la altitud, el contenido de humedad del suelo y la habilidad de éste para que el agua circule a la zona radicular efectiva de las plantas.

En el cálculo de la recarga potencial el conocimiento de la evapotranspiración permite obtener un conocimiento más aproximado del balance hídrico local en la zona de estudio. Para efectos de análisis del presente documento y para una mejor interpretación conceptual, se definió la evapotranspiración como el concepto que permite evaluar la demanda de evaporación de la atmósfera, sin importar la clase y estado de la vegetación y las prácticas de manejo. A su vez, la evapotranspiración potencial (ETP) se definió como la cantidad de agua evaporada desde el suelo y la transpiración de las plantas, cuando se presentan las

condiciones actuales de humedad del suelo y las plantas tienen su real desarrollo fisiológico y condición sanitaria real (Jiménez, 1992; Trezza, 2006).

Se estimó la evapotranspiración media potencial, el cálculo se realizó a escala mensual, aplicando el método de Penman – Monteith relacionado en la Ecuación 3, debido a que tiene en cuenta un mayor número de registros climáticos y además contempla todas las variables que afectan de manera directa esta variable (MAVDT, 2004; Jiménez, 1992).

$$ETP = \frac{R_n \Delta + \left[\frac{\rho * c_p * \delta e}{r_a} \right]}{\lambda * \left[\Delta + \gamma * \left(1 + \left(\frac{r_s}{r_a} \right) \right) \right]} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde,

ETP = Evapotranspiración media (mm)

R_n = Radiación neta (W/m^2)

Δ =Pendiente de la curva de presión de vapor a la temperatura media del aire (kPa/C°).

ρ =Densidad del aire a presión constante (kg/m^3) Cambiar

c_p = Capacidad térmica del aire húmedo (J/kg/C°)

δe = Diferencia entre la presión de vapor saturante e_s (kPa) y la presión de vapor efectiva en el aire e_a (kPa); es decir:

$$\delta e = e_s - e_a$$

r_a = Resistencia aerodinámica (s/m).

λ = Calor latente de vaporización del agua (J/kg).

La curva de comportamiento de este componente se presenta en la Figura 106 elaborada a partir de la aplicación de la herramienta CROPWAT 8.0, donde se observa que ésta oscila en promedio entre 152,3 y 197,4 mm en los meses de Noviembre (menor evapotranspiración) y Marzo (mayor evapotranspiración), y con tendencia a ser mayor en la parte media de la zona de estudio.

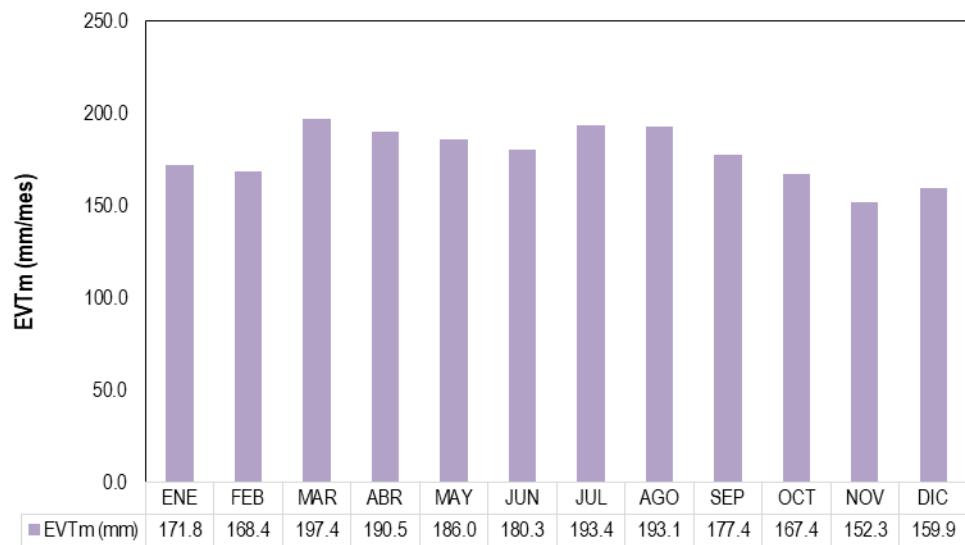


Figura 106. Evapotranspiración media sistema acuífero Cesar.

En la Figura 107 se relacionó la distribución de la evapotranspiración para la zona de estudio.

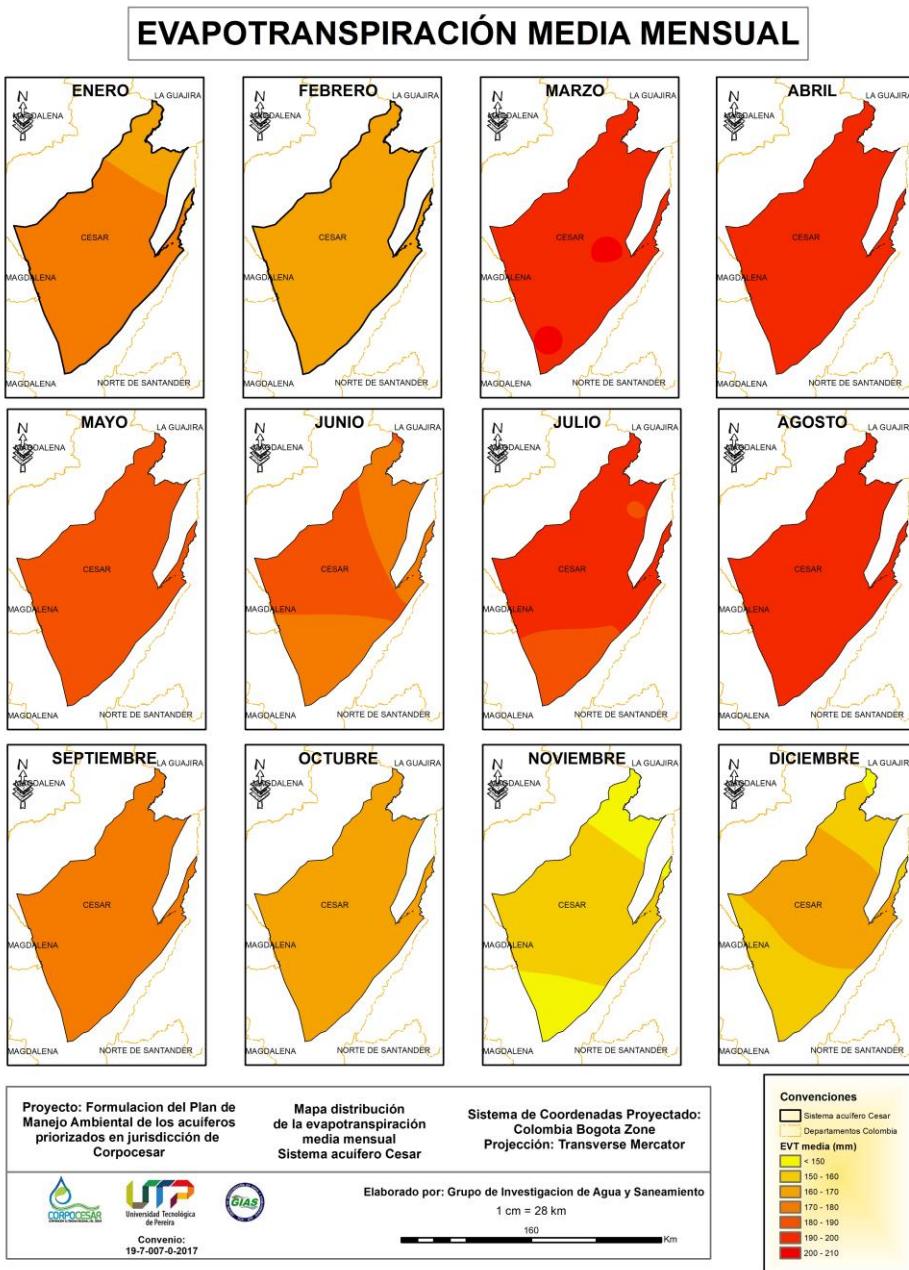


Figura 107. Distribución de la evapotranspiración media mensual.

2.5.7 Evapotranspiración potencial respecto al uso del suelo

El cálculo de la evapotranspiración potencial con respecto al uso del suelo se realizó a partir de la evapotranspiración media potencial y el coeficiente de cultivo (Kc) con base en los usos de suelo de la zona de estudio CORINE Land Cover para Colombia, aplicando la Ecuación 4.

$$ETV = Kc * ETP$$

(Ec. 4)

Donde,

ETV: Evapotranspiración respecto al uso del suelo (mm).

Kc: Coeficiente del cultivo (adm).

ETP: Evapotranspiración potencial (mm).

De igual manera, con base en los usos de suelo identificados en la zona de estudio (Tabla 16), se estimó la evapotranspiración, asumiendo un coeficiente de cultivo medio ponderado de (Kc: 1.07).

Tabla 16. Cálculo de Kc

Cobertura	Area (Ha)	Kc	
		Kc	Kci
Aeropuertos	102.60	1.00	0.00
Afloramientos rocosos	393.41	1.00	0.00
Arbustal denso	131940.00	1.10	0.17
Arroz	5711.50	1.00	0.01
Bosque Denso	12432.89	1.20	0.02
Bosque de galería y ripario	18408.89	1.10	0.02
Bosque Fragmentado	15682.58	1.10	0.02
Café	1679.66	1.00	0.00
Caña panelera	2244.31	1.00	0.00
Cuerpos de agua artificiales	25.56	1.00	0.00
Estanques para acuicultura marina	128.38	1.00	0.00
Herbazal denso	18030.11	1.10	0.02
Lagunas, lagos y cienagas naturales	2048.93	1.00	0.00
Mosaico de cultivos	6384.01	1.00	0.01
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	39127.94	1.00	0.05
Mosaico de pastos con espacios naturales	51344.68	1.00	0.06
Mosaico de pastos y cultivos	57758.56	1.00	0.07
Nube	2212.78		
Obras hidráulicas	49.54	1.00	0.00
Otros cultivos permanentes arbustivos	3805.94	1.00	0.00
Otros cultivos transitorios	8197.21	1.00	0.01
Palma de aceite	9217.31	1.00	0.01
Pastos arbolados	37838.41	1.10	0.05
Pastos enmalezados	95069.18	1.10	0.12
Pastos limpios	285833.13	1.10	0.37
Plantación forestal	2427.45	1.00	0.00
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	113.58	1.00	0.00
Ríos	1233.63	1.00	0.00

Cobertura	Area (Ha)	Kc	
		Kc	Kci
Tejido urbano continuo	5544.52	1.00	0.01
Tejido urbano discontinuo	197.54	1.00	0.00
Tierras desnudas y degradadas	16527.70	1.00	0.02
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	1137.61	1.00	0.00
Vegetación secundaria o en transición	5995.20	1.00	0.01
Zonas de extracción minera	6948.15	1.00	0.01
Zonas Pantanosas	10462.71	1.00	0.01
Total	856255.62	Total	1.07

Fuente: Adaptado de FAO, (2006a)

Por su parte, en la Tabla 17 se observa que los meses de mayor evapotranspiración corresponden a los meses de marzo (211.2 mm) y julio (206.9 mm), y de menor evapotranspiración corresponden a diciembre (171.1 mm) y noviembre (162.9 mm).

Tabla 17. Evapotranspiración potencial media mensual, respecto al uso del suelo (mm)

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
183.87	180.16	211.24	203.86	199.03	192.96	206.90	206.63	189.81	179.13	162.93	171.13

2.5.8 Retención (S)

La retención representa el valor o lámina de precipitación que se retiene por parte de cobertura vegetal o usos de suelo establecidos en la zona de estudio a través del número de curva CN utilizando la Ecuación 5 (SCS, 1968).

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde,

S= Retención (mm).

CN= Número de curva de escorrentía (adimensional).

Con base en los usos de suelo identificados en la zona de estudio de acuerdo a la metodología CORINE Land Cover para Colombia (Tabla 18), se estimó la retención, asumiendo un valor ponderado de (S: 295.19).

Tabla 18. Cálculo de S

Cobertura	Area (Ha)	CN	S	
			S	Si
Aeropuertos	102.60	90	28.22	0.003
Afloramientos rocosos	393.41	97	7.86	0.004
Arbustal denso	131940.00	65	136.77	21.075
Arroz	5711.50	74	89.24	0.595
Bosque Denso	12432.89	63	149.17	2.166

Cobertura	Area (Ha)	CN	S	
			S	Si
Bosque de galeria y ripario	18408.89	63	149.17	3.207
Bosque Fragmentado	15682.58	63	149.17	2.732
Café	1679.66	78	71.64	0.141
Caña panelera	2244.31	77	75.87	0.199
Cuerpos de agua artificiales	25.56	95	13.37	0.000
Estanques para acuicultura marina	128.38	95	13.37	0.002
Herbazal denso	18030.11	76	80.21	1.689
Lagunas, lagos y cienagas naturales	2048.93	95	13.37	0.032
Mosaico de cultivos	6384.01	74	89.24	0.665
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	39127.94	58	183.93	8.405
Mosaico de pastos con espacios naturales	51344.68	60	169.33	10.154
Mosaico de pastos y cultivos	57758.56	70	108.86	7.343
Nube	2212.78			
Obras hidraulicas	49.54	82	55.76	0.003
Otros cultivos permanentes arbustivos	3805.94	74	89.24	0.397
Otros cultivos transitorios	8197.21	74	89.24	0.854
Palma de aceite	9217.31	60	169.33	1.823
Pastos arbolados	37838.41	35	471.71	20.845
Pastos enmalezados	95069.18	35	471.71	52.374
Pastos limpios	285833.13	35	471.71	157.466
Plantacion forestal	2427.45	77	75.87	0.215
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	113.58	82	55.76	0.007
Rios	1233.63	90	28.22	0.041
Tejido urbano continuo	5544.52	74	89.24	0.578
Tejido urbano discontinuo	197.54	59	176.51	0.041
Tierras desnudas y degradadas	16527.70	86	41.35	0.798
Vegetacion acuatica sobre cuerpos de agua	1137.61	93	19.12	0.025
Vegetacion secundaria o en transicion	5995.20	74	89.24	0.625
Zonas de extraccion minera	6948.15	82	55.76	0.452
Zonas Pantanosas	10462.71	93	19.12	0.234
Total	856255.62		Total	295.19

2.5.9 Escorrentía (E)

Es la lámina de agua que se estima que se infiltra o se escurre superficialmente, la cual va en función de la precipitación y se calcula de acuerdo a la expresión de la Ecuación 6. Se aplicó el método del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS,1968), el cual estima la escorrentía superficial de una zona de estudio a partir de registros de precipitación (horaria, diaria o mensual), la Retención (S) y el Número de Curva de Escorrentía (CN).

$$E = \frac{(P - (0.2 * S))^2}{p + (0.8 * S)} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde,

E= Escorrentía (mm).

P=Precipitación media (mm).

S=Retención (mm).

Los cálculos de la escorrentía superficial generada por la lluvia mensual se relacionan en la Tabla 18, también se realizó el análisis para periodos NIÑO y NIÑA.

Con base en los resultados la Tabla 19 se observa que los meses de mayor escorrentía son Mayo (33.42 mm) y Octubre (48.20 mm) y los de menor escorrentía corresponden a Marzo (0.18 mm) y Diciembre (0.53 mm), los cuales hacen parte de los períodos de lluvias abundantes que se extiende desde abril a noviembre y períodos secos, respectivamente. Por lo tanto, se deduce que para el cálculo de la escorrentía la aplicación de este método es confiable, ya que permite visualizar que los períodos húmedos coinciden con los meses de alta escorrentía, al igual que los períodos secos coinciden con los meses de baja escorrentía.

Con respecto al análisis para períodos NIÑO, los meses de mayor escorrentía corresponden a Mayo (34.10 mm) y Octubre (44.67 mm), y los de menor escorrentía son Marzo (0.27 mm) y Julio (3.34 mm). Para períodos NIÑA los meses de mayor escorrentía corresponden a Septiembre (48.51 mm) y Octubre (69.60 mm), y los de menor escorrentía son Febrero (2.72 mm) y Marzo (1.65 mm).

De igual manera a lo analizado en el método SCS contemplando este escenario, se determina que sigue existiendo una relación directa entre la precipitación y la escorrentía, siendo ésta mayor ante un aumento de la precipitación, en la que la lámina de recarga estará condicionada a factores de velocidad de infiltración y humedad de suelo.

Tabla 19. Escorrentía mensual general, Períodos NIÑO y NIÑA

Escorrentía (mm)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Mensual Multianual general	8.14	3.09	0.18	15.56	33.42	12.12	6.61	19.34	29.40	48.20	22.00	0.53
Períodos NIÑO	6.65	5.31	0.27	17.12	34.10	8.46	3.34	10.68	29.94	44.67	21.47	3.78
Períodos NIÑA	11.11	2.72	1.65	9.11	44.50	24.52	19.27	41.06	48.51	69.60	40.42	2.76

En la Figura 108 se relaciona el comportamiento medio mensual de la escorrentía a partir de este método.

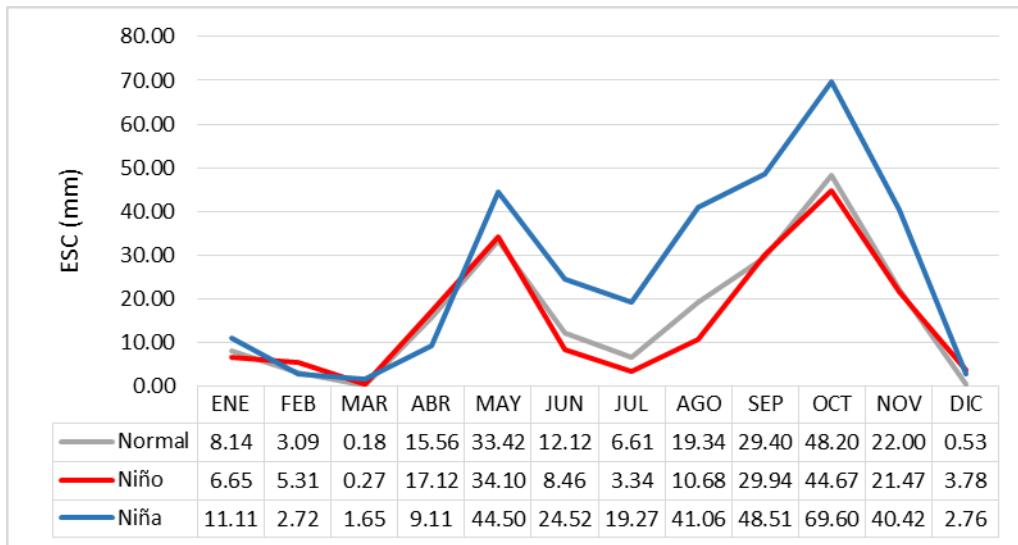


Figura 108. Comportamiento de la escorrentía media mensual

2.5.10 Cambio de humedad en el suelo

El suelo es capaz de almacenar una cantidad limitada de agua, y de ésta, solo una parte es utilizada por las plantas. El cambio en el almacenamiento en la humedad del suelo constituye la diferencia entre la cantidad de agua almacenada al final del período y la cantidad de agua almacenada al inicio dentro del sistema. Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial pero esta cambia a través de los días debido a los procesos climáticos como la precipitación, evapotranspiración, precipitación que infiltra, etc., por lo tanto, la humedad al final del mes será diferente.

El valor resultante de la diferencia entre dichas humedades es a lo que se le denomina cambio en el almacenamiento de humedad en el suelo o zona no saturada (ΔH), el cual se puede determinar a través de la siguiente ecuación:

$$\Delta H = HS_i - HS_f \quad (\text{Ec. 7})$$

Dónde,

ΔH = cambio de humedad en el suelo (mm).

HS_i = humedad del suelo al inicio del mes (mm).

HS_f = humedad del suelo al final del mes (mm).

El conocimiento de la humedad del suelo proporciona información básica para conocer el comportamiento hidrológico a nivel de la superficie del suelo, tanto a nivel local como regional. A nivel global, en un escenario de cambio climático y variabilidad climática extrema, la humedad del suelo resulta una variable clave debido a su dependencia de la temperatura y la precipitación y a su importancia en la dinámica hidrológica (Gutiérrez, 2012).

Para determinar el cambio de almacenamiento de la humedad del suelo, a través de un balance en la columna de suelo, se aplica la siguiente Ecuación 8 (Resolución 865 de 2004):

$$P - ESC - ETR = \Delta H \quad (\text{Ec. 8})$$

Dónde,

P= precipitación (mm/mes).

ESC= escorrentía superficial (mm/mes).

ETR= evapotranspiración real (mm/mes).

ΔH = cambio de humedad en el suelo (mm/mes).

Este método es el más general y su dificultad es obtener los registros de datos necesarios para lograr determinar el valor requerido. En este caso, ya están calculados los valores de P y ESC, mientras que la ETR se calculó usando la ecuación de Turc, de tal manera que se pueda despejar y conocer el valor del cambio de humedad en el suelo.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (\text{Ec. 9})$$

Dónde,

ETR= evapotranspiración real (mm/año).

P= precipitación media (mm/año).

T= temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$).

- Para $P/L > 0,316$; donde $L = 300 + 25T + 0,05T^3$ (L es una función que depende de la temperatura).
- Para $P/L < 0,316$; $ETR = P$.

En la Tabla 20 se muestra el cambio de humedad del suelo para el acuífero.

Tabla 20. Cambio en la humedad del suelo

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ΔH Normal	-8.14	-3.09	-0.18	-15.56	-33.42	-12.12	-6.61	-19.34	-29.40	-48.20	-22.00	-0.53
ΔH Niño	-6.65	-5.31	-0.27	-17.12	-34.10	-8.46	-3.34	-10.68	-29.94	-44.67	-21.47	-3.78
ΔH Niña	-11.11	-2.72	-1.65	-9.11	-44.50	-24.52	-19.27	-41.06	-48.51	-69.60	-40.42	-2.76

2.5.11 Recarga potencial por precipitación

La recarga potencial hace referencia al agua del suelo que se filtra por debajo de la zona de las raíces y que puede perderse más tarde por un aumento en la profundidad de las raíces de la vegetación, por ascenso

capilar, o transporte de vapor hacia arriba, pudiendo o no alcanzar la capa freática (Scanlon et al., 2002). La recarga potencial se almacena en la zona vadosa a presiones negativas (succiones) y no está disponible para la explotación. Para el cálculo de la recarga (Rp), se utiliza el modelo teórico desarrollado en la guía metodológica (MADS, 2014?), aplicando la siguiente ecuación de balance:

$$P = ETP + ESC + Rp \pm \Delta H \quad (\text{Ec. 10})$$

Despejando Rp, que es nuestra variable de interés, la ecuación queda:

$$Rp = P - ETP - ESC \pm \Delta H \quad (\text{Ec. 11})$$

Dónde,

Rp= recarga potencial (mm/mes).

P= precipitación media (mm/mes).

ETP= evapotranspiración potencial (mm/mes).

ESC = escorrentía (mm/mes).

ΔH = cambio de humedad en el suelo (mm/mes).

En la Tabla 21 se muestra el cálculo de recarga potencial para el sistema acuífero Cesar.

Tabla 21. Cálculo de la recarga potencial para el sistema acuífero Cesar

VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Rp Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25.7	0	0
Rp Niño	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19.2	0	0
Rp Niña	0	0	0	0	0	0	0	0	15.58	62.20	27.40	0

De acuerdo a los resultados de la Tabla 20, se puede expresar que en la zona del sistema acuífero Cesar no se presenta recarga potencial por precipitación, exceptuando el mes de octubre, donde se presenta la mayor precipitación en el año para períodos normales y durante la influencia del fenómeno de El Niño. Solo en el caso de influencia del fenómeno de La Niña, se puede presentar recarga en septiembre, octubre y noviembre.

En las Figuras 109, 110 y 111, se presenta los balances de manera gráfica para períodos Normal, Niño y Niña.

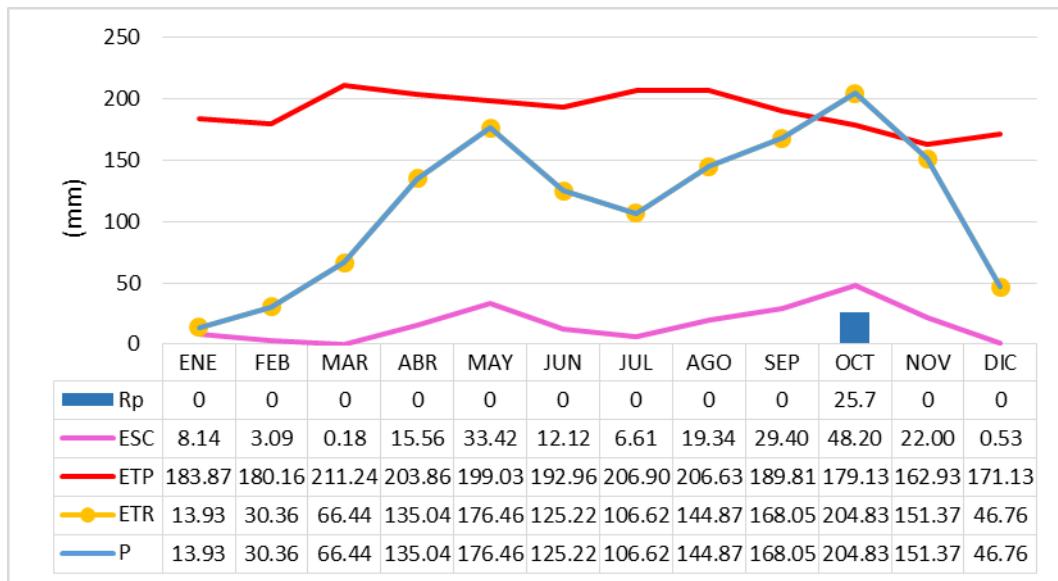


Figura 109. Balance hídrico periodo Normal

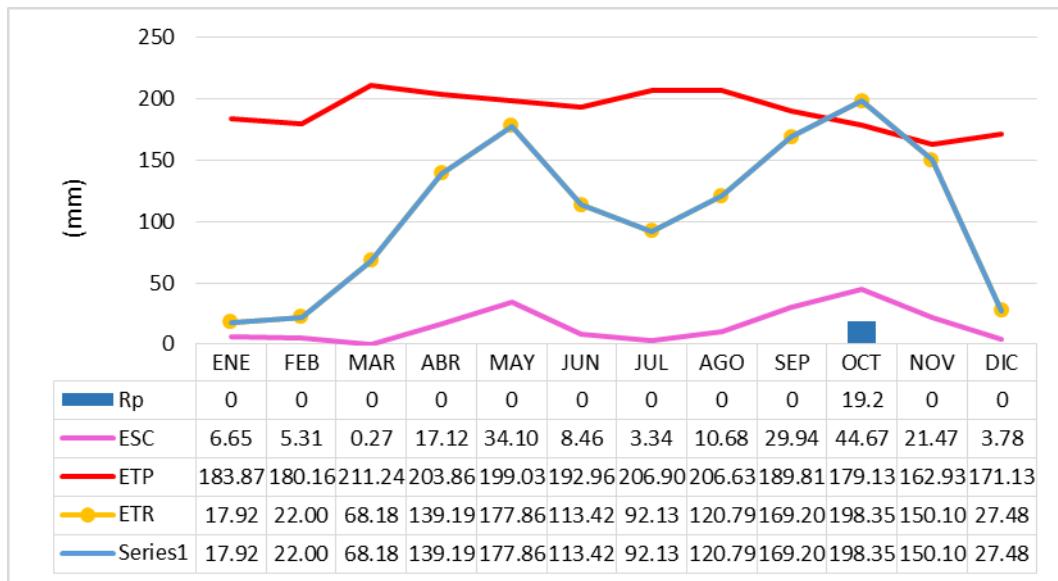


Figura 110. Balance hídrico periodo Niño

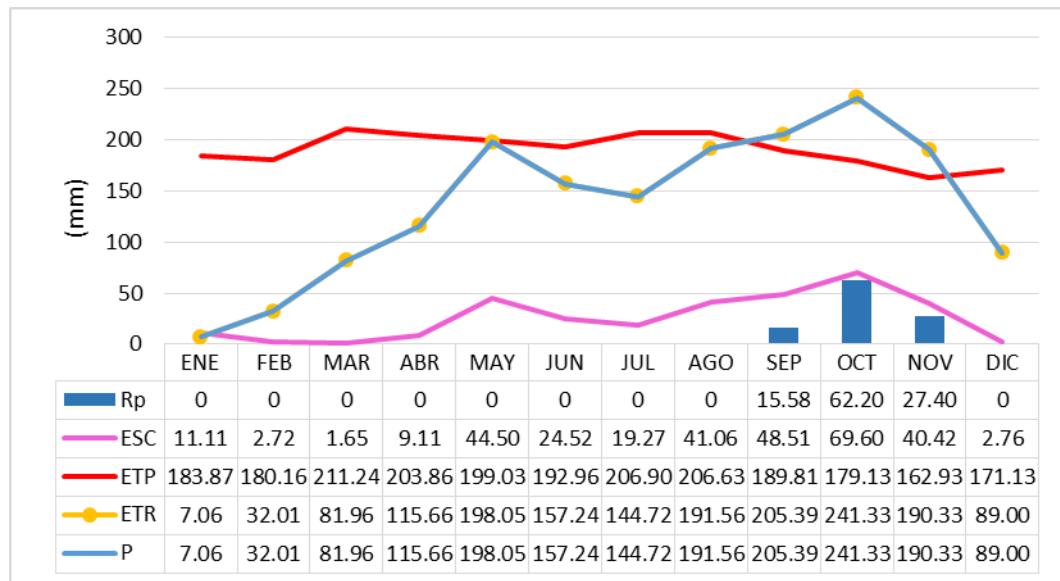


Figura 111. Balance hídrico periodo Niña

2.5.12 Revisión de expresiones empíricas para estimar la recarga

Algunos autores han presentado expresiones empíricas para estimar la recarga a partir de la precipitación. Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988) presentan la siguiente expresión (Ecuación 12):

$$r = 1.35(p - 14)^{0.5} \quad (\text{Ec. 12})$$

Dónde,

r es la recarga (pulg/año)

p es la precipitación (pulg/año).

Por su parte Sehgal (1973) presenta la siguiente ecuación:

$$r = 2.5(p - 16)^{0.5} \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde,

r es la recarga (pulg/año)

p es la precipitación (pulg/año).

Finalmente, Turc (1954) presenta la ecuación 14:

$$r = p \left[1 - \left(0.9 + \frac{p^2}{L^2} \right)^{-0.5} \right], \quad L = 300 + 25T + 0.05T^2 \quad (\text{Ec. 14})$$

Dónde,

r es la recarga (mm/año).

p es la precipitación (mm/año).

T la temperatura media anual ($^{\circ}$ C).

En la Tabla 22 se presentan los resultados de las estimaciones mediante las formulas mencionadas.

Tabla 22. Estimaciones de la recarga media anual [mm/año] en el área de estudio.

Periodo	P anual [mm]	Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988)	Sehgal (1973)	Turc (1954)
Normal	1369.95	49.71	91.99	523.04
Niño	1296.62	48.35	89.46	466.16
Niña	1654.31	54.68	101.19	757.56

La recarga obtenida con la fórmula de Cheeturvedi y Sehgal representa aproximadamente entre el 3 y 7% de la precipitación anual en cada año. Así mismo, los valores de recarga obtenidos con la expresión de Turc representan el entre el 35 y 45% de la precipitación respectivamente. La recarga obtenida mediante las ecuaciones de Sehgal y Turc están sobreestimadas cuando se compara con los resultados obtenidos en la estimación de recarga potencial por precipitación (balance hídrico); mientras que los valores calculados a partir de la expresión de Cheeturvedi puede llegar a ser mas cercana cuando se compara con los resultados obtenidos en la estimación de recarga potencial por precipitación (balance hídrico). A la luz de ese modelo los resultados obtenidos mediante las ecuaciones no son representativos de toda el área de estudio.

2.5.13 Conclusiones del análisis hidrológico

La recarga potencial calculada por el método de balance hídrico arrojo un valor de 25.7 mm para el mes de octubre, mes cuya precipitación fue mayor a la evapotranspiración; se debe tener en cuenta que este cálculo no representa una distribución espacial de la zona de estudio.

Los balances hídricos para el cálculo de la recarga potencial, se pueden ir ajustando a medida que se cuente con información más detallada de la zona, especialmente propiedades de la zona no saturada, como conocer en detalle el tipo de suelo, texturas e información de pruebas de infiltración.

A pesar que el balance hídrico para el cálculo de la recarga potencial es un método válido, dado a la falta de información disponible de las características propias del acuífero, estos deben ser validados en campo.

Por lo anterior, se recomienda definir los límites del acuífero a través de aforos diferenciales, estudios de hidrogramas y medición de niveles freáticos, con campañas de levantamiento de información más frecuentes que permitan mejorar las series históricas y calcular la Recarga Real del acuífero con la aplicación de otros métodos.

2.6 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

La hidrogeoquímica permite determinar el origen, los procesos y la evolución en la composición del agua almacenada en las unidades hidrogeológicas, es una herramienta básica para conocer la calidad natural del agua para los diferentes usos, además aporta información valiosa para alimentar los modelos hidrogeológicos conceptuales puesto que permite identificar zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos), origen del agua subterránea, tiempo de residencia, identificación de ocurrencias de aguas termales y minerales, entre otros.

Las propiedades físicas y la composición química del agua, se definen a partir de los análisis de muestras recolectadas en Puntos de Agua Subterránea (PAS) siguiendo los protocolos de recolección, preservación y transporte, determinados por el IDEAM para garantizar que las muestras lleguen a los laboratorios en condiciones adecuadas para su análisis.

El agua subterránea en el departamento del Cesar es un recurso estratégico para el desarrollo de diversas actividades socioeconómicas y productivas, dada la reducción en la oferta hídrica superficial debido al cambio en el régimen climático en la parte norte del país (Corpocesar y Universidad del Magdalena, 2011). Por lo anterior, la evaluación de los parámetros hidrogeoquímicos y su distribución en la zona, aporta información valiosa sobre los procesos físico-químicos que afectan la calidad, de igual forma se pueden identificar fuentes potenciales de contaminación con las cuales la Autoridad Ambiental podrá establecer medidas correctivas para una Gestión adecuada del recurso.

Para la caracterización hidrogeoquímica y determinación de la calidad del agua del sistema acuífero Cesar se revisaron las fuentes de información secundaria tales como informes diagnósticos, los inventarios de PAS concesionados y los resultados de campañas de monitoreo a piezómetros hechos por la Corporación o por particulares. De los informes técnicos se encontraron solamente tres con información relevante para el tema: *Formulación del Modelo Hidrogeológico e Hidrológico, Conceptual y Numérico, en el área donde se ubican proyectos de explotación de carbón* (Corpocesar y Universidad del Magdalena, 2011); *Evaluación del agua subterránea en el departamento del Cesar* (INGEOMINAS, 1995); *Aprovechamiento y protección integral del agua subterránea en las ecorregiones de los Ríos Cesar y Magdalena, departamento del Cesar* (Corpocesar e IDEAM, 2006). Sin embargo, de los citados trabajos solamente el elaborado por la Corpocesar y la Universidad del Magdalena en el año 2011 cuenta con datos suficientes para elaborar el análisis hidrogeoquímico y de calidad de la zona centro del sistema acuífero Cesar. La información contenida en los otros dos estudios, especialmente la que se refiere a la clasificación química del agua fue usada como referencia para el análisis de los resultados. Adicionalmente, dado que los estudios en mención fueron realizados hace más de 10 años, los datos allí consignados no son representativos de la calidad del agua del acuífero en la actualidad ya que, debido a factores antropogénicos (aumento en la densidad poblacional, establecimiento de cultivos con alta demanda de agroquímicos, intensificación de la actividad minera, entre otros) la calidad del agua subterránea puede presentar cambios con el tiempo. Sin embargo se recogen algunas conclusiones a las que llegaron los investigadores en esas fechas.

Adicionalmente en el tema de condiciones fisicoquímicas y microbiológicas se encontraron 2 trabajos de grado elaborados en el año 2009 y denominados *Caracterización Microbiológica y Fisicoquímica de Aguas*

Subterráneas de los Municipios de La Paz y San Diego, y Microbiología de las Aguas Subterráneas en la Región Sur del Municipio de Valledupar. Las conclusiones de dichos estudios fueron recogidas en las conclusiones del presente capítulo.

Con respecto a los inventarios de PAS concesionados se encontró que éstos no cuentan con mediciones de iones mayoritarios para efectos del análisis hidrogeoquímico y de calidad, es decir, que los datos para el análisis químico son insuficientes. Así mismo, las campañas de monitoreo a piezómetros solo reportan mediciones de parámetros in situ (pH, Temperatura y Conductividad) y por lo tanto no pueden ser usados para efectos del presente análisis.

Como resultado del análisis de la información disponible para el acuífero objeto de estudio, se definió hacer la caracterización hidrogeoquímica y la determinación de la calidad del agua a partir de la información secundaria proveniente del estudio de realizado por Corpocesar y la Universidad del Magdalena en el año 2011, donde se obtuvieron muestras de sesenta y un (61) PAS, localizados principalmente en el área donde se ubican los proyectos de explotación de carbón. A pesar de que esta información ya había sido analizada en el estudio en mención, no se había hecho la verificación de la confiabilidad de los resultados de laboratorio por medio del balance iónico de las muestras usadas, lo que hizo que para el presente capítulo el número de muestras incluidas en el análisis se redujera significativamente. Es de anotar que el análisis aquí presentado no es representativo de la calidad del agua o de la geoquímica del agua del acuífero objeto de estudio, pues los datos se concentran principalmente en la zona donde se desarrolla la actividad minera.

2.6.1 Desarrollo metodológico

- Estaciones de monitoreo seleccionadas para el análisis a partir de la evaluación de los resultados químicos.

Para hacer la clasificación y determinar la calidad del agua, es necesario primero evaluar los resultados de los análisis químicos para verificar la consistencia de los reportes de laboratorio. Este procedimiento se realiza a través del balance iónico (electroneutralidad) y la verificación de relaciones entre algunos iones y parámetros, los cuales indican que la muestra de agua fue analizada correctamente y los resultados son confiables.

- Balance iónico

El balance iónico mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en mili equivalentes por litro (meq/L), determinados analíticamente. El error del balance iónico, se calcula con base en la ecuación 15 y hace parte de un requerimiento mínimo que debe hacerse dentro de la evaluación del análisis químico, para establecer la confiabilidad de los resultados del laboratorio.

$$\% \text{ Error} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} * 100 \quad (\text{Ec. 15})$$

Según Custodio y Llamas (1976) "En un análisis químico completo debe verificarse que: suma de miliequivalentes de aniones = suma de miliequivalentes de cationes" (Ecuación 16).

Por lo tanto:

$$r (\text{CO}_3\text{H} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-) = r (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde,

$$r = \text{meq/L}$$

El error admisible de un análisis químico, depende en gran medida del tipo de agua y de su concentración. Los rangos de error para aceptar o no el análisis de una muestra de agua, dependen según la literatura, del valor de conductividad eléctrica (Custodio E y Llamas M.R., 1976), o de la sumatoria de aniones (Crites y Tchobanoglous, 2000 en: MADS, 2014) (Tabla 23 y 23).

Tabla 23. Error aceptable con base en la conductividad eléctrica

Conductividad Eléctrica ($\mu\text{s/cm}$)	% Error Aceptable
50	+/- 30
200	+/- 10
500	+/- 8
2000	+/- 4
>2000	+/- 4

Fuente: Universidad Nacional De Colombia. Sede Medellín, 2009; en MADS, 2014

Tabla 24. Error aceptable con base en la sumatoria de aniones

\sum Aniones (meq/L)	% Error Aceptable
0-3	+/- 0.2
3-10	+/- 2
10-800	+/- 5

Fuente: Universidad Nacional De Colombia. Sede Medellín, 2009; en MADS, 2014

Los valores anteriores suelen ser conservadores, y por lo tanto, se acepta un valor máximo en el error del balance iónico de 10% (UNAL, 2009), valor asumido para los datos tomados en el sistema acuífero Cesar.

Con base en las concentraciones de los Aniones (HCO_3^- ; Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) y Cationes (Ca^{2+} . Mg^{2+} . Na^+ . K^+) reportadas por el laboratorio, se calculó el error en el Balance Iónico aplicando la ecuación 15. Se obtuvo como resultado que de los 61 PAS muestreados solamente 20 cumplen con el BI (% Error $\leq 10\%$), por lo tanto la caracterización hidrogeoquímica y la calidad del agua para esa zona del acuífero se determinó solamente con base en la información de 20 pozos de monitoreo (Tabla 25 y Figura 112).

Tabla 25. Resumen general del BI sistema acuífero Cesar

Punto de Muestreo # de Pozo	Nombre Pozo	Y	X	\sum Aniones (meq/l)	\sum Cationes (meq/l)	Error BI
318	Cruce La Loma (Teodora mieles)	1554150,205	1051102,101	1,447	1,324	4%
349	Finca el Descanso	1545927	1054976,37	2,716	2,529	4%
257	Finca Jerusalén	1563939,643	1087270,722	3,346	3,434	1%
121	Finca Sumapaz	1570075,02	1087823,834	7,584	8,754	7%
126	Finca La Embajada	1574455,795	1088587,845	8,252	8,328	0%
364	Cruce Chiriguaná (E,D,S, Tocallos 1)	1530320,681	1059102,542	1,318	1,218	4%
333	Acueducto Aguas Frías	1537686,495	1053968,83	1,396	1,745	11%
272	Porfilio Tamayo San Roque	1519490,735	1061471,71	14,589	12,444	8%
274	Escuela Nueva San Roque	1519425,037	1061505,692	2,691	2,358	7%
5	Finca La Belleza	1551740,498	1080834,549	7,341	7,976	4%
65	Finca Escalea	1536407,81	1065804,176	0,826	0,719	7%
36	Lavadero doña María	1549267,032	1080699,879	2,368	2,057	7%
369	Acueducto Chiriguaná -1	1526666,215	1052936,827	2,976	2,774	4%
370	Acueducto Chiriguaná - 2	1526934,349	1051043,64	2,167	1,981	4%
395	Pozo Javier E Díaz	1527114,194	1052043,052	3,481	3,174	5%
399	Pozo Jorge García Mojica	1527055,495	1053381,802	2,291	2,087	5%
380	Yolanda Navarro	1527444,077	1.052.423	2,188	2,252	1%
383	Pozo Natividad Domínguez	1527468	1052145,4	7,815	8,616	5%
385	Pozo Gustavo De Armas	1527407,186	1052180,274	3,419	3,372	1%
368	Acueducto, estación Chiriguaná	1527095,576	1056290,699	2,217	2,146	2%

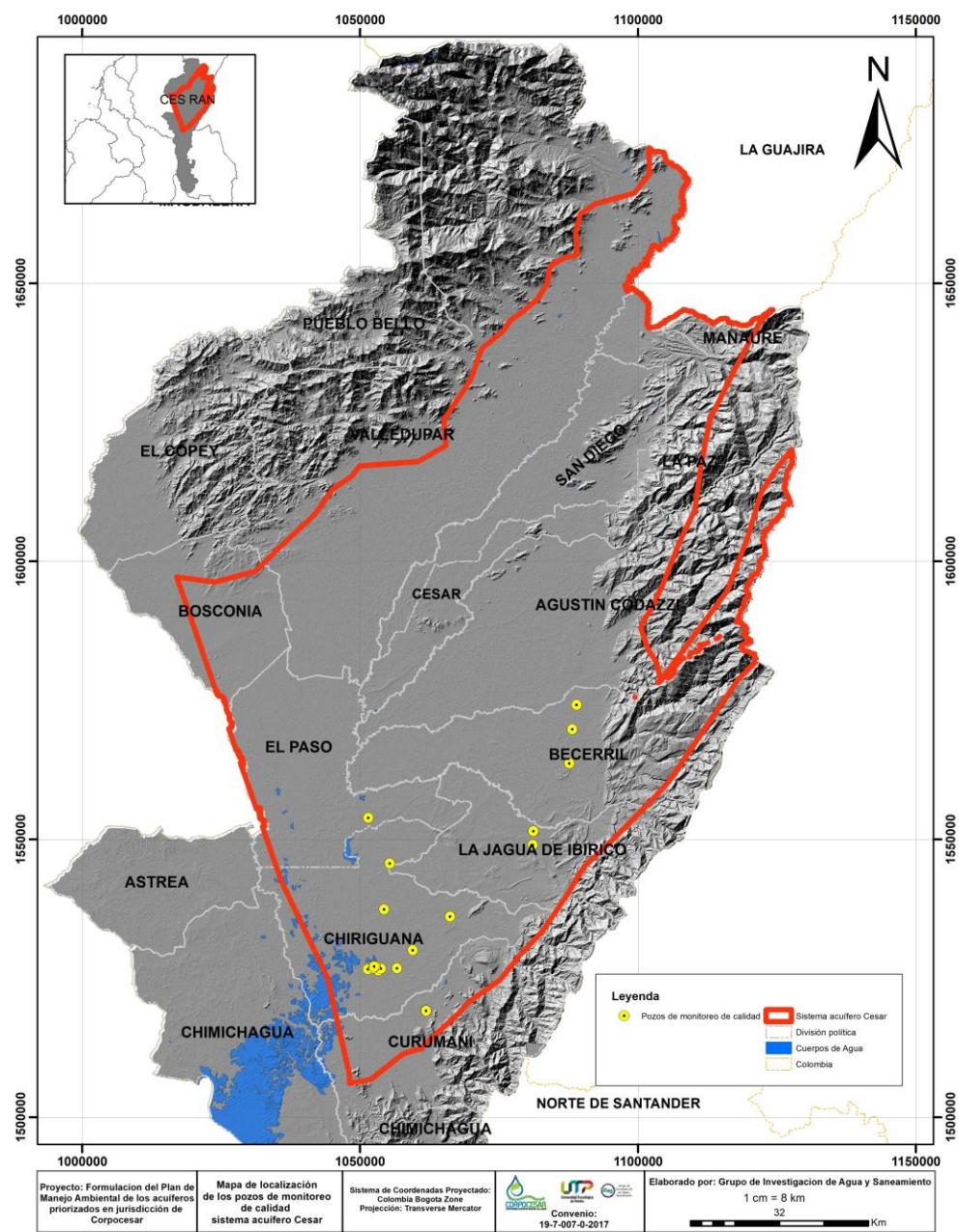


Figura 112. Ubicación de los pozos de monitoreo seleccionados para el análisis hidrogeoquímico y de calidad.

- **Toma de muestras y medición de parámetros fisicoquímicos in Situ**

El pH, la conductividad y la temperatura se determinaron in situ un equipo multiparámetro WTW 350i/set 2F40-114BOE de forma simultánea a la toma de muestras para análisis químicos, según la metodología establecida en el Standard Methods, 1998 y la Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM (2002).

La recolección de las muestras se realizó directamente de las válvulas de salida (Figura 113) o con Bailer (Figura 114) en el caso de PAS donde no se encontraron estos dispositivos, se recolectaron en recipientes de plásticos, debidamente limpiados. Las muestras fueron refrigeradas desde la toma a 4°C hasta su entrega en el Laboratorio Microbiológico Ortiz Martínez - Labormar en la ciudad de Barranquilla donde se realizaron los análisis. En la Tabla 26 se presentan los parámetros y las técnicas analíticas.



Figura 113. Toma de muestra directamente de la válvula de salida.

Fuente: Corpocesar y Universidad del Magdalena, 2011



Figura 114. Toma de muestra con báiler

Fuente: Corpocesar y Universidad del Magdalena, 2011

Tabla 26. Parámetros físico químicos y técnicas de análisis

PARAMETROS	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO
Cloruros	mg/l	Fotométrico	4500 Cl Standard Methods
Bicarbonatos	mg/l	Volumétrico	Volumétrico
Carbonatos	mg/l	Volumétrico	Volumétrico
Sólidos Totales	mg/l	Gravimétrico	2540 B Standard Methods
Nitritos	mg/l	Fotométrico	4500 NO ₂ Standard Methods
Nitratos	mg/l	Fotométrico	4500 NO ₃ Standard Methods
Manganoso	mg/l	Absorción atómica	3111 B Standard Methods
Alcalinidad Total	mg/l	Titulométrico	2320 B Standard Methods
Potasio	mg/l	Absorción atómica	3111 B Standard Methods
Color	UPt/ Co	Fotométrico	2120 C Standard Methods
Dureza Total	mg/l	Titulométrico con EDTA	2340C Standard Methods
Hierro total	mg/l	Fotométrico	3111B Standard Methods
Turbiedad	NTU	Nefelométrico	2310 A Standard Methods
Sólidos Disueltos	mg/l	Gravimétrico	2540 C Standard Methods
Calcio	mg/l	Gravimétrico	2540 E Standard Methods
Magnesio	mg/l	Absorción atómica	3111B Standard Methods
Sodio	mg/l	Absorción atómica	3111B Standard Methods
Sulfatos	mg/l	Fotométrico	4500 SO ₄ E Standard Methods

2.6.2 Caracterización hidrogeoquímica del acuífero

A través de herramientas gráficas se puede presentar la clasificación del agua subterránea por iones dominantes. Se nombra el agua por el anión o catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas. Si ninguno sobrepasa el 50%, se nombran los dos más abundantes. El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o de lugares diferentes (Custodio y Llamas, 1976).

Existen diferentes diagramas desarrollados con este fin entre ellos se destacan: diagramas columnares, triangulares, circulares, poligonales, columnares logarítmicos, entre otros. Para la clasificación química del agua subterránea del sistema acuífero Cesar, se utilizó el diagrama triangular de Piper y los Diagramas de Stiff, que se construyeron empleando el software gratuito *Diagrammes* versión 6.0 desarrollado por el Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, el cual permite procesar los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico y obtener la representación gráfica de los mismos.

- *Diagramas triangulares de Piper*

Como se observa en la Figura 115, las estaciones de monitoreo de calidad del acuífero de Cesar presenta un comportamiento heterogéneo con relación a los contenidos de aniones y cationes en las muestras de agua objeto de análisis, por lo tanto varía la clasificación química del agua, encontrando agua de tipo BICARBONATADA, SÓDICA POTÁSICA; CLORURADA, SÓDICA, POTÁSICA, Y BICARBONATADA

CÁLCICA MAGNÉSICA. El tipo de agua predominante es la Sódica Bicarbonatada presentándose en 35% de los PAS muestreados.

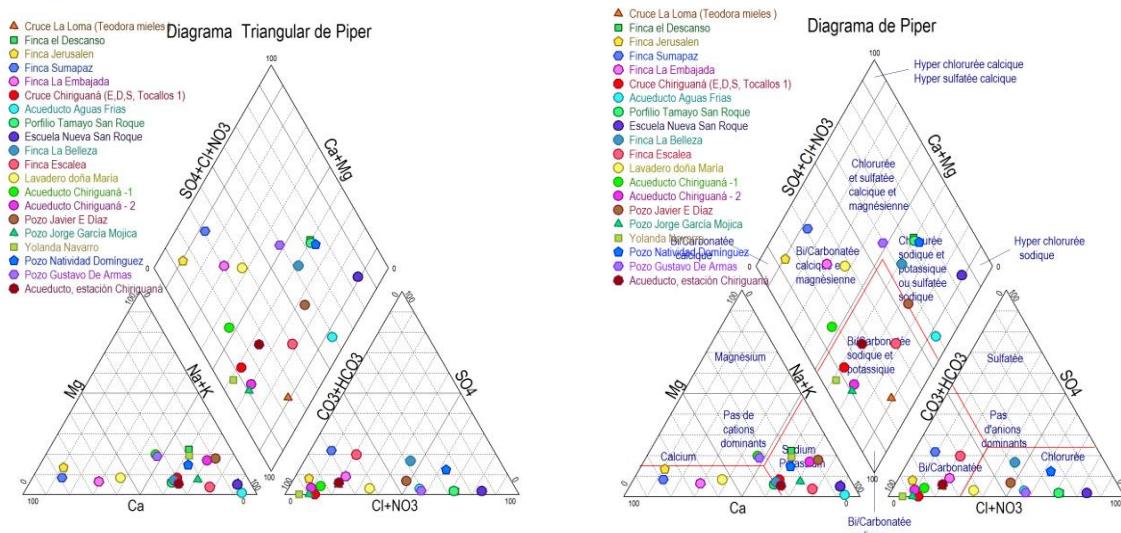


Figura 115. Diagrama triangular de Piper para el sistema acuífero Cesar
Fuente: Corpocesar y Universidad del Magdalena, 2011

- **Diagramas de Stiff**

Otra forma de representar la clasificación química del agua es a través de los diagramas de Stiff. En la Tabla 27 se presenta la clasificación química del agua realizada con base en las concentraciones más altas de cationes y aniones.

Tabla 27. Clasificación química del agua- Diagramas de Stiff

Número del Pozo	Nombre Pozo	Diagrama de Stiff	Clasificación del agua
318	Cruce La Loma (Teodora mieles)		Sódica- Bicarbonatada
349	Finca el Descanso		Clorurada - Sódica

Número del Pozo	Nombre Pozo	Diagrama de Stiff	Clasificación del agua
257	Finca Jerusalén	<p>Meq/L 3 2,5 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 2,5 3 Meq/L Na+K 3 Ca Mg Meq/L 3 2,5 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 2,5 3 Meq/L</p>	Bicarbonatada -Cálcica
121	Finca Sumapaz	<p>Meq/L 7 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 Meq/L Na+K 4 Ca Mg Meq/L 7 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 Meq/L</p>	Cálcica - Bicarbonatada
126	Finca La Embajada	<p>Meq/L 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 Meq/L Na+K 5 Ca Mg Meq/L 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 Meq/L</p>	Bicarbonatada - Cálcica
364	Cruce Chiriguaná (EDS Los Tocayos 1)	<p>Meq/L 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 Meq/L Na+K Ca Mg Meq/L 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 Meq/L</p>	Bicarbonatada -Sódica
333	Acueducto Aguas Frías	<p>Meq/L 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 Meq/L Na+K Ca Mg Meq/L 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 Meq/L</p>	Sódica- Clorurada
272	Porfilio Tamayo San Roque	<p>Meq/L 12 10 8 6 4 2 0 2 4 6 8 10 12 Meq/L Na+K Ca Mg Meq/L 12 10 8 6 4 2 0 2 4 6 8 10 12 Meq/L</p>	Clorurada -Sódica
274	Escuela Nueva San Roque	<p>Meq/L 2,5 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 2,5 Meq/L Na+K Ca Mg Meq/L 2,5 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 2,5 Meq/L</p>	Sódica – Clorurada
5	Finca La Belleza	<p>Meq/L 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 Meq/L Na+K Ca Mg Meq/L 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 Meq/L</p>	Sódica – Clorurada- Bicarbonatadas
65	Finca Escalea	<p>Meq/L 1 0,5 0 0,5 1 Meq/L Na+K Ca Mg Meq/L 1 0,5 0 0,5 1 Meq/L</p>	Sódica- Bicarbonatada
36	Lavadero doña María	<p>Meq/L 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 Meq/L Na+K Ca Mg Meq/L 2 1,5 1 0,5 0 0,5 1 1,5 2 Meq/L</p>	Bicarbonatada -Cálcica

Número del Pozo	Nombre Pozo	Diagrama de Stiff	Clasificación del agua
369	Acueducto Chiriguaná - 1	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 369. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 3. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~2.5, Ca ~1.5, Mg ~0.5, Cl ~1.5, HCO3+CO3 ~2.5, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Sódica Bicarbonatada -
370	Acueducto Chiriguaná - 2	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 370. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 2. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~1.5, Ca ~1.0, Mg ~0.5, Cl ~1.5, HCO3+CO3 ~2.0, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Sódica Bicarbonatada -
395	Pozo Javier E Díaz	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 395. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 2.5. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~2.0, Ca ~1.5, Mg ~0.5, Cl ~2.0, HCO3+CO3 ~2.5, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Sódica- Clorurada-Bicarbonatada
399	Pozo Jorge García Mojica	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 399. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 2.5. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~2.0, Ca ~1.5, Mg ~0.5, Cl ~2.0, HCO3+CO3 ~2.5, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Sódica- Bicarbonatada
380	Yolanda Navarro	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 380. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 2.5. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~2.0, Ca ~1.5, Mg ~0.5, Cl ~2.0, HCO3+CO3 ~2.5, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Sódica Bicarbonatada -
383	Pozo Natividad Domínguez	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 383. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 6. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~5.0, Ca ~4.0, Mg ~3.0, Cl ~5.0, HCO3+CO3 ~6.0, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Sódica – Clorurada
385	Pozo Gustavo De Armas	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 385. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 2. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~1.5, Ca ~1.0, Mg ~0.5, Cl ~1.5, HCO3+CO3 ~2.0, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Clorurada- Sódica Bicarbonatada
368	Acueducto, Chiriguaná estación	<p>Detailed description: A Stiff diagram for water sample 368. The x-axis represents concentration in Meq/L, ranging from 0 to 2. The y-axis lists ions: Na+K, Ca, Mg, Cl, HCO3+CO3, and SO4+NO3. The diagram shows a shaded area representing the composition of the water. Key values: Na+K ~1.5, Ca ~1.0, Mg ~0.5, Cl ~1.5, HCO3+CO3 ~2.0, SO4+NO3 ~0.5.</p>	Sódica Bicarbonatada -

2.6.3 Determinación de la calidad del agua subterránea

La calidad del agua está dada por el contenido de sustancias minerales junto con las propiedades fisicoquímicas y biológicas. La calidad es un concepto de alguna manera relativa, ya que no se puede hacer una clasificación absoluta de la “calidad”, puesto que este concepto está relacionado con los usos para los

cuales se destina el recurso, donde para cada uso varía, al igual que los criterios utilizados para evaluarla (Robles, 2013).

Uno de los problemas relacionado con la calidad del agua subterránea, es el aporte de diversos elementos provenientes de actividades antrópicas realizada tanto en zonas urbanas como rurales y dicha contaminación se da principalmente en las áreas donde están definidas las zonas de recarga de los acuíferos, la contaminación de acuíferos muy frecuentemente se origina fuera de los mismos, en el suelo y en el medio no saturado, por lo que su consideración es esencial para la utilización racional de las aguas subterráneas.

La contaminación por causas antrópicas puede ser artificial consecuencia de la introducción de substancias o calor, pero también puede ser inducida consecuencia de los cambios potenciométricos que posibilitan la incorporación de aguas salinas o contaminadas o la solubilización de substancias del terreno. El paso natural del agua por formaciones capaces de liberar sales rápidamente o el lavado de interfaces con masas de agua salina, por ejemplo en los acuíferos costeros, produce también una degradación a la que se la puede llamar contaminación natural. Los posibles contaminantes son muy diversos y tienen distintos comportamientos, además las posibles fuentes de contaminación son muy diversas.

- **Criterios de calidad en función del uso del agua**

En la Tabla 28 se presentan los valores de referencia según criterios de calidad en función del uso del agua. Teniendo en cuenta que las muestras de agua son directamente de los acuíferos y por lo tanto no se trata de agua potable, el análisis fue realizado en función de lo dispuesto en el decreto 1076 de 2015.

Tabla 28. Valores de referencia para determinar la calidad del agua en función del uso

Parámetro	Unidad Medida de	Valores admisibles según criterios de calidad para la destinación del recurso hídrico según su uso. Decreto 1076 de 2015				
		Consumo Humano y Doméstico e indican que para su potabilización se requiere solo tratamiento convencional Art. 2.2.3.3.9.3	Consumo Humano y Doméstico e indican que para su potabilización se requiere solo desinfección Art. 2.2.3.3.9.4	Consumo Humano y Doméstico e indican el recurso hídrico ya ha pasado por un sistema de potabilización – resolución 2115 de 2007	Agrícola Art. 2.2.3.3.9.5	Pecuario Art. 2.2.3.3.9.6
pH	Unidades de pH	5.0 - 9.0	6.5 - 8.5	6.5 - 9.0	4.5 - 9.0	-
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ . l ⁻¹	-	-	200	-	-
Dureza total	mg CaCO ₃ .l ⁻¹	-	-	300	-	-
Conductividad	μs/cm	-	-	1000	-	-
Bicarbonatos	mg CaCO ₃ .l ⁻¹	-	-	-	519	-
Calcio	mg/l	-	-	60	-	-

Parámetro	Unidad Medida de	Valores admisibles según criterios de calidad para la destinación del recurso hídrico según su uso. Decreto 1076 de 2015				
		Consumo Humano y Doméstico e indican que para su potabilización se requiere solo tratamiento convencional Art. 2.2.3.3.9.3	Consumo Humano y Doméstico e indican que para su potabilización se requiere solo desinfección Art. 2.2.3.3.9.4	Consumo Humano y Doméstico e indican el recurso hídrico ya ha pasado por un sistema de potabilización – resolución 2115 de 2007	Agrícola Art. 2.2.3.3.9.5	Pecuario Art. 2.2.3.3.9.6
Sodio	mg/l					
Cloruros	mg/l	250	250	250	-	-
Nitratos	mg/l	10	10	10	-	-
Nitritos	mg/l	1	1	0.1	-	10
Nitratos + Nitritos	mg/l	-	-	-	-	100
Fosfatos	mg PO4-1/l			0.5		
Potasio	-	-	-	10	-	-
Sulfatos	mg SO4-2/l	400	400	250	-	-
Magnesio	Mg/l	-	-	0.1	0.2	-
Hierro	mg/l	-	-	0.3	5	-
Coliformes* Totales	UFC /100 ml	-	-	0	-	-
Coliformes* Fecales	UFC/100 ml	-	-	0	-	-

- pH, Alcalinidad y Dureza

El pH determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculado por el número de iones de hidrógeno presentes. Por regla general el pH de las aguas naturales se mantiene entre 6.5 y 8, sin embargo puede variar entre 3 y 11 Unidades. Este parámetro juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas naturales (equilibrio carbonatado, procesos redox, entre otros), es fácilmente alterable por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la toma de muestra. El pH, es un factor importante que influye en la concentración de elementos traza en las aguas subterráneas, lo cual puede originar que el recurso sea inviable para uso agrícola, especialmente riego de cultivos. Un pH inferior a 6.0 hace que las aguas subterráneas, sean potencialmente corrosivas para las estructuras en concreto y también favorece la formación de ácido carbónico a partir de los bicarbonatos. El valor del pH de las aguas subterráneas no contaminadas está generalmente en el intervalo de 6 a 8.5 aproximadamente (EEA, 1999).

En la Figura 116 se presentan los valores de pH registrados en los pozos de monitoreo durante la campaña realizada en mayo de 2011. Con base en los criterios de calidad para la destinación de los usos del agua dispuestos en el decreto 1076 de 2015 (Tabla 28), se observa que si el agua es para consumo humano y doméstico es necesario realizar en algunas estaciones el tratamiento recomendado a partir del criterio de pH

(convencional pH entre 5.0 -9.0 y solo desinfección pH entre 6.5 – 8.5), para la destinación del agua en uso pecuario, no hay ninguna restricción.

Con relación al concepto de calidad, la literatura reporta un rango de pH en aguas no contaminadas que oscila entre 6.5 y 9.0 (EEA, 1999). Con base en esta clasificación, se concluye que cuatro pozos de monitoreo están por debajo del límite inferior, siendo el más crítico escuela Nueva San Roque, ninguna excede el límite superior (Figura 116).

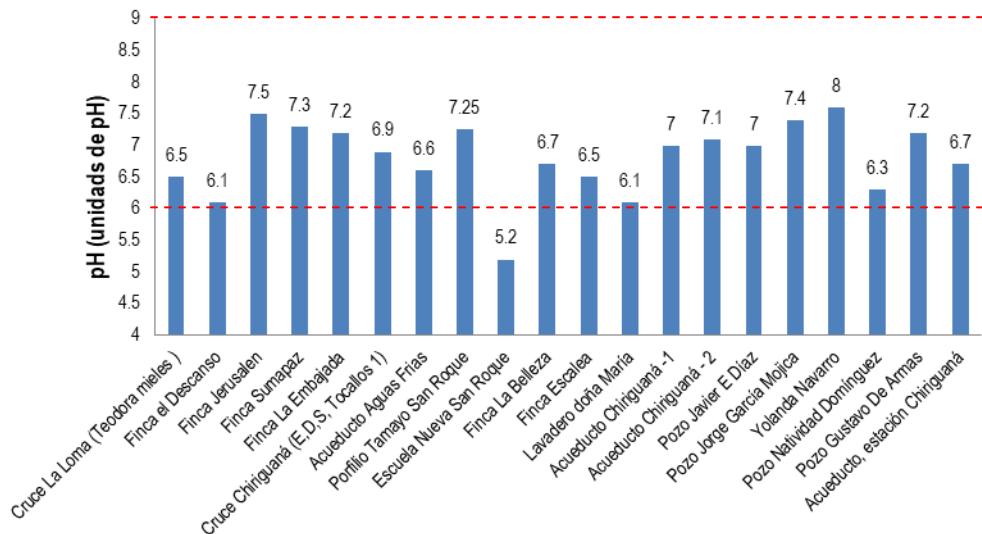


Figura 116. pH estaciones pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

La alcalinidad del agua es su capacidad para neutralizar ácidos, es la suma de todas las bases titulables. Por lo general se debe fundamentalmente a su contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos aunque otras sales o bases también contribuyen a la alcalinidad (Severiche et al., 2013). Para aguas dulces los niveles de alcalinidad reportados en la literatura están entre 20 mg/l CaCO₃ y 200 mg/l CaCO₃ (Murphy, 2007). Para clasificar el agua subterránea de los acuíferos del Cesar con base en las concentraciones de alcalinidad, se utiliza la clasificación dada por la (EEA, 1999) relacionados en la Tabla 29.

Tabla 29. Clasificación de la alcalinidad para la evaluación de aguas subterráneas

Valor Alcalinidad	Clasificación de la alcalinidad
< 50 mg/l CaCO ₃	Baja
50 – 200 mg/l CaCO ₃	Media
> 200 mg/l CaCO ₃	Alta

Fuente: EEA (1999)

Los valores de alcalinidad se presentaron en un rango de 25 – 420 mg/l. El decreto 1076 de 2015 no establece valores de referencia para la alcalinidad en función del uso. Para clasificar el agua subterránea con base en las concentraciones de alcalinidad se utilizó la clasificación dada por la (EEA, 1999) (Tabla28). Como se observa en la Figura 117, en su gran mayoría las aguas subterráneas son de alcalinidad media.

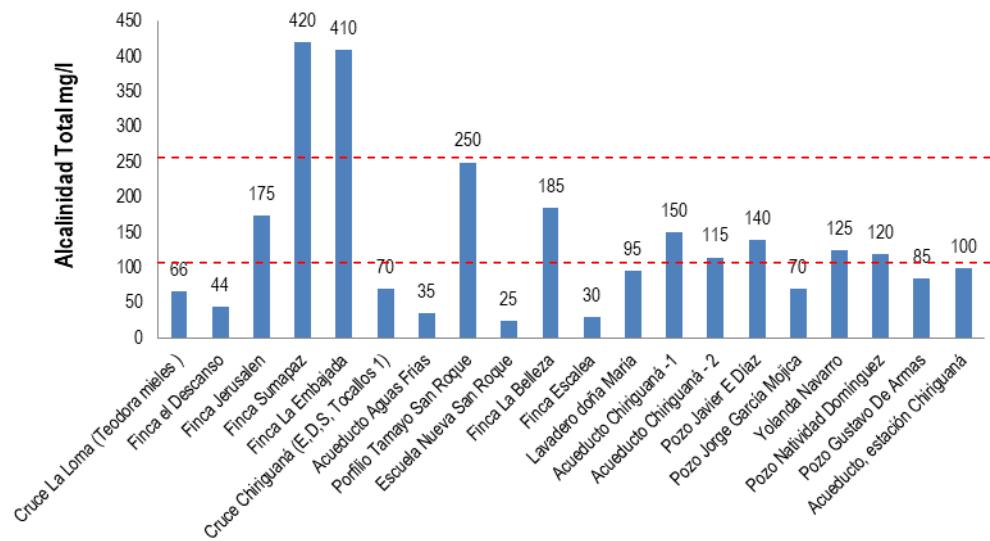


Figura 117. Alcalinidad Total pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

La dureza se define en términos de contenido de los iones Calcio y Magnesio, por lo general la dureza de las aguas subterráneas naturales varía entre 10 y 300 mg /l de CaCO₃, pero en algunos casos puede alcanzar valores mayores a 2000 mg /l de CaCO₃ (IGME, 1985). La dureza de las aguas subterráneas es dependiente de la concentración de carbonatos de magnesio (MgCO₃) y carbonatos de calcio (CaCO₃), este parámetro no se ve afectado por el pH del agua, sólo se afecta por la variable temperatura, pues ésta determina qué tan solubles son estos compuestos en el medio acuoso. Para clasificar las aguas subterráneas de los acuíferos del Cesar se utilizan los rangos establecidos en la Tabla 30.

Tabla 30. Clasificación del agua con base en las concentraciones de dureza

Valor de Dureza	Clasificación
0 – 75 mg/l CaCO ₃	Blanda
75 – 150 mg/l CaCO ₃	Moderadamente dura
150 – 300 mg/l CaCO ₃	Dura
> 300 mg/l CaCO ₃	Muy dura

Fuente: (Romero, 2002)

Con los resultados, se encontró un rango de dureza comprendido entre 11.4 y 249.7 mg/l. Teniendo en cuenta la clasificación de la dureza del agua (Tabla 30), hay un comportamiento heterogéneo en los diferentes pozos

de monitoreo, encontrando aguas blandas (dureza entre 0 - 75 mg/l) en la mayoría de puntos muestreados, seguido por aguas moderadamente duras (dureza entre 75- 150 mg/l) y aguas duras (dureza entre 150 - 300 mg/l) en cinco pozos (Figura 118).

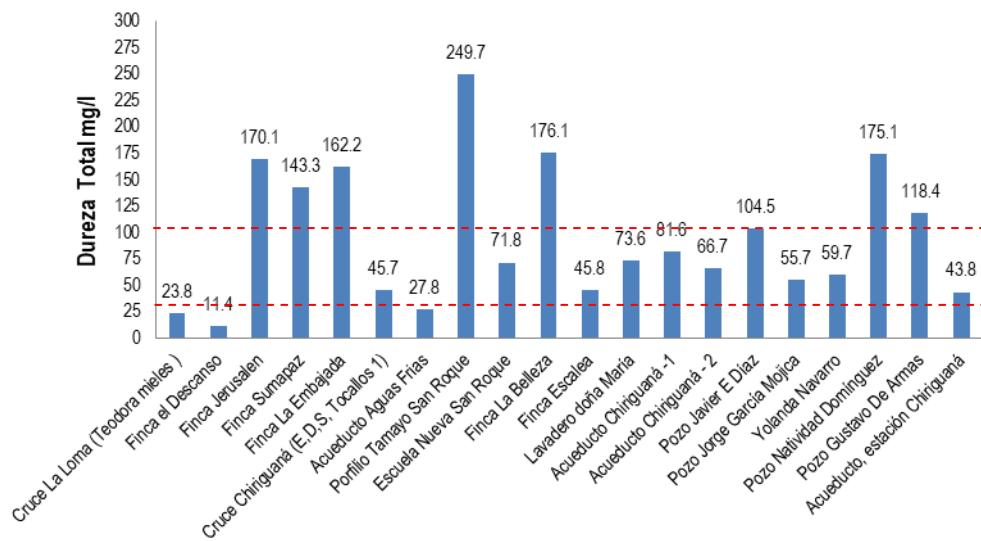


Figura 118. Dureza en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- **Salinidad**

La salinidad es un parámetro decisivo en el uso del agua subterránea para el riego de cultivos, abastecimiento público y uso industrial, principalmente en la fabricación de alimentos y productos químicos (CVC, 2007). En relación con la salinidad, es importante monitorear todos sus cambios en la salinidad usando Cl⁻ (cloruros) o la CE (conductividad eléctrica) y si fuera posible, caracterizar la fuente de salinidad principalmente en áreas con niveles freáticos poco profundos. Las variaciones en los niveles de salinidad pueden ocurrir debido al cambio climático natural o al bombeo excesivo y las prácticas de riego que estimulan la precipitación de sólidos disueltos y sales en los suelos agrícolas (Paez, 2008).

La Conductividad Eléctrica – CE es una medida del grado de mineralización de las aguas subterráneas y un indicador de su calidad. Determina la presencia de sales como cloruros, sulfatos, nitratos, carbonatos y bicarbonatos, generalmente asociados con los cationes K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, entre otros, la variación de temperatura modifica notablemente la conductividad, a mayor temperatura mayor CE. Este parámetro en las aguas subterráneas, está determinado por las condiciones geológicas naturales y la contaminación antropogénica. De acuerdo al estudio realizado por la CVC (2007), se establecen unos rangos de CE que tipifican la calidad del agua cuando su destinación es consumo humano (Tabla 31).

Tabla 31. Rangos de conductividad del agua para consumo humano

Conductividad - $\mu\text{s}/\text{cm}$	Clasificación de la salinidad
0 - 200	Muy baja
200 - 300	Baja
300 - 400	Media
400 - 500	Moderada
500 - 600	Condicionada
600 - 700	Objetable

Fuente: Modificada de CVC, 2007

Los vertimientos provenientes de actividades antrópicas con contenidos importantes de elementos como calcio, magnesio, potasio, sodio, cloruro, sulfato, nitratos y sustancias acidificantes generan un incremento en la CE del agua subterránea, de igual forma los efluentes de la industria química y los procesos de lixiviación de los vertederos domésticos e industriales contribuyen al aumento de este parámetro en el agua subterránea (EEA, 1999). Para la clasificación del agua con fines de riego de acuerdo al valor de CE, según el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) se utilizan los rangos establecidos en la Tabla 32.

Tabla 32. Rangos de conductividad del agua con fines de riego

Conductividad - $\mu\text{s}/\text{cm}$	Clasificación	Descripción
< 250	(C1) Agua de salinidad baja	Apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas solamente en suelos de muy baja permeabilidad.
250-750	(C2) Agua de salinidad media	Apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
751-2250	(C3) Agua altamente salina	Puede utilizarse para el riego en suelos con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos tolerantes a la salinidad.
2251-5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$	(C4) Agua muy altamente salina	En muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad

En la Figura 119 se observa que las conductividades varían entre 50 y 1631 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Teniendo como referencia los rangos de conductividad para fines de riego de la Tabla 31, tenemos que las aguas de los puntos muestreados se clasifican como de salinidad media a altamente salina.

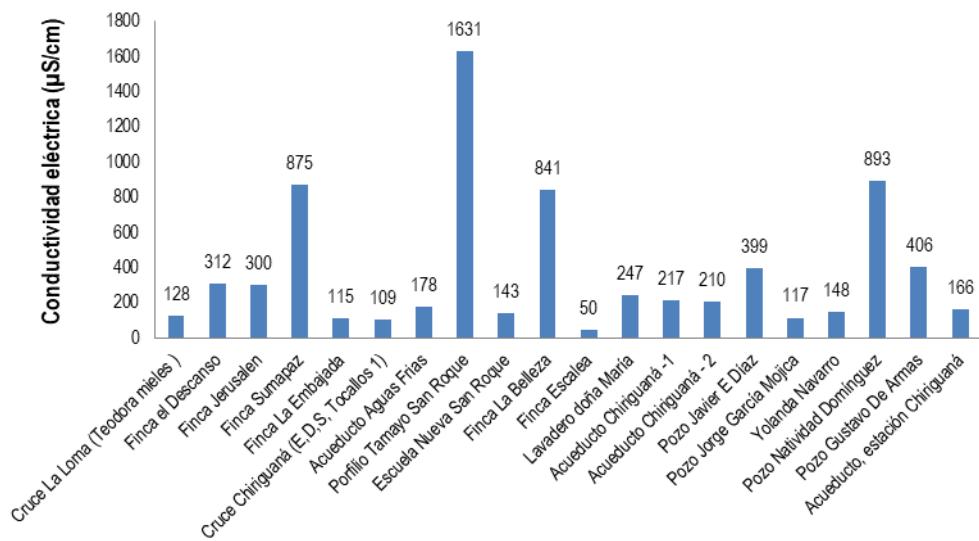


Figura 119. Conductividad eléctrica en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- **Iones Carbonatos y Bicarbonatos**

En aguas con pH inferior a 8.3 en la mayoría de las aguas subterráneas naturales la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato. En estas aguas la concentración de HCO_3^- suele variar entre 50 y 400 mg/l aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/l. Concentraciones de hasta 1000 mg/l de HCO_3^- pueden encontrarse en aguas pobres en Ca^{++} y Mg^{++} o en las que se producen fenómenos de liberación de CO_2 (por ejemplo reducción de sulfatos) en el acuífero (IGME, 1985). En la Tabla 33 se muestra el grado de restricción del agua con base en las concentraciones de Bicarbonatos para uso agrícola.

Tabla 33. Restricción del uso del agua para riego según la concentración de Bicarbonatos

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción al uso		
		Inexistente	Moderado	Severo
Bicarbonato (HCO_3^-)	meq/l	< 1,5	1,5 – 8,5	> 8,5
Bicarbonato (HCO_3^-)	mg/l	< 92	92 – 519	> 519

Fuente: (Ayers y Westcot, 1987)

Teniendo en cuenta los valores de pH (<8.3) en los pozos de monitoreo, se puede concluir que la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato. En las muestras analizadas se presentaron valores entre 0.41 y 5.74 meq/l de HCO_3^- . La restricción del uso del agua con fines agrícolas se definió utilizando como criterio los rangos establecidos en la Tabla 32.

Las concentraciones reportadas por el laboratorio fueron expresadas en meq/l de HCO_3^- . Como se observa en la Figura 120 se presentan un grado de restricción moderada (bicarbonatos entre 1.5 – 8.5 meq/l de HCO_3^-) en la mayoría de los PAS, y en algunos casos la restricción es inexistente (bicarbonatos <1.5 meq/l de HCO_3^-).

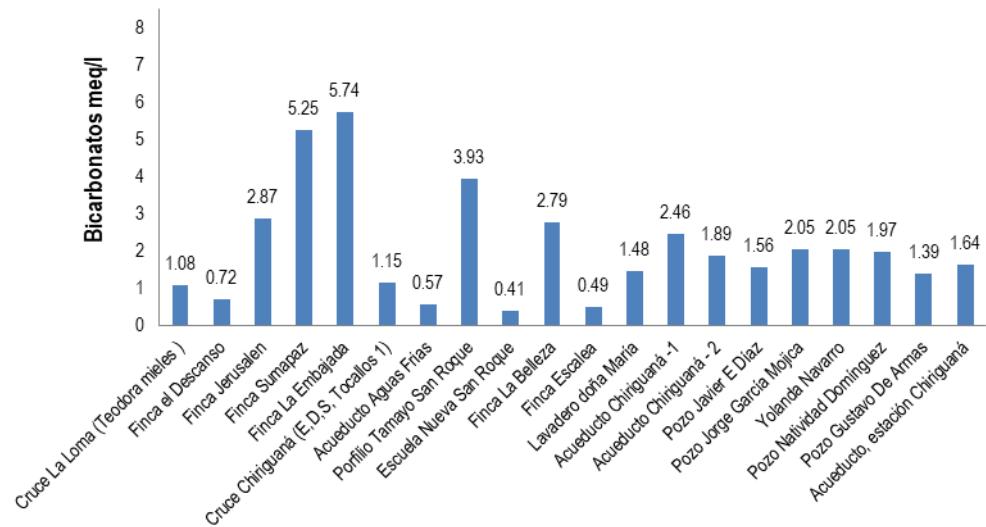


Figura 120. Bicarbonatos en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- **Ión Calcio**

El calcio (Ca) suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarlas y metamórficas. La concentración del ión calcio (Ca^{+2}) varía ampliamente en las aguas subterráneas. Concentraciones entre 10 y 250 mg/l, son frecuentes en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg/l, y en salmueras de CaCl_2 hasta 50.000 mg/l (IGME, 1985).

Los valores de Calcio en los pozos de monitoreo están en un rango comprendido entre 1.31 y 138.4 mg/l. El decreto 1076 de 2015 no establece valor admisible en términos de calcio para la utilización del agua cruda para ningún uso, sin embargo la resolución 2115 de 2007 establece un valor de 60 mg/l en el agua potable. En la Figura 121 se presentan la concentraciones del ión calcio en los pozos de monitoreo.

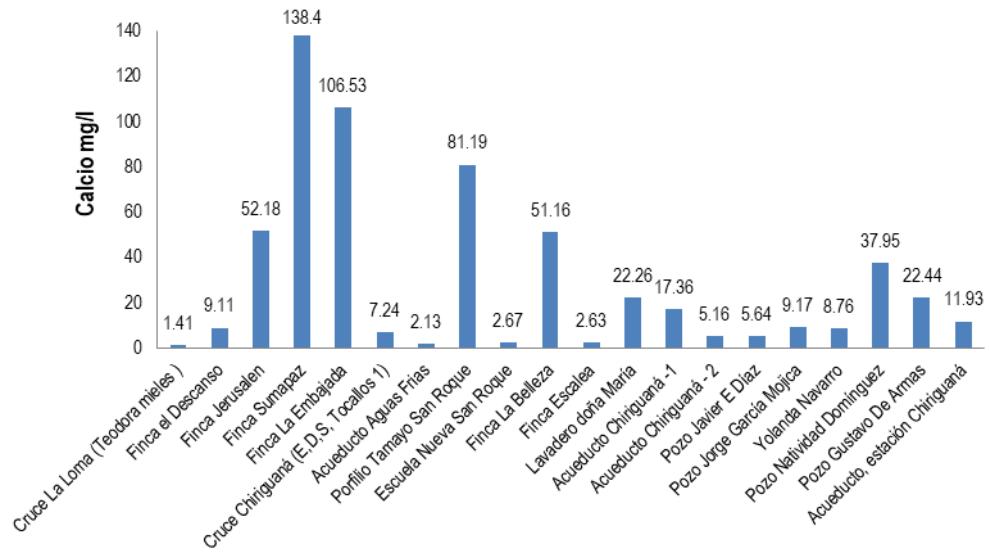


Figura 121. Calcio en los pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

• Toxicidad

Los constituyentes del agua que principalmente inciden en el problema de toxicidad son sodio (Na), cloruros (Cl) y boro (B). Respecto al sodio (Na) en general, la literatura especializada informa que este constituyente del agua no se considera un nutriente esencial para las plantas, pero sí es el catión más dañino en el agua de riego.

Las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso del calcio. Sin embargo, el sodio puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado con calcio provocando una disminución de la dureza de las aguas. La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120.000 mg/l en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa un rango entre 100 - 150 mg/l en aguas dulces normales (IGME, 1985). En la Tabla 34, se describen los rangos utilizados para determinar el riesgo por toxicidad del sodio (Na⁺) en el agua de riego.

Tabla 34. Restricción del uso del agua para riego según la concentración de Sodio

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción al uso		
		Inexistente	Moderado	Severo
Sodio (Na ⁺)	RAS (meq/l)	< 3	3 - 9	> 9

Fuente: (Ayers y Westcot, 1987)

La concentración del ión sodio se presentó en un rango entre 6.93 y 160.13 mg/l (Figura 122). El decreto 1076 de 2015 no establece para este parámetro valor máximos admisibles para ninguno de los usos del agua, la resolución 2115 de 2007 tampoco contempla este parámetro. Para uso del agua en actividades agrícolas (iego de cultivos) con el cálculo del RAS y el CRS se determinó la clasificación de la calidad del agua para dicho uso.

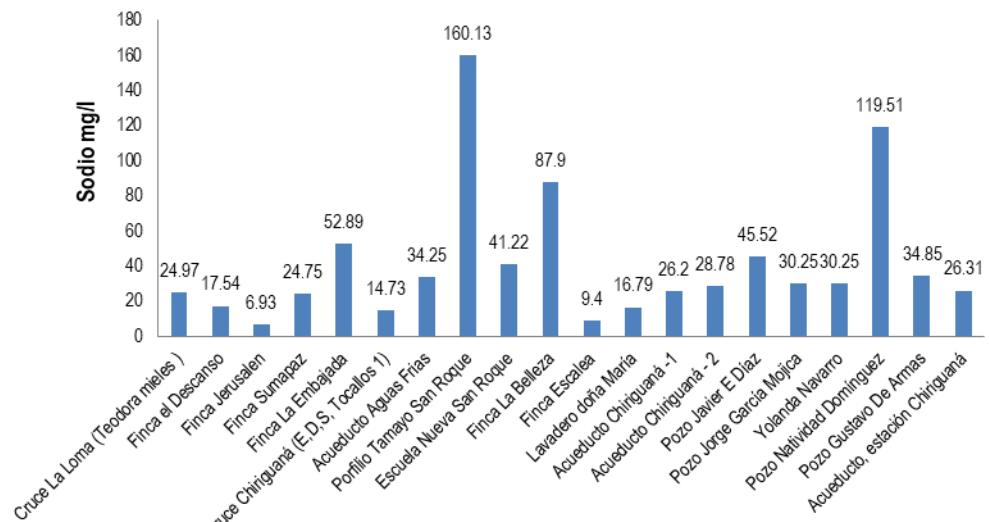


Figura 122. Sodio en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- Relación de Adsorción de Sodio – RAS

El índice RAS da una idea del riesgo de sodificación del complejo de cambio (degradación de la estructura del suelo). El índice RAS hace referencia a la proporción relativa en que se encuentran el ión sodio y los iones calcio y magnesio, calculándose a través de la Ecuación 17, donde los cationes se expresan en meq/l, en este sentido la conversión de mg/l a meq/l se determina a través de la Ecuación 18.

$$RAS = \frac{Sodio}{\sqrt{\frac{Calcio + Magnesio}{2}}} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\frac{meq}{l} = [C] * \frac{V}{PM} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde,

[C]= Concentración del elemento expresado en mg/l

V= número de valencia

PM= Peso molecular

La clasificación del agua con fines de riego mediante el índice RAS, según el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35. Clasificación del agua con fines de riego mediante el índice RAS

RAS meq/l	Clasificación	Descripción
0 – 10	(S1) Agua baja en sodio	Apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
10 – 18	(S2) Agua media en sodio	Peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad.
18 – 26	(S3) Agua alta en sodio	Gran peligro de acumulación del sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y el empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
> 26	(S4) Agua muy alta en sodio	No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

La determinación del índice RAS se realizó para clasificar la calidad del agua con el fin de establecer su grado de restricción para el uso agrícola (riego). Una vez determinado el RAS aplicando la Ecuación 17, se encontró en valores entre 1.82 y 44.87 meq/l por lo tanto, se concluye que el agua de la mayoría de los pozos objeto de monitoreo se clasifican según el índice RAS principalmente desde media en sodio (RAS entre 10 y 18 meq/l) a alta en sodio (RAS entre 18 – 26 meq/l), su uso en riego se ve limitado por la posible acumulación de sodio en el suelo, por lo tanto es necesario realizar enmiendas o adiciones de materia orgánica.

En cinco estaciones el agua es baja en sodio (RAS entre 0 y 10 meq/l) por lo cual no presenta restricción para riego y en cinco pozos de monitoreo el índice RAS fue > a 26 meq/l lo que indica agua muy alta en sodio y no es aconsejable para su uso en riego (Figura 123).

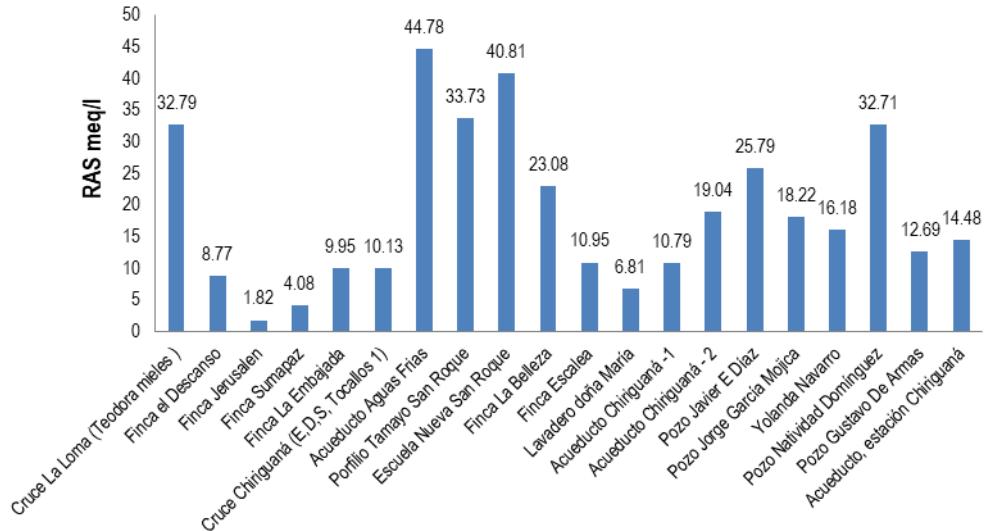


Figura 123. RAS en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- **Cloruros**

Los cloruros (Cl^-) generalmente se presentan en las aguas superficiales naturales en concentraciones bajas y son debidos principalmente a la meteorización de las rocas sedimentarias (IDEAM, 2001), aunque en ocasiones corrientes influenciadas por aguas de origen volcánico presentan concentraciones elevadas de este parámetro. Sin embargo, también pueden atribuirse a descargas de efluentes de las industrias químicas, vertimientos de aguas residuales domésticas, drenaje de irrigaciones y contaminación por infiltraciones de depósitos de residuos sólidos, entre otros, razón por la cual son indicadores de posible contaminación por aguas residuales (UNESCO, 1996).

Como se observa en la Figura 124, las concentraciones de cloruros oscilaron en un rango entre 4.72 y 367.25 mg/l. Solo un pozo de monitoreo supera el valor admisible (250 mg/l) establecido en el decreto 1076 de 2015 para el uso del agua en consumo humano y doméstico previo tratamiento de potabilización convencional o solo desinfección.

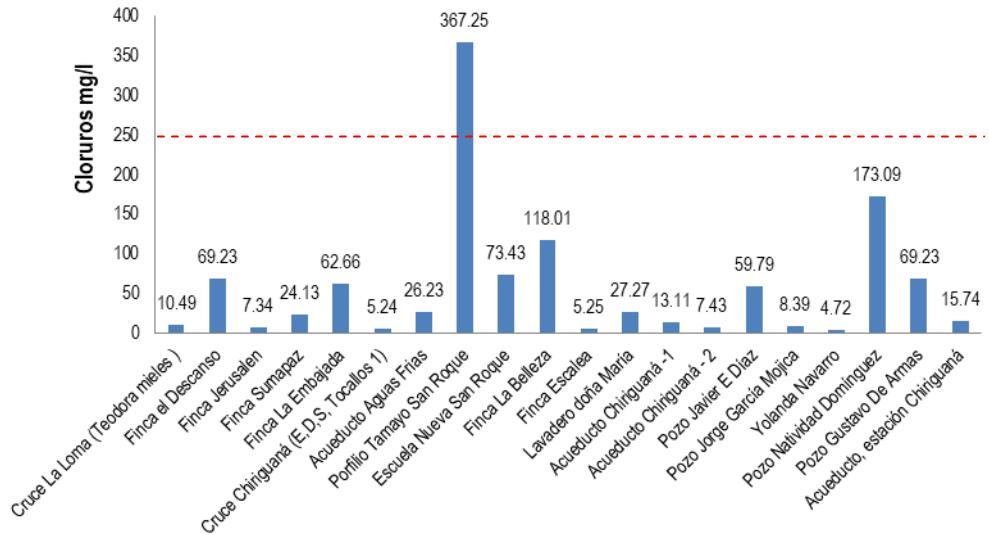


Figura 124. Cloruros en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- **Iones Nitrito (NO_2) y Nitrato (NO_3)**

El ión nitrito puede estar presente en las aguas bien como consecuencia de la oxidación del NH_3 o como resultado de la reducción, microbiana o no, de los nitratos. Su presencia en el agua debe considerarse como un indicio fundado de una posible contaminación reciente (dada su inestabilidad) y, tal vez, de la impotabilidad del agua debida a la toxicidad de este ión. No obstante, la sola presencia de nitrito y amonio en el agua subterránea no debe ser considerada como resultado de una contaminación, sin analizar las posibles causas de su presencia, dado que en un acuífero las condiciones de oxidación no son siempre favorables y estos iones, incorporados de manera natural al acuífero, pueden mantenerse durante cierto tiempo en el equilibrio con su forma oxidada, el nitrato.

El contenido de nitrato en aguas subterráneas es muy variable y no está relacionado con las características de las formaciones geológicas. El alto contenido de nitrato se puede asociar con el flujo directo de agua superficial en los PAS, o la percolación de aguas contaminadas en el acuífero.

La presencia de concentraciones altas de nitratos en aguas subterráneas puede indicar contaminación y presencia de bacterias patógenas. Actividades antrópicas como el uso de fertilizantes en zonas agrícolas puede incidir en el aumento de la concentración de nitratos en aguas subterráneas. El origen de los nitratos en las aguas subterráneas no siempre es claro, éstos son relativamente estables pero pueden ser fijados por el terreno o ser reducidos a nitrógeno o amonio en ambientes reductores. A menudo son indicadores de contaminación alcanzando entonces elevadas concentraciones y presentando, por regla general, una estratificación clara con predominio de las concentraciones más elevadas en la parte superior de los acuíferos libres.

De acuerdo con EEA (1999) las fuentes de contaminación por nitratos en las aguas subterráneas son:

- Cultivos en áreas donde la capa de suelo es relativamente fina, o tiene poca capacidad de nutrientes o cuando existen cambios en los usos de las tierras
- Exceso de fertilización de cultivos por actividades agrícolas intensivas
- Ciclos de agricultura intensiva de rotación caracterizados por frecuentes arados y áreas extensivas de suelos desnudos durante los inviernos
- Fertilizantes orgánicos para explotación de pastos
- Aumento de la urbanización

La concentración de nitratos en los pozos de monitoreo es en general muy baja, encontrándose entre 0.003 y 10.17 mg/l (Figura 125), solo un pozo supera el valor admisible para uso del agua en consumo humano y doméstico con tratamiento convencional o solo desinfección, determinado en el decreto 1076 de 2015 (10 mg/l).

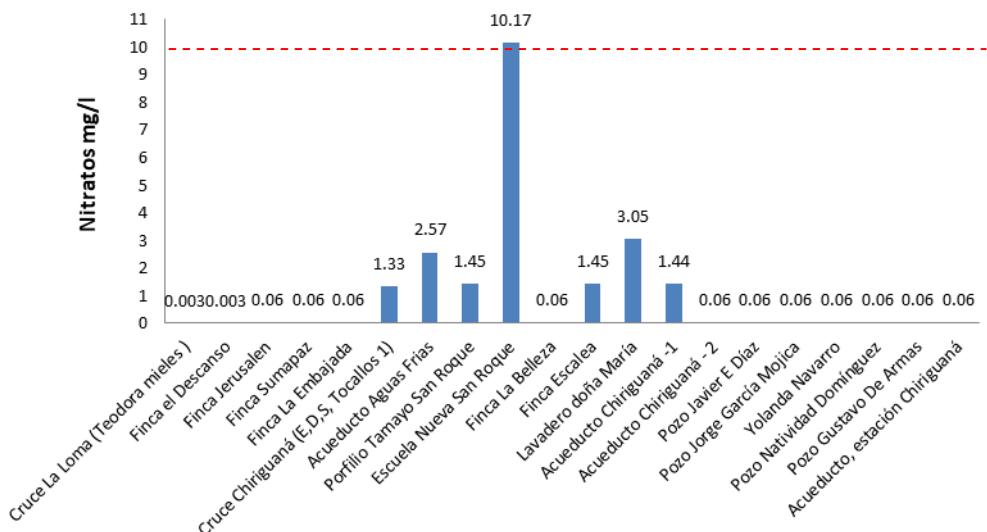


Figura 125. Nitratos en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

• Potasio

El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico; por ello su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del ión sodio (Na^+) a pesar de que su contenido en las rocas es por lo común ligeramente inferior a la del ión sodio (Na^+). En aguas subterráneas el contenido de ión potasio (K^+) no suele sobrepasar los 10 mg/l, aunque en casos excepcionales pueden alcanzarse 100.000 mg/l (salmueras). Cantidad de potasio por encima de 10 mg/l pueden en ocasiones, ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales (IGME, 1985).

Las concentraciones del ion potasio se encontraron en un rango entre 1,53 y 40,45 mg/l. Para el análisis de dichas contracciones con relación a la calidad del agua en términos de contenidos de potasio, se tomó como

referencia lo determinado por (IGME, 1985) en donde concentraciones superiores a 10 mg/l pueden indicar contaminación por aguas residuales. No existe criterio de calidad para ninguno de los usos del agua cruda, conforme a lo establecido en el decreto 1076 de 2015, sin embargo la resolución 2115 de 2007 establece un valor máximo admisible de 10 mg/l para el agua potable. Considerando los criterios anteriores en cuatro pozos de monitoreo se superan los criterios de calidad indicando posibles fuentes de contaminación (Figura 126).

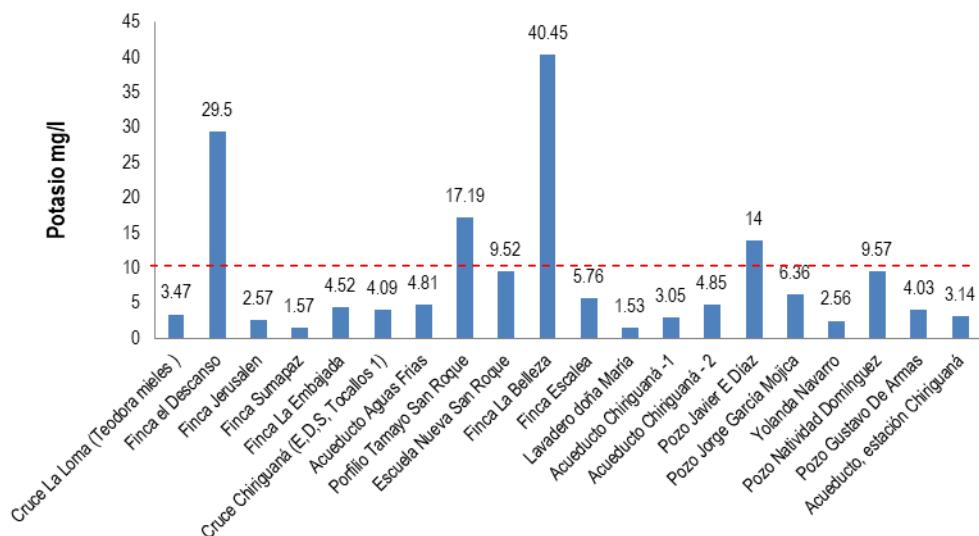


Figura 126. Potasio en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- **Sulfatos**

El movimiento del agua a través de formaciones rocosas y suelos que contienen minerales sulfatados, favorecen la disolución de éstos en las aguas subterráneas. El sulfato (SO_4) se encuentra en casi todas las aguas naturales; la mayor parte de los compuestos sulfatados se originan a partir de la oxidación de las menas de sulfato, la presencia de esquistos y la existencia de residuos industriales.

En aguas subterráneas no contaminadas, por lo general las concentraciones de sulfatos no excede los 300 mg/l, excepto en los pozos influenciados por drenajes ácidos de mina y hasta 200.000 mg/l en algunas salmueras (UNESCO, 1996). La mayoría de las aguas subterráneas sulfurosas presentan contenidos apreciables de HS^- ó H_2S que incluso a concentración muy baja, confieren al agua el típico olor a huevos podridos.

Una alta concentración de sulfato en agua potable tiene un efecto laxativo cuando se combina con calcio y magnesio, los dos componentes más comunes de la dureza del agua. En 1935 el investigador Scofield estableció algunas concentraciones límites para el SO_4^{2-} en aguas utilizadas para riego (Tabla 36).

Tabla 36. Clasificación de agua de riego según contenido de sulfatos

Clase de Agua	SO ₄ ²⁻ (meq/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
Muy buena	< 4	< 192.12
Buena	4 - 7	192.12 - 336.21
Puede ser usada	7 - 12	336.21 - 576.36
Usar con precaución	12 - 20	576.36 - 960.6
Dañina	> 20	> 960.6

Las concentraciones de sulfatos se presentan en un rango entre 0.05 y 79.58 mg/l. Como se observa en la Figura 127, las concentraciones de sulfatos en el agua subterránea cruda están por debajo del valor máximo admisible (400 mg/l), establecido en el decreto 1076 de 2015 para la destinación del uso del agua para consumo humano y doméstico con tratamiento convencional o solo desinfección.

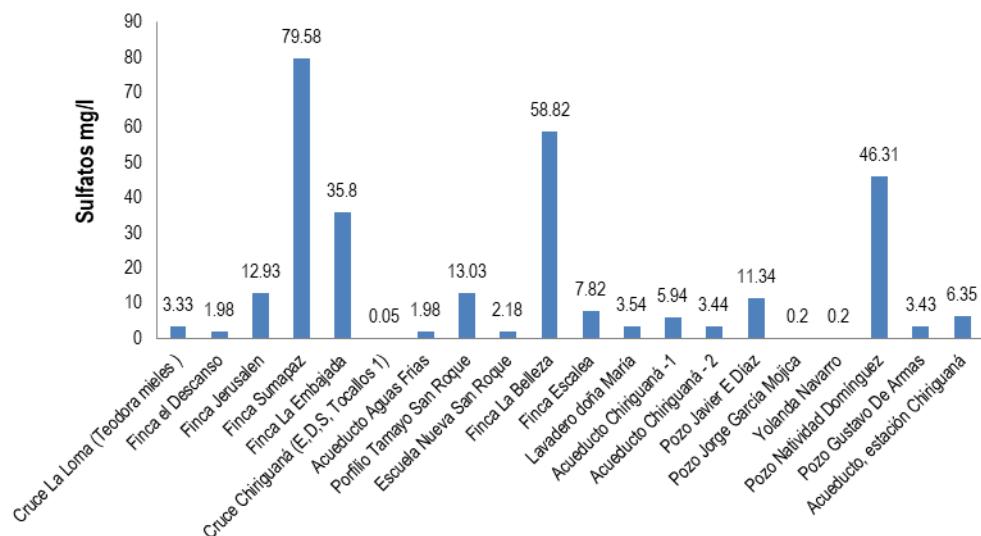


Figura 127. Sulfatos en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

• Magnesio

El magnesio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, razón por la cual es uno de los iones más frecuentes en la composición del agua subterránea. El magnesio contribuye notablemente, junto con el calcio en la caracterización de la dureza del agua. El contenido en magnesio de un agua depende casi exclusivamente de los terrenos que atraviesa. En aguas subterráneas no contaminadas, usualmente los valores de las concentraciones de magnesio no superan los 50 mg/l (UNESCO, 1996).

Las concentraciones de magnesio se presentaron en un rango comprendido entre 0.21 y 15.46 mg/l. El decreto 1076 de 2015 no establece valor admisible para la destinación del recurso en consumo humano y doméstico, la resolución 2115 de 2007 establece un valor máximo admisible de 36 mg/l de magnesio para el agua potable, sin embargo este valor sería solo referencia para aquellos casos donde el agua se utiliza directamente, ningún pozo de monitoreo supera el valor de referencia (Figura 128).

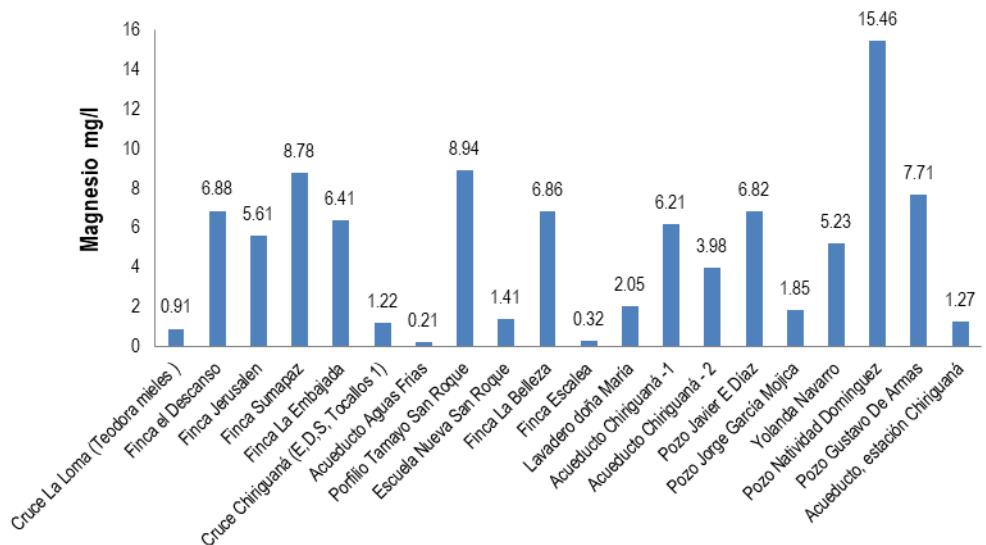


Figura 128. Magnesio en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

- Hierro

El hierro (Fe) en aguas subterráneas suele encontrarse en forma de Fe+2 aunque puede presentarse como Fe+3, FeOH+2, FeOH+ en función del pH, contenido de oxígeno y a menudo relacionado con el contenido de algunos elementos como carbonatos, bicarbonatos y sulfatos entre otros en el agua. La concentración de este elemento en el agua está controlada por procesos de equilibrio químico como oxidación-reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros, formación de complejos especialmente con materia orgánica y también por la actividad metabólica de animales y plantas.

Valores de concentración de hierro entre 1 y 10 mg/l, pueden ser comunes aunque aguas con pH entre 6 y 8 pueden presentar concentraciones de hasta 50 mg/l, cuando los bicarbonatos se encuentran por debajo de 61 mg/l. Lo más normal es que se encuentre en concentraciones inferiores a 0.1 mg/l. (IGME, 1985).

Se tienen concentraciones de hierro en un rango comprendido entre 0.05 y 7.4 mg/l. El decreto 1076 de 2015, establece un valor máximo admisible de 5 mg/l para el uso del agua en actividades agrícolas, para uso en consumo humano y doméstico no existe valor de referencia, sin embargo la resolución 2115 de 2007 establece para el agua potable una concentración máxima de 0.3 mg/l. Como se observa en, las concentraciones de hierro en los pozos de monitoreo exceden en un alto porcentaje el límite máximo admisible para su uso en consumo humano. Para el uso en actividades agrícolas algunas estaciones exceden el valor de referencia (5 mg/l) (Figura 129).

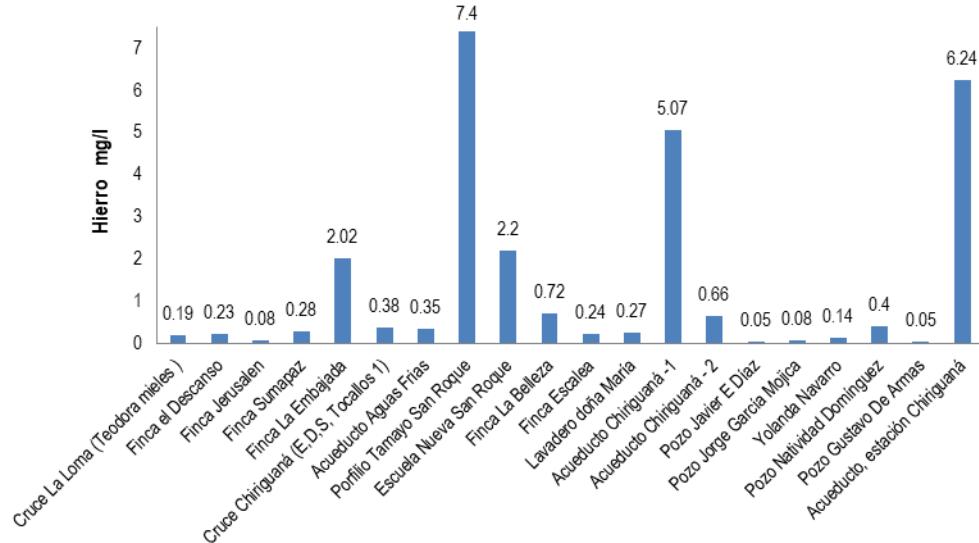


Figura 129. Hierro en pozos de monitoreo sistema acuífero Cesar

2.7.4 Conclusiones de las condiciones geoquímicas y de la calidad del agua en el sistema acuífero Cesar

La confiabilidad de los resultados del laboratorio, fueron analizados por medio del Balance Iónico-BI, dando como resultado que solo veinte 20 PAS cumplen con el BI (% Error <= 10%), por lo tanto la caracterización hidrogeoquímica y la calidad del agua para esa zona del acuífero se determinó con base en la información de 20 pozos de monitoreo. Para la caracterización hidrogeoquímica se deben tener en cuenta los resultados de BI, dado que un imbalance sugiere que el análisis químico puede estar incompleto, ser impreciso, o que las muestras han experimentado cambios químicos durante el tiempo de transporte desde la toma de la muestra en campo hasta su llegada al laboratorio donde se analizan las muestras.

Por otro lado, no se elaboraron los mapas de isoconcentraciones debido baja densidad de PAS objeto de análisis, por lo tanto las conclusiones de la caracterización hidrogeoquímica y la determinación de la calidad del agua está en función de los puntos donde se ubican los pozos de monitoreo. Para lograr una caracterización adecuada en el acuífero es necesario proponer, implementar y operar una red de monitoreo de calidad y niveles acorde con las características hidrogeológicas del acuífero.

Como resultado de la clasificación química del agua por iones dominantes utilizando los diagramas de piper, se tienen en los pozos analizados aguas principalmente Bicarbonatada-Sódica-Potásica; Clorurada-Sódica-Potásica y Bicarbonatada-Cálcica-Magnésica, por su parte con los diagramas de Stiff hay una clasificación con dominancia en aguas Sódicas –Bicarbonatadas. Lo anterior coincide con lo encontrado en el estudio de *Evaluación del Agua Subterránea en el Departamento del Cesar* (INGEOMINAS, 1995) en el que concluyen que las aguas del departamento del Cesar son predominantemente Bicarbonatadas Cálcicas y/o Magnésicas y en segundo lugar Sódicas-Bicarbonatadas.

Las formaciones geológicas y las actividades antrópicas desarrolladas en el sistema acuífero Cesar, pueden incidir de manera significativa en las concentraciones de algunos constituyentes mayoritarios (Mg, Ca, Na, Nitratos, Cloruros), dureza, alcalinidad y conductividad eléctrica, restringiendo el uso del agua para consumo humano y doméstico y riego.

Los resultados obtenidos de la medición de los iones dominantes con respecto a su uso para consumo humano muestran que el 45% de los PAS muestreados exceden los valores de hierro, el 20% los de potasio y en el 20% de ellos el pH esta por debajo del límite permisible. Sin embargo, la concentración de nitratos es en general muy baja (entre 0.003 y 10.17 mg/l), registrándose un valor superior al admisible para consumo humano solamente en uno de los PAS muestreados. Por su parte, para su uso en riego muchos de los PAS muestreados evidencian restricciones. El 15% de ellos presenta altas concentraciones de hierro, el 75% clasifican el agua según el índice RAS de media a muy alta en sodio y el 60% presentan un grado de restricción moderada para su uso en riego por presencia de bicarbonatos.

Adicionalmente, en el estudio titulado *Caracterización Microbiológica y Fisicoquímica de Aguas Subterráneas de los Municipios de La Paz y San Diego* se presentan los resultados de los análisis a 93 aljibes, los cuales mostraron diferentes problemas asociados a la calidad de agua, representados por el elevado contenido de nitratos y nitritos; el exceso en el contenido de sales totales como cloruros, sodio, magnesio, asociados con alta salinidad y conductividad encontrados en algunas zonas, limitando el uso de esta agua para riego y para abrevadero de animales.

Por su parte, el estudio realizado en el año 2009 y denominado *Microbiología de las Aguas Subterráneas en la Región Sur del Municipio de Valledupar* concluyó que el agua de los 10 aljibes muestreados en los sectores de Los Venados y Caracolí no es apta para el consumo humano, ya que presentaron contaminación microbiológica por Coliformes Fecales, Totales y Enterococos. La causa más probable de dicha contaminación es la existencia de pozos sépticos cerca a los aljibes. Lo anterior está en concordancia con lo reportado en el estudio del año 2006 denominado *Aprovechamiento y Protección del Agua Subterránea en las Ecorregiones de los Ríos Cesar y Magdalena* en el que se analizaron muestras de aguas de 94 pozos, 124 aljibes y 10 manantiales en los municipios de Becerril, La Jagua, Agustín Codazzi, El Paso y Chiriguaná encontrando que el 100% de las muestran presentan valores elevados de parámetros bacteriológicos lo que las hacen no aptas para consumo humano.

2.7.5 Recomendaciones

Se recomienda para nuevos estudios de calidad en el sistema acuífero Cesar, seleccionar PAS de los cuales se conocen los diseños de los pozos si estos son de particulares y clasificar las estaciones por tipo (Pozo, aljibe) e incluir manantiales, con lo cual se puede llegar a conclusiones sobre la calidad natural del agua subterránea en el acuífero.

Así mismo, se recomienda verificar la confiabilidad de los resultados del laboratorio a través del Balance Iónico como requisito para evaluar desde el punto de vista hidrogeoquímica y de calidad las muestras de agua subterránea.

Por último, es necesario hacer seguimiento a los pozos de monitoreo que no cumplen con los criterios de calidad en función del uso del agua, a través de medidas correctivas.

2.7 ISÓTOPOS AMBIENTALES

Se denominan isótopos a todos aquellos átomos de un mismo elemento químico que tienen igual número atómico pero diferente número de masa. Los isótopos ambientales están presentes en la naturaleza en gran abundancia y son el resultado de procesos naturales o de actividades antrópicas. Los más comunes son el H, C, N, O y S, siendo los más utilizados en estudios hidrogeológicos los isotopos del Hidrógeno: H₂ (Deuterio); H₃ (Tritio); del Oxígeno: O₁₈, y del Carbono: C₁₃ y C₁₄. Estos isótopos son de gran utilidad para conocer el origen y edad del agua subterránea, las zonas de recarga del acuífero, las direcciones de flujo, los patrones de mezcla y la vulnerabilidad a la contaminación, entre otros (Vélez et al., 2008). Para el sistema acuífero Cesar no se ha realizado ningún estudio con isótopos ambientales, por lo tanto no es posible desarrollar este capítulo.

2.8 HIDRÁULICA DE POZOS

El conocimiento de los valores de los principales parámetros hidráulicos de los acuíferos es muy importante, ya que permite identificar el comportamiento del flujo subterráneo. Su obtención debe hacerse tanto al nivel de investigaciones de datos de campo mediante la ejecución de pruebas de bombeo, como al nivel de recopilación de información existente confiable. Los parámetros de mayor relevancia, identificados para la unidad acuífera captada son los siguientes:

- Transmisividad (T) [A/T]

La transmisividad es un parámetro hidrogeológico que se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada. (Custodio & Llamas, 2001).

- Conductividad hidráulica (K)

Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica, es la capacidad de un medio poroso para permitir el movimiento del agua. Se mide numéricamente por medio del coeficiente de permeabilidad de Darcy, Las unidades de K son las de una velocidad (L/T) (Ejemplo: m/seg, m/día).

- Capacidad específica (Ce)

La capacidad específica expresa la relación entre el caudal extraído (Q) de un pozo y el abatimiento (s) observado en el mismo, el cual se debe en parte a las pérdidas de carga atribuidas al acuífero y a las pérdidas de entrada del agua al pasar por las rejillas (PNUD,1972).

- Coeficiente de almacenamiento (S)

Este parámetro es un índice de la capacidad de almacenamiento de las formaciones acuíferas y se define como el volumen de agua liberado por una columna de base unidad y de altura todo el espesor del acuífero cuando el nivel piezométrico desciende una unidad (Sánchez, 2007).

El tipo de acuífero depende del grado exponencial del Coeficiente de Almacenamiento (Tabla 37).

Tabla 37. Grado exponencial del coeficiente de almacenamiento

ACUÍFERO	EXPONENCIAL
LIBRE	$<10^{-3}$
SEMICONFINADO	$10^{-2} - 10^{-3}$
CONFINADO	$>10^{-4}$

2.8.1 Recopilación y análisis de información de trámites de concesión

Durante la revisión de los expedientes de concesión de agua de subterránea de CORPOCESAR, se logró recopilar información de pruebas de bombeo a caudal constante, cuyos resultados se observan en la Tabla 38.

Tabla 38. Pruebas de bombeo recopiladas

ID	Expediente	Datos generales							Prueba de bombeo							Prueba de recuperación				Observaciones			
		Nombre del predio	Municipio	Tipo de PAS	Profundidad (m)	Diametro interior (pulg)	Latitud	Longitud	Fecha realización de la prueba	Hora inicio	Hora final	Duración	Caudal de bombeo (l/s)	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Abatimiento máximo (m)	Capacidad específica	Hora inicio	Hora final	Duración	Recuperación de la columna de agua (m)	Porcentaje abatimiento total	
1	CJA 042 2014	Agropecuaria Chiquinquirá	Chiriguaná	Pozo	30	4	1527143	1057137	N.D	N.D	N.D	4h 30min	1,0	6,7	10,6	3,9	0,25	N.D	N.D	2h 20min	N.D	96%	Sin registros de campo
2	CJA 140 2012	Cartuja 1	Codazzi	Pozo	55	16,0	1542047	1083138	05-may-14	9:44	9:58	14min	36,0	5,6	36,1	30,5	1,18	9:58	10:38	40min	30,4	100%	
3	CJA 140 2012	Cartuja 2	Codazzi	Pozo	63	16	1591745	1084715	06-may-14	6:05	7:15	1h 10min	88	6,04	19,5	13,9	6,33	7:15	9:15	2 h	13,5 2	97%	
4	CJA 140 2012	Cartuja 3	Codazzi	Pozo	51	16,0	1592299	1084962	06-may-14	14:26	15:01	35min	87,0	6,6	31,1	24,4	3,56	15:01	16:11	1h 10min	24,2	99%	
5	CJA 140 2012	Cartuja 4	Codazzi	Pozo	63	16,0	1591599	1084177	05-may-14	10:05	14:35	4h 30min	56,0	7,2	27,9	20,7	2,71	14:35	19:35	5h	20,7	100%	
6	CJA 136 2010	Centro de acopio Coolechera	El Paso	Pozo	60	6,0	1568197	1039744	17-nov-08	7:00	8:50	1h 50min	17,4	15,1	19,5	4,4	3,92	8:50	10:30	1h 40min	4,4	100%	
7	CJA 127 2014	Coopetran-La Loma	El Paso	Pozo	90	8,0	1554164	1050945	15-oct-14	8:00	9:20	1h 20min	1,5	10,0	11,0	1,0	1,52	9:20	10:50	1h 30min	1,0	98%	
8	CJA 072 2010	EDS Callejas	Valledupar	Aljibe	4,6	1,10	1651510	1088188	feb-10	N.D	N.D	40 min	N.D	2,9	4,0	1,1	N.D	N.D	N.D	1h 20 min	1,0	89%	Registros incompletos
9	CJA 013 2012	EDS JABES	Chiriguaná	Pozo	42	4,0	1536743	1056662	oct-11	6:15	10:20	4h 5min	0,2	6,7	10,4	3,7	0,06	10:20	13:20	3h	3,8	101%	
10	CJA 030 2007	EDS Los Tocayos	Chiriguaná	Pozo 2	30	4,0	1530198	1059153	10-sep-14	6:00	10:30	4h 30min	2,6	3,2	6,6	3,4	0,76	10:30	12:50	2h 20min	3,2	94%	
11	CJA 043 2006	EDS San Luis	Curumani	Pozo	47	6	1518078	1061902	10-sep-14	14:00	14:24	24 min	1,0	7,5	33,5	26,0	0,04	14:24	17:04	2h 40min	25,1	96%	
12	CJA 015 2007	EDS El Mulero	Bosconia	Aljibe	18	34	1592205	1022402	02-jul-13	7:10	8:50	1h 40min	3,2	7,4	12,2	4,7	0,68	8:50	17:30	8h 40min	4,8	101%	
13	CJA 139 2010	Finca Ivanisa No. 1	Codazzi	Pozo	41,6	12	1589123	1074234	25-mar-11	7:00	10:40	3h 40min	72,3	3,8	16,3	12,5	5,78	10:40	11:03	23min	11,3	90%	
14	CJA 139 2010	Finca Ivanisa No. 2	Codazzi	Pozo	72	18	1588616	1074124	26-mar-11	7:00	11:00	4h	56,3	2,8	27,0	24,2	2,33	11:00	11:23	23min	22,5	93%	
15	CJA 139 2010	Finca Ivanisa No. 3	Codazzi	Pozo	30	18	1588752	1075374	27-mar-11	7:00	15:00	8h	71	2,7	16,8	14,1	5,04	15:00	15:22	22min	12,5	89%	
16	CJA 170 2013	Lote base militar La Mina Pozo 2	La Jagua	Aljibe	150	47,2	1552919	1069252	N.D	N.D	N.D	N.D	5	150	1083	933	0,01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	Registros incompletos
17	CJA 014 2012	Pozo No. 27 - Predio Lote E	San Diego	Pozo	47	12	1616824	1087224	30-may-12	10:00	11:10	1h 10min	22	3,2	21,9	18,8	1,17	11:10	12:00	50min	18,6	99%	

ID	Expediente	Datos generales							Prueba de bombeo							Prueba de recuperación				Observaciones			
		Nombre del predio	Municipio	Tipo de PAS	Profundidad (m)	Diametro interior (pulg)	Latitud	Longitud	Fecha realización de la prueba	Hora inicio	Hora final	Duración	Caudal de bombeo (l/s)	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Abatimiento máximo (m)	Capacidad específica	Hora inicio	Hora final	Duración	Recuperación de la columna de agua (m)	Porcentaje abatimiento total	
18	CJA 014 2012	Pozo No. 47 - Predio Lote D	San Diego	Pozo	27,5	12	1616740	1087909	31-may-12	10:00	11:40	1h 40min	31,5	2,2	20,8	18,6	1,69	11:40	12:40	1h	18,5	99%	
19	CJA 017 2003	Predio Suarez No. 2	La Paz	Pozo	70	6	1605028	1090987	19-may-11	8:00	11:00	3h	34,8	2,2	30	27,8	1,25	11:00	14:00	3h	27,8	100%	
20	CJA 171 2013	Granja Puerto Bello	El Paso	Pozo	132	12	1555529	1057126	26-jun-14	8:47	12:17	3h 30min	2	0,7	6,7	5,9	0,34	12:17	15:47	3h 30min	5,2	88%	
21	CJA 016 2012	EDS Tractor	Valledupar	Aljibe	5	1,2	1649146	1091273	8-abr-13	11:01	15:01	4h	0,4	2,1	2,2	0,2	2,00	15:01	16:01	1h	0,2	100%	
22	CJA 112 2014	Vivero Bosconia	Bosconia	Pozo	8	1	1596480	1019600	N.D.	N.D.	N.D.	12 h	N.D.	3,6	3,7	0,2	N.D.	N.D.	N.D.	5h	0,2	100%	Registros incompletos
23	CJA 132 2009	Hospital Rosario Pumarejo	Valledupar	Aljibe 1	7,4	1,28	1649581	1090031	06-jul-10	9:38	10:48	1h 10min	0,11	5,1	5,5	0,4	0,28	10:48	11:23	35min	0,28	70%	
24	CJA 132 2009	Hospital Rosario Pumarejo	Valledupar	Aljibe 2	6,7	1,23	1649537	1090196	06-jul-10	12:45	15:45	3h	4,68	4,4	5,7	1,25	3,74	15:45	16:55	1h 10min	1,126	90%	

Según la Tabla 38, la totalidad de pruebas de bombeo recopiladas fueron 24 y se puede observar que los datos recopilados no contienen los datos calculados para Trasmisividad (T), conductividad hidráulica (K), ni coeficiente de almacenamiento (S). Solo 4 pruebas no tienen el dato de caudal bombeado durante la prueba o los registros de campo, datos que son importantes a la hora de procesar los datos recopilados en campo.

Finalmente, 20 pruebas tienen todos los datos necesarios para procesarlas en la versión de prueba de AquiferTest. Los resultados se muestran en la Tabla 39 y sus gráficas correspondientes en el Anexo 2.

Tabla 39. Pruebas de bombeo procesadas

ID	Expediente	Nombre del predio	Municipio	Tipo de PAS	Latitud	Longitud	Caudal de bombeo (l/s)	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Abatimiento máximo (m)	Capacidad específica	Trasmisividad (T) (m ² /d)	Conductividad hidráulica (K) (m/d)	Coeficiente de almacenamiento (S) (m)
2	CJA 140 2012	Cartuja 1	Codazzi	Pozo	1542047	1083138	36,0	5,6	36,1	30,5	1,18	34,8	0,70	1,93E-01
3	CJA 140 2012	Cartuja 2	Codazzi	Pozo	1591745	1084715	88	6,04	19,5	13,9	6,33	747	13,1	7,07E-06
4	CJA 140 2012	Cartuja 3	Codazzi	Pozo	1592299	1084962	87,0	6,6	31,1	24,4	3,56	316	7,12	2,36E-05
5	CJA 140 2012	Cartuja 4	Codazzi	Pozo	1591599	1084177	56,0	7,2	27,9	20,7	2,71	224	4,01	2,20E-03
6	CJA 136 2010	Centro de acopio Coolechera	El Paso	Pozo	1568197	1039744	17,4	15,1	19,5	4,4	3,92	375	8,36	9,56E-04
7	CJA 127 2014	Coopetran-La Loma	El Paso	Pozo	1554164	1050945	1,5	10,0	11,0	1,0	1,52	113	1,41	6,68E-03
9	CJA 013 2012	EDS JABES	Chiriguaná	Pozo	1536743	1056662	0,2	6,7	10,4	3,7	0,06	3,61	0,10	7,32E-03
10	CJA 030 2007	EDS Los Tocayos	Chiriguaná	Pozo 2	1530198	1059153	2,6	3,2	6,6	3,4	0,76	56,6	2,11	2,03E-02
11	CJA 043 2006	EDS San Luis	Curumani	Pozo	1518078	1061902	1,0	7,5	33,5	26,0	0,04	71,7	0,02	2,12E-01
12	CJA 015 2007	El Mulero	Bosconia	Aljibe	1592205	1022402	3,2	7,4	12,2	4,7	0,68	20,4	1,93	1,78E-01

ID	Expediente		Nombre del predio	Municipio	Tipo de PAS	Latitud	Longitud	Caudal de bombeo (l/s)	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Abatimiento máximo (m)	Capacidad específica	Transmisividad (T) (m ² /d)	Conductividad hidráulica (K) (m/d)	Coeficiente de almacenamiento (S) (m)
13	CJA 2010	139	Finca Ivanisa No. 1	Codazzi	Pozo	1589123	1074234	72,3	3,8	16,3	12,5	5,78	944	25,0	6,84E-06
14	CJA 2010	139	Finca Ivanisa No. 2	Codazzi	Pozo	1588616	1074124	56,3	2,8	27,0	24,2	2,33	418	6,04	1,00E-07
15	CJA 2010	139	Finca Ivanisa No. 3	Codazzi	Pozo	1588752	1075374	71	2,7	16,8	14,1	5,04	1020	37,5	1,13E-06
17	CJA 2012	014	Pozo No. 27 - Predio Lote E	San Diego	Pozo	1616824	1087224	22	3,2	21,9	18,8	1,17	159	3,63	4,06E-06
18	CJA 2012	014	Pozo No. 47 - Predio Lote D	San Diego	Pozo	1616740	1087909	31,5	2,2	20,8	18,6	1,69	224	8,85	7,94E-04
19	CJA 2003	017	Predio Suarez No. 2	La Paz	Pozo	1605028	1090987	34,8	2,2	30	27,8	1,25	159	2,34	3,41E-05
20	CJA 2013	171	Granja Puerto Bello	El Paso	Pozo	1555529	1057126	2	0,7	6,7	5,9	0,34	20,2	0,15	5,06E-03
21	CJA 2012	016	EDS Tractor	Valledupar	Aljibe	1649146	1091273	0,4	2,1	2,2	0,2	2,00	19	6,56	5,80E-02
23	CJA 2009	132	Hospital Rosario Pumarejo	Valledupar	Aljibe 1	1649581	1090031	0,11	5,1	5,5	0,4	0,28	8,47	3,68	1,11E-02
24	CJA 2009	132	Hospital Rosario Pumarejo	Valledupar	Aljibe 2	1649537	1090196	4,68	4,4	5,7	1,25	3,74	256	111	2,07E-02

En la Figura 130, se muestra la ubicación de las pruebas de bombeo dentro de la zona del sistema acuífero Cesar.

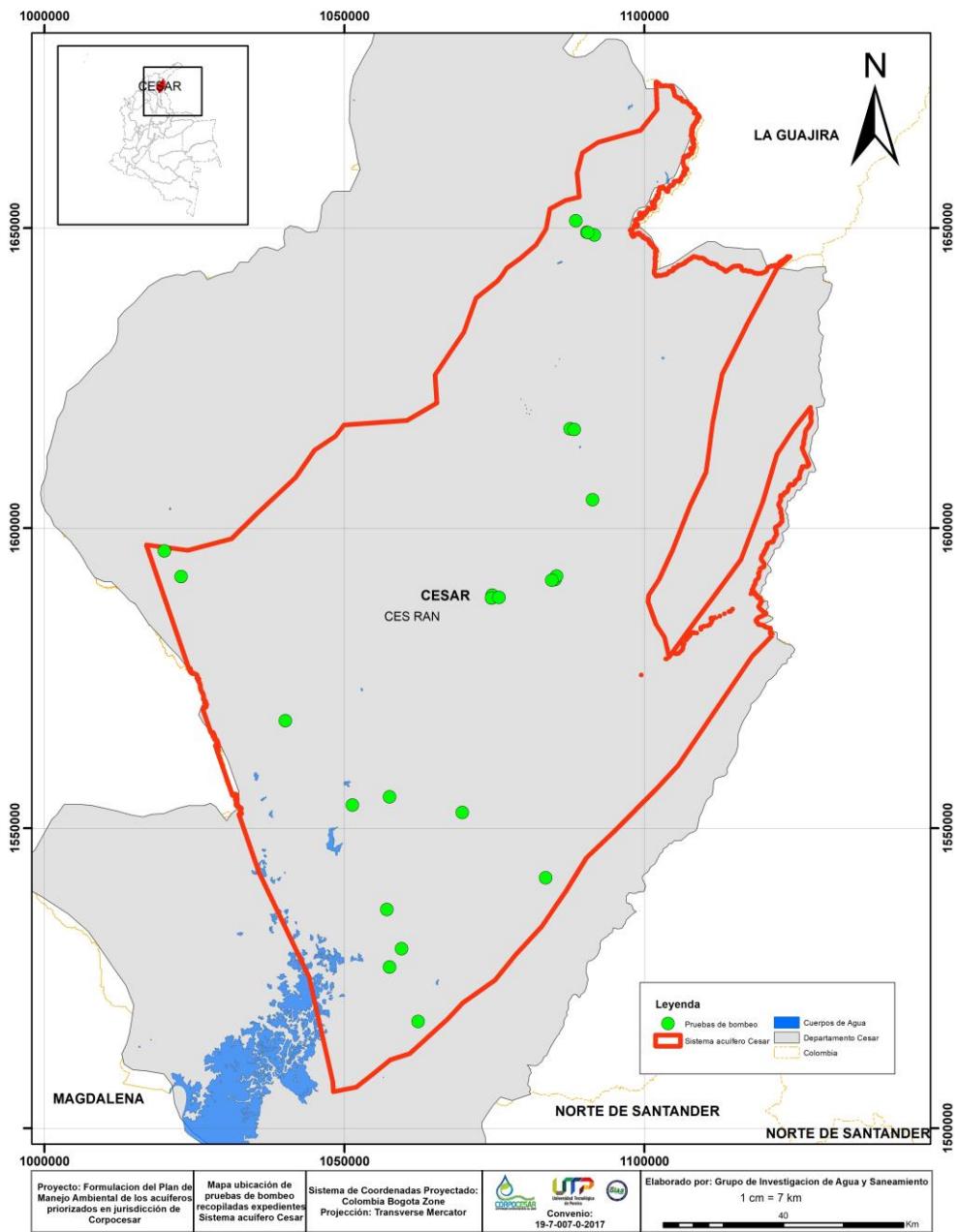


Figura 130. Ubicación de las pruebas de bombeo recopiladas de los expedientes.

2.8.2 Caudal constante

La metodología para su realización es simple, consiste en bombejar los pozos a caudal constante, siguiendo la evolución del nivel del agua, debida al bombeo, tanto en el mismo pozo de bombeo como en otros pozos cercanos, cuando se disponga de estos para observación.

- CORPOCESAR

En información recopilada en CORPOCESAR, se logró obtener la siguiente información de pruebas de bombeo a caudal constante en la zona de estudio (Tabla 40).

Tabla 40. Pruebas de bombeo recopiladas a través de CORPOCESAR

ID	Datos generales					Prueba de bombeo										Duración	Recuperación de la columna de agua (m)	Porcentaje abatimiento total	T (m ² /d)	S (m)	K (m/d)	L (m)	
	Nombre del predio	Municipio	Tipo de PAS	Latitud	Longitud	Fecha realización de la prueba	Duración	Caudal de bombeo (l/s)	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Abatimiento máximo (m)	Capacidad específica	Transmisividad (T) (m ² /d)	Condutividad hidráulica (K) (m/d)	Coeficiente de almacenamiento (S) (m)	L (m)							
1	Centro Materno Infantil Loma	La	El Paso	Pozo	1555729	1053291	07-jul-10	5h	1,1	17,0	19,3	2,3	0,5				45 min	1,9	82%				
2	Chiriguana		Piezómetro			10-jun-06	2h 20min	1,8	6,0	12,3	6,3	0,3	20,2	3,4	1,4	6,0	2h 20min	6,2	99%	17,2	1,7		
3	Chiriguana		Piezómetro			10-mar-06	30 min	0,1	7,0	7,1	0,2	0,6	17,2	2,9	0,1	6,0	25 min	0,1	94%	26,4	0,1		
4	Codazzi		Piezómetro			02-jul-06	8h	1,0	3,2	23,4	20,2	0,0	8,3	1,2	1,9	7,0	8 min	20,2	100%	65,9	0,2		
5	El Carmen	Chiriguana	Pozo			06-agosto-10		0,6	5,3	7,9	2,6	0,2											
6	El Paso		Piezómetro			10-abr-06	10h	1,4	12,5	21,6	9,1	0,2	44,5	7,4	0,5	6,0	7h	3,3	36%	44,6	0,5	7,4	6,0
7	La Palmita		Piezómetro			06-jul-06	3 min	1,6	7,9	25,4	17,6	0,1	1,4	0,2	18,0	6,0	50 min	17,5	100%	7,2	3,6		
8	La Palmita		Piezómetro			05-jun-06	8h	3,5	7,4	7,8	0,4	8,7	276,7	46,1	0,2	6,0	1h 30min	0,4	100%	486,6	0,1		
9	Palmagro S.A.							2,4	1,9	18,1	16,1	0,1											
10	Panamá	Chiriguana	Pozo	1546821	1051732	04-agosto-10		2,4	1,6	7,2	5,6	0,4						4,7	83%				
11	Panamá	Chiriguana	Pozo	1546736	1051694	07-agosto-10		0,3	5,7	11,1	5,5	0,1						4,7	86%				
12	Pista Los Nieto	La Jagua	Aljibe	1548072	1077422		10h 30min		1,7	6,8	5,1	0,0					1h 30min	4,4	86%				
13	San Martín	Chiriguana	Pozo	1531348	1058730	05-agosto-10		4,0	3,5	8,9	5,4	0,7						4,6	84%				

De la Tabla 40, se puede concluir que el 61,5% de los datos no tienen coordenadas (8 pruebas), solo una (1) prueba no tiene el dato de caudal de bombeo y solo 6 pruebas (46,1%) cuenta con los valores calculados de transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. En la Figura 131, se observa la ubicación de las pruebas de bombeo que se lograron espacializar coordenadas.

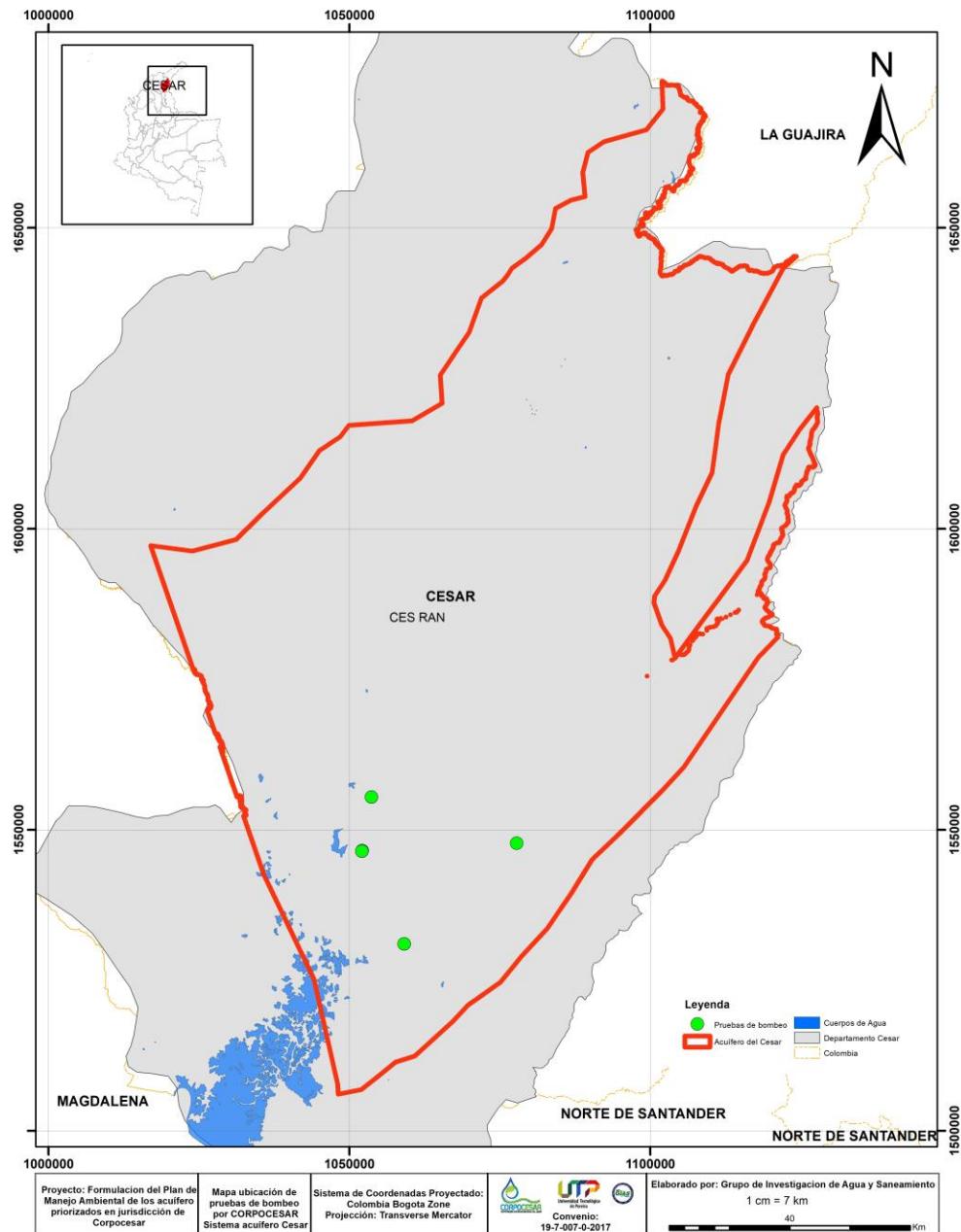


Figura 131. Ubicación pruebas de bombeo realizadas por CORPOCESAR.

- CORPOCESAR – Universidad del Magdalena (Contrato No. 19-6-0061-0-2010)

Durante la “*Formulación del modelo hidrogeológico e hidrológico, conceptual y numérico, en el área donde se ubican proyectos de explotación de carbón, tanto actuales como futuros, en la parte central del Valle del río Cesar, en jurisdicción de los municipios de Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, Curumaní, Chiriquaná y El Paso, en el departamento del Cesar*”, se ejecutaron 60 pruebas de bombeo que representara adecuadamente la distribución espacial de los puntos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el área de estudio durante el año 2010. En las que se determinó el caudal de bombeo y se calcularon los parámetros del acuífero (Nivel Estático, Nivel Dinámico, Capacidad Específica, Permeabilidad y Transmisividad). En la Figura 132, se muestra la ubicación en la zona de estudio y en la Tabla 41, se recopila la información de las pruebas de bombeo.

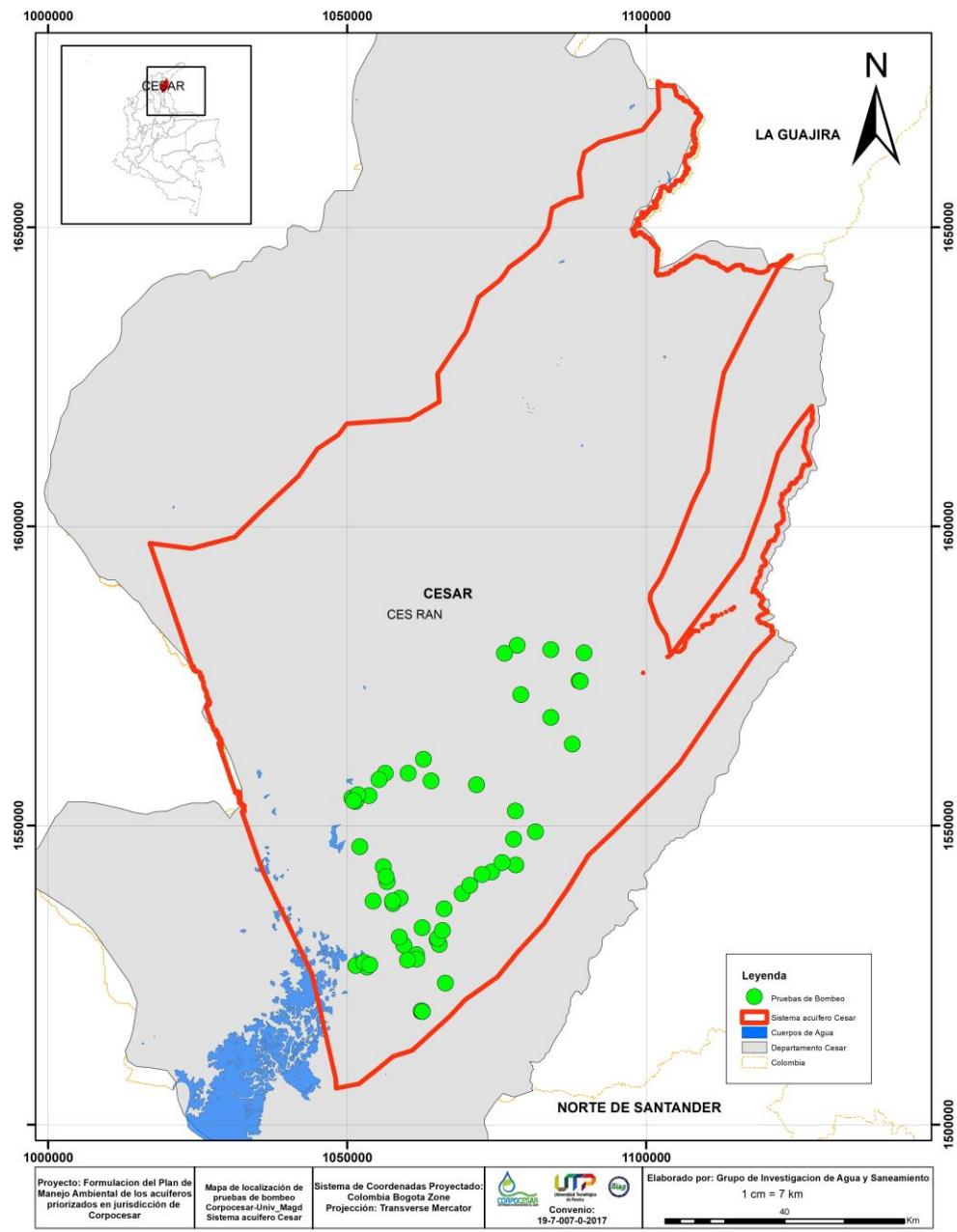


Figura 132. Ubicación de la pruebas de bombeo realizadas por CORPOCESAR – Universidad del Magdalena.

Tabla 41. Pruebas de bombeo ejecutadas por CORPOCESAR y la Universidad del Magdalena

Descripción	No. del pozo	Lat	Long	SECTOR	Capacidad Específica (Lps/m)	Caudal Q (l/s)	Transmisividad T(m ² /dia)	Conductividad (K (m/dia))	Permeabilidad (K (m/s))	Espesor (m)
PB No. 01	Pz No. 102	9,64	-73,50	El Paso	0,444	3,086	94,893	2,579	2,98E-05	42,00
PB No. 02	Pz No. 2	9,56	-73,34	La Jagua	0,276	0,290	8,743	1,691	1,96E-05	5,17
PB No. 03	Pz No. 25	9,50	-73,41	La Jagua	1,169	20,300	264,699	7,256	8,40E-05	36,48
PB No. 04	Pz No. 81	9,47	-73,45	Chiriguaná	0,117	2,120	13,420	0,375	4,34E-06	35,75
PB No. 05	Pz No. 326	9,62	-73,61	El paso	0,196	0,220	1,001	0,052	5,97E-07	19,39
PB No. 06	Pz No. 312	9,61	-73,62	El paso	0,269	0,830	8,243	0,165	1,91E-06	50,00
PB No. 07	Pz No. 370	9,36	-73,60	Chiriguaná	2,956	0,525	632,995	5,367	6,21E-05	117,94
PB No. 08	Pz No. 57	9,40	-73,49	Chiriguaná	0,283	2,170	21,858	0,210	2,43E-06	104,28
PB No. 09	Pz No. 306	9,65	-73,57	El paso	0,626	4,300	61,367	1,712	1,98E-05	35,84
PB No. 10	Pz No. 354	9,49	-73,56	Chiriguaná	0,859	5,250	107,935	2,159	2,50E-05	50,00
PB No. 11	-	9,45	-73,56	Chiriguaná	1,202	0,920	41,470	7,839	9,07E-05	5,29
PB No. 12	Pz No. 364	9,39	-73,54	Chiriguaná	0,396	1,420	35,359	2,464	2,85E-05	14,35
PB No. 13	Pz No. 110	9,73	-73,32	Becerril	0,439	1,170	12,588	2,189	2,53E-05	5,75
PB No. 14	Pz No. 336	9,61	-73,61	El paso	0,304	9,520	17,509	0,887	1,03E-05	19,75
PB No. 15	Pz No. 316	9,61	-73,61	El Paso	2,328	46,656	131,441	91,279	1,06E-03	1,44
PB No. 16	Pz No. 168	9,29	-73,51	Curumaní	1,429	5,100	68,459	1,281	1,48E-05	53,44
PB No. 17	Pz No. 79	9,46	-73,55	Chiriguaná	2,164	3,120	243,318	4,866	5,63E-05	50,00
PB No. 18	Pz No. 51	9,39	-73,49	Chiriguaná	1,500	0,310	151,818	82,510	9,55E-04	1,84
PB No. 19	Pz No. 333	9,46	-73,59	Chiriguaná	3,208	10,730	235,970	4,719	5,46E-05	50,00
PB No. 20	Pz No. 127	9,79	-73,27	Becerril	1,537	0,570	60,811	4,590	5,31E-05	13,25
PB No. 21	Pz No. 371	9,36	-73,61	Chiriguaná	1,442	2,500	52,926	1,059	1,23E-05	50,00
PB No. 22	Pz No. 65	9,45	-73,48	Chiriguaná	0,097	5,550	18,867	1,378	1,60E-05	13,69
PB No. 23	Pz No. 401	9,62	-73,59	El paso	0,599	0,680	79,611	1,592	1,84E-05	50,00
PB No. 24	Pz No. 380	9,37	-73,60	Chiriguaná	0,366	3,700	33,118	1,862	2,15E-05	17,79
PB No. 25	Pz No. 27	9,55	-73,37	La Jagua	1,072	17,500	33,639	5,488	6,35E-05	6,13
PB No. 26	Pz No. 126	9,79	-73,27	Becerril	1,181	28,000	33,490	6,977	8,08E-05	4,80
PB No. 27	Pz No. 309	9,64	-73,58	El paso	0,670	2,500	53,081	0,458	5,30E-06	115,96
PB No. 28	Pz No. 352	9,51	-73,57	Chiriguaná	0,744	0,280	720,787	9,089	1,05E-04	79,30
PB No. 29	Pz No. 43	9,51	-73,37	La Jagua	0,237	1,920	6,721	3,278	3,79E-05	2,05
PB No. 30	Pz No. 7	9,59	-73,37	La Jagua	0,683	0,130	20,000	3,300	3,82E-05	6,06
PB No. 31	Pz No. 402	9,33	-73,48	Curumaní	1,193	21,000	158,947	8,940	1,03E-04	17,78
PB No. 32	Pz No. 328	9,62	-73,61	El paso	0,663	1,780	82,362	1,647	1,91E-05	50,00

Descripción	No. del pozo	Lat	Long	SECTOR	Capacidad Específica (Lps/m)	Caudal Q (l/s)	Transmisividad T(m ² /dia)	Conductividad (K (m/dia))	Permeabilidad (K (m/s))	Espesor (m)
PB No. 33	Pz No. 56	9,40	-73,49	Chiriguaná	0,406	6,250	38,247	1,941	2,25E-05	19,70
PB No. 34	Pz No. 41	9,50	-73,42	La Jagua	0,423	2,300	54,740	3,885	4,50E-05	14,09
PB No. 35	Pz No. 119	9,77	-73,36	Becerril	1,132	0,200	41,781	4,064	4,70E-05	10,28
PB No. 36	Pz No. 257	9,69	-73,28	Becerril	32,857	0,250	2889,326	905,745	1,04E-04	3,19
PB No. 37	Pz No. 21	9,63	-73,43	La Jagua	0,079	0,340	4,597	0,066	7,67E-07	69,40
PB No. 38	Pz No. 346	9,54	-73,61	Chiriguaná	0,060	0,830	2,227	0,045	5,16E-07	28,00
PB No. 39	Pz No. 26	9,52	-73,39	La Jagua	0,059	1,130	18,320	8,106	9,38E-05	10,64
PB No. 40	Pz No. 136	9,83	-73,26	Codazzi	2,573	16,390	385,481	4,039	4,67E-05	95,45
PB No. 41	Pz No. 288	9,29	-73,51	Curumaní	0,249	0,830	7,971	1,560	1,81E-05	5,11
PB No. 42	-	9,67	-73,51	La Jagua	0,491	0,800	17,159	1,691	1,96E-05	10,15
PB No. 43	Pz No. 399	9,36	-73,59	Chiriguaná	1,057	3,350	33,454	7,241	8,38E-05	4,62
PB No. 44	Pz No. 356	9,49	-73,57	Chiriguaná	3,369	3,740	324,659	18,942	2,19E-04	17,14
PB No. 45	Pz No. 79	9,46	-73,55	Chiriguaná	0,735	3,220	55,078	1,551	1,80E-05	35,50
PB No. 46	Pz No. 360	9,46	-73,56	Chiriguaná	0,218	0,376	39,234	2,872	3,32E-05	13,66
PB No. 47	Pz No. 179	9,29	-73,51	Curumaní	1,120	1,120	32,657	10,205	1,18E-04	1,12
PB No. 48	-	9,40	-73,55	Chiriguana	0,948	6,520	97,179	2,490	2,88E-05	39,02
PB No. 49	-	9,42	-73,51	Chiriguana	0,641	2,730	24,585	0,776	8,98E-06	31,70
PB No. 50	Pz No. 165	9,29	-73,51	Curumaní	2,333	0,210	107,994	30,768	3,56E-04	3,51
PB No. 51	-	9,84	-73,37	Codazzi	0,473	1,400	65,977	2,085	2,41E-05	31,65
PB No. 52	-	9,83	-73,39	Codazzi	1,379	2,400	218,564	6,713	7,77E-05	32,56
PB No. 53	-	9,48	-73,44	La Jagua	0,920	4,350	32,163	4,851	5,61E-05	6,63
PB No. 54	-	9,38	-73,52	Chiriguaná	5,469	1,750	594,483	21,673	2,51E-04	27,43
PB No. 55	-	9,65	-73,53	El Paso	0,259	5,730	26,679	0,562	6,51E-06	47,44
PB No. 56	-	9,37	-73,52	Chiriguaná	0,271	6,250	21,601	0,447	5,18E-06	48,28
PB No. 57	-	9,37	-73,53	Chiriguaná	3,581	4,190	310,883	5,171	5,98E-05	60,12
PB No. 58	Pz No. 59	9,41	-73,48	Chiriguaná	3,500	1,820	170,171	63,026	7,29E-04	2,70
PB No. 59	-	9,84	-73,31	Codazzi	1,570	2,810	143,123	6,021	6,97E-05	23,77
PB No. 60	Pz No. 319	9,61	-73,62	Cruce de la Loma - El Paso	2,129	2,810	158,440	9,431	1,09E-04	16,80

- C.I. PRODECO S.A. 2008

Durante la “Actualización del Modelo Hidrogeológico Matemático para el área de Influencia del proyecto de Explotación Minera Calenturitas, dando Cumplimiento a los requerimientos establecidos En el auto 1805 del 6 de junio de 2008 emitido por el MAVDT”, se llevaron a cabo 3 pruebas de bombeo que se muestran en la Tabla 41 y en la Figura 133 se muestran su ubicación en la zona de estudio.

En la Tabla 42, se puede observar que el PAS de la Finca Corral Grande no le calcularon los datos de transmisividad ni conductividad hidráulica, y se desconoce el motivo por la cual no procesaron la información.

Tabla 42. Pruebas de bombeo realizadas por C.I PRODECO S.A

NOMBRE PREDIO	FINCA EL FLORITO	ACUEDUCTO CASERIO EL BOQUERON	FINCA CORRAL GRANDE
Este	1058761	1075426	1055147
Norte	1560905	1558464	1552448
Fecha	01-ene-05	01-ene-05	01-ene-05
Duración	1h 20min	55min	3h
Caudal de bombeo (l/s)	9,9	10	11,6
Nivel estático (m)	3,41	3,02	2,21
Nivel dinámico (m)	10,64	8,15	3,5
Abatimiento máximo (m)	7,23	5,13	1,29
Capacidad específica (l/s/m)	1,37	1,95	8,99
Transmisividad (T) (m ² /d)	5,06E+01	8,56E+01	
Conductividad hidráulica (K) (m/d)	4,02E+00	2,04E+00	
Duración	3h 40min	1h 10min	40min
Recuperación de la columna de agua (m)	5,55	4,48	1,22
Porcentaje abatimiento total	77%	87%	95%
Transmisividad (T) (m ² /d)	3,51E+02	6,92E+01	
Conductividad hidráulica (K) (m/d)	2,79E+01	1,65E+00	

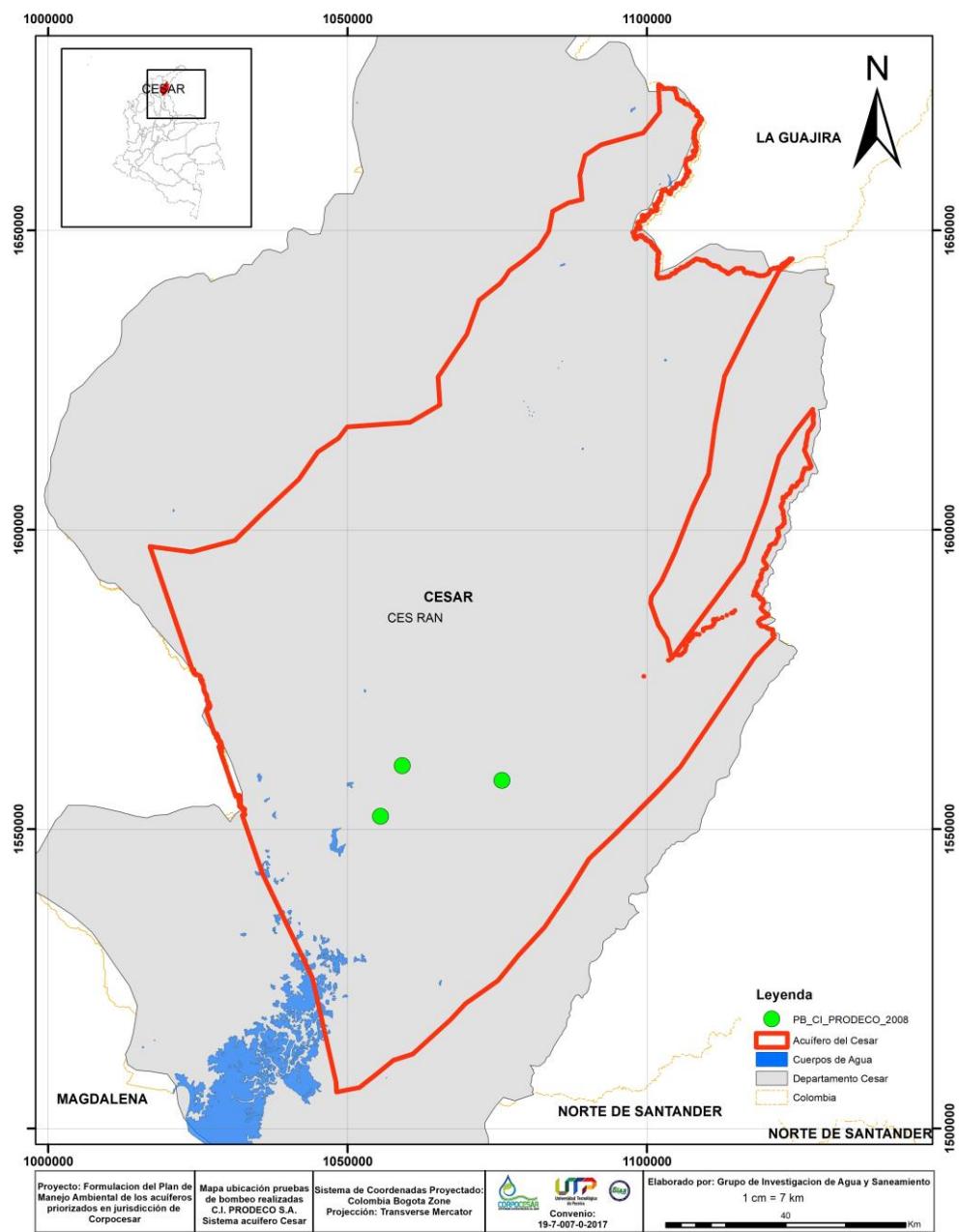


Figura 133. Ubicación de las pruebas de bombeo realizadas por C.I. PRODECO S.A.

■ HIDROGEOCOL LTDA – DRUMMOND LTD 2007

Durante la “Actualización del modelo numérico hidrogeológico en el área del proyecto El Descanso, Rincón Hondo y Similoa” se llevaron a cabo 6 pruebas de bombeo dentro de la zona de estudio, además se recopilaron 5 pruebas de bombeo realizadas por INGEOMINAS en el año 1995 (Tabla 43). En la Figura 134, se muestra la ubicación de la pruebas de bombeo dentro del área de influencia del sistema acuífero Cesar.

Tabla 43. Pruebas de bombeo recopiladas de Hidrogeocol Ltda - Drummond 2007

ID	Predio	Tipo	X	Y	Profundidad (m)	Diametro (pulg)	Fecha	Cauda (l/s)	Duración	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Ablamiento máximo (m)	Capacidad específica (l/sm)	T (m ² /d)	S	K (m/d)	Método	Duración	Nivel recuperado	Recuperación de la columna de agua (m)	Porcentaje ablandamiento total	T (m ² /d)	K (m/d)	Método
47 IV D-02	LA ZANJITA	POZO	1051040	1526931	131	8	may-07	30,4	5h	1,8	19,73	17,93	1,67	232	1,06E-07	3,55	Cooper & Jacob	5h	1,99	17,74	99%	352	7,34	Theis
47 II B-05	SABANA LINDA	POZO	1053646	1555379	85	12	may-07	6,7	12h	13,91	27,81	13,9	0,48	170	1,02E-06	3,55	Theis							
47 II D-03	POTRERILLO	POZO	1045350	1546187	50	6	may-07	4,34	12h	5,46	12,97	7,51	0,58	26,9	1,23E-07	0,99	Cooper & Jacob	2h	14,21	13,6	98%	120	4,4	Theis
48 I A-09	PLAN BONITO	POZO	1063662	1557788	42	6	jun-07	2,91	10h 40min	7,62	16,43	8,81	0,33	26,3	7,08E-07	0,97	Theis							
47 IV B-01	LA AURORA	POZO	1057312	1538669	45	6	may-07	8,13	12h	5,13	14,03	8,9	0,91	65,8	2,01E-06	3,29	Cooper & Jacob	3h 30min	5,88	7,09	94%	80,1	4,01	Theis
40 IV D-01	FINCA LA CHIQUITA	ALJIBE	1057282	1567990	9,7	35,4	may-07	2,9	5min	6,51	7,86	1,35	2,15	62,8	7,52E-06	3,14	Theis							
47 II D-03	POTRERILLO	POZO	1045350	1546187	50	6	abr-94	6	7h 30min	6,28	12,13	5,85	1,02	89,4	1,02E-06	2,2	Cooper & Jacob	3h 30min	8,01	8,42	95%	91,2	5,7	Theis
48 III A-01	RINCÓN HONDO	POZO	1064680	1531235	35	6	abr-94	3,5	5h 50min	8,6	9,97	1,37	2,55	90,5	9,98E-06	2,11	Theis							
48 III C-37	LA SIERRA	POZO	1061250	1528150	22	6	abr-94	6	5h 50min	5,4	14,98	9,58	0,63	110	6,22E-06	5,51	Cooper & Jacob	2h	6,75	5,38	92%	130	6,49	Theis
48 III C-48	FINCA SAN JOSÉ	POZO	1061160	1523420	25	4	abr-94	2,4	5h 50min	2,73	6,64	3,91	0,61	104	9,98E-06	5,22	Theis							
47 II B-07	LA LOMA NO.1	POZO	1054952	1558016	144	8	abr-94	11,5	24h	2,78	26,33	23,55	0,49	61,6	1,02E-04	5,13	Cooper & Jacob	2h 30min	3,32	3,32	85%	80,6	6,71	Theis
														66,1	1,10E-04	2,38	Cooper & Jacob							
														59,4	3,46E-04	2,13	Theis							

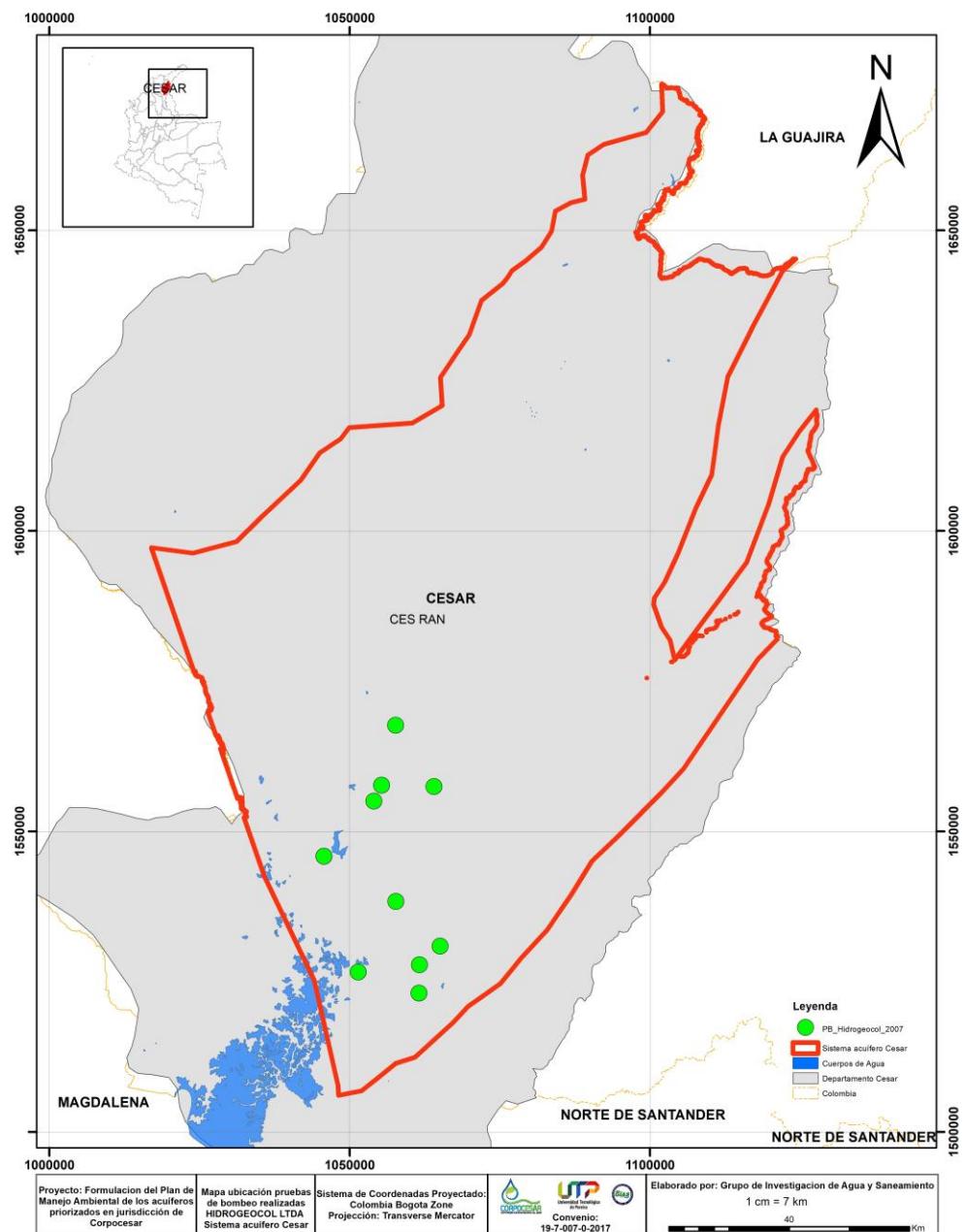


Figura 134. Ubicación de las pruebas de bombeo recopiladas en Hidrogeocol Ltda – Drummond 2007

- CORPOCESAR - INGEOMINAS 1995

Durante la “Evaluación del agua subterránea en el departamento del Cesar” realizada por CORPOCESAR e INGEOMINAS en el año 1995 se ejecutó una recopilación de información existente sobre datos de pruebas de bombeo en 30 puntos diferentes, la cual se complementó con la ejecución en campo de 40 ensayos del mismo tipo,

aprovechando esencialmente la infraestructura ya instalada. Dichos ensayos se hicieron a caudal constante, oscilando entre 2 y 10 l/s y su duración varió entre 3 y 10 horas.

En la Tabla se clasificaron los valores obtenidos de conductividad hidráulica para las pruebas de bombeo analizadas en el departamento del Cesar, para efectos de la descripción de los sistemas acuíferos; estos valores se tendrán en cuenta más adelante para el análisis del sistema acuífero Cesar.

Tabla 44. Clasificación de los valores obtenidos de conductividad hidráulica

Rango en m/día	Clasificación
Mayor de 10	Alta
10^{-1} a 10	Media
10^{-3} a 10^{-1}	Baja
10^{-5} a 10^{-3}	Muy Baja

Fuente: CORPOCESAR – INGEOMINAS, 1995.

Para identificar la ubicación de las pruebas de bombeo realizadas en el sistema acuífero Cesar, se georeferenciaron los mapas hidrogeológicos zona Norte y Sur en la Plancha topográfica del IGAC No. 11 en escala 1:250.000 disponibles en PDF en la página web: <http://www.corpocesar.gov.co/evaluacion-aguas-subterraneas.html>, utilizando el programa ArcGis 9.2; obteniendo la Figura 135.

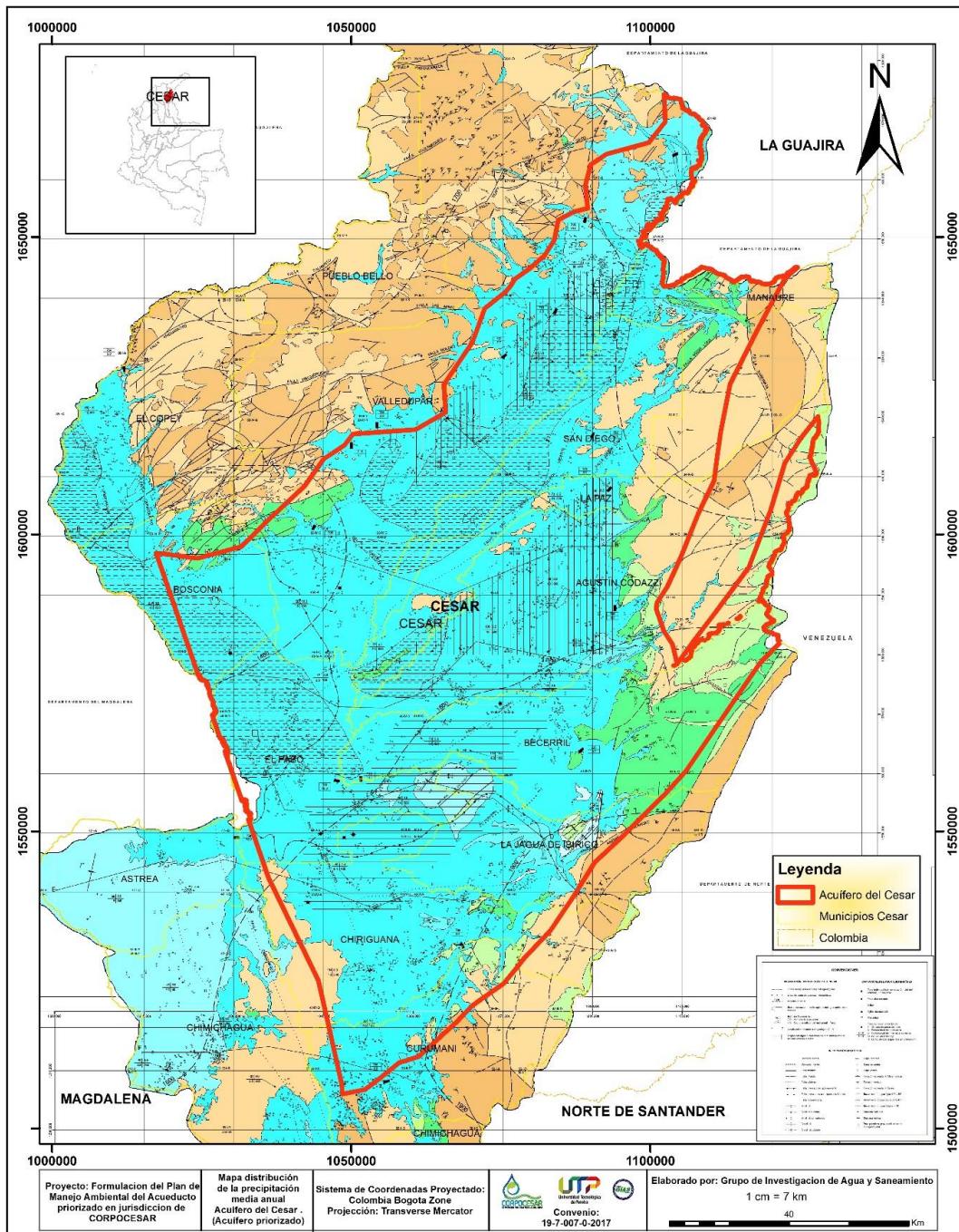


Figura 135. Georeferenciación mapas hidrológicos zona Norte y Sur (Fuente: CORPOCESAR – INGEOMINAS, 1995).

Teniendo en cuenta la Figura 135, se puede observar claramente que existe una margen de error considerable que no permite georeferenciar los puntos de agua subterránea en los que se realizaron pruebas de bombeo y de los cuales se cuenta con información de transmisividad, conductividad hidráulica y en algunos casos el coeficiente de almacenamiento, ver Figura 136. Esta margen de error se presenta muy frecuentemente cuando se manejan

trabajos con mapas exportados como imágenes en PDF, las cuales generan una distorsión perimetral, lo que puede generar sesgos en el análisis de la información; además, como se puede observar en la Figura 136 la imagen no cuenta con una calidad suficiente que permita ver con claridad el número consecutivo del punto inventariado. Por lo tanto, no se tiene a disposición un archivo original que permita especificar la coordenada exacta de cada punto de agua subterránea.

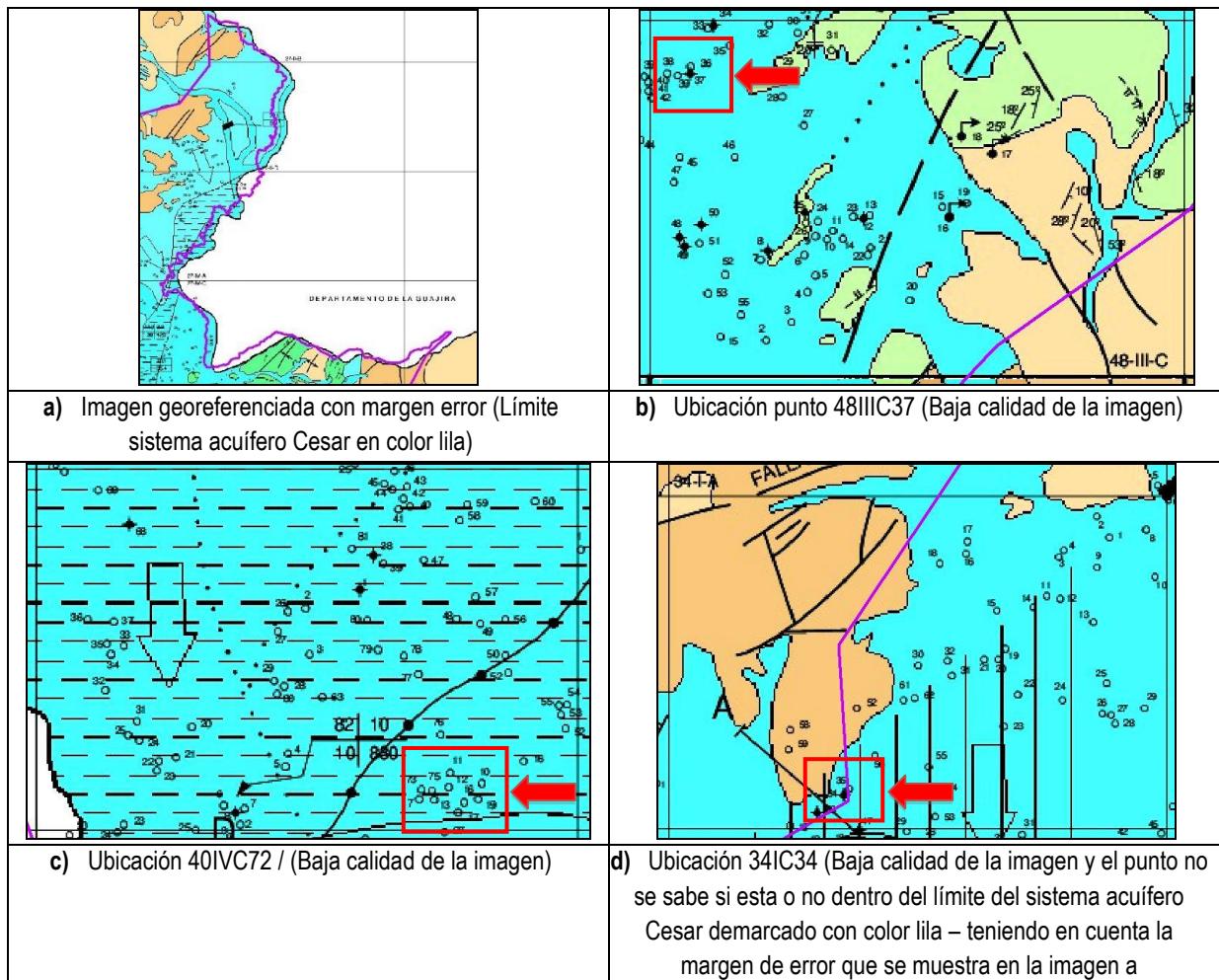


Figura 136. Ejemplos de margen de error y calidad de imagen en la georeferenciación de los mapas hidrogeológicas zona Norte y Sur. Plancha 11 a escala 1:250.000 (Fuente: CORPOCESAR – INGEMINAS, 1995).

Sin embargo, en la Tabla 45 se recopiló la información de 33 pruebas de bombeo, los cuales se seleccionaron de acuerdo al número de la plancha en la que se encuentra ubicado el punto de agua subterránea.

Tabla 45. Parámetros hidráulicos en el sistema acuífero Cesar

ID	Pozo	Sist. acuífero	Transm. (m ² /día)	C. Hidraul. (m/día)	S
1	48IIIC12 /	Kir	50	3	
2	48IIIC48	Kir?	75	6	
3	41IIA17 &	Kmc	260	14	

4	41IB44	Ksl	200	10	
5	27IVC89 "	Qcal, Qlla	1100	14	5E-3
6	27IVC64 "	Qcal, Qlla	2500	31	0.015
7	34IC34	Qlla	13	0.2	
8	27IIIB11	Qlla	33	1	
9	34IIIA47	Qlla	70	3	
10	34IB6 "	Qlla	130	3	
11	41IIIB57	Qlla	70	6	
12	48IIIA1	Qlla	85	9	
13	41IB53	Qlla	300	13	
14	27IID44'	Qlla	1100	14	0.15
15	27IVA28	Qlla	800	44	
16	34IB55 "	Qlla	5000	57	1E-3
17	48IIC37	Qlla	160	80	
18	27IVA33	Qlla	1300	144	
19	48IC-DR^	Qlla		0.2 a 5	
20	48IA18	Tec	15	0.4	
21	48IA20B	Tec	15	2	1E-3
22	48IA20M	Tec	65	6	1E-5
23	48IC-DR^	Tec		8E-3 A 8E-2	1E-5
24	48IC-DR^	Tec (Carbón)		8E-2 A 8	
25	47IIB33	Tmc	80	3	
26	47IIB66	Tmc	90	5	
27	47IIB66	Tmc	140	7	
28	40IVD6	Tmc	270	13	
29	47IIB65	Tmc	600	25	
30	40IVC72 /	Tpaa	1300	36	
31	47IVD39	Tpaa	200	6 A 16	5E-4
32	55IIB7	Tpaa?	80	9	
33	41IB51	Tpb	80	5	

Fuente: CORPOCESAR – INGEOMINAS, 1995 (Drummond (1983)^ -Prodeco (1991)' - Tahal (1972)" - Perfoguajira (Varios)/ - Otros &).

En la Tabla 45 se puede observar que la mayoría de los valores de conductividad hidráulica se encuentran en el rango especificado como conductividad hidráulica Alta según la clasificación presentada en la Tabla . De manera general, se puede concluir que los valores de capacidad específica y transmisividad observados en la Tabla 45, muestran un potencial acuífero en la zona muy importante y unas condiciones hidrogeológicas favorables para su explotación.

2.8.3 Análisis de la recopilación de información de pruebas de bombeo caudal constante

En la Figura 137, se muestra la distribución espacial de las pruebas de bombeo a caudal constante que fueron recopiladas en el presente capítulo y de las que se conocía sus respectivas coordenadas.

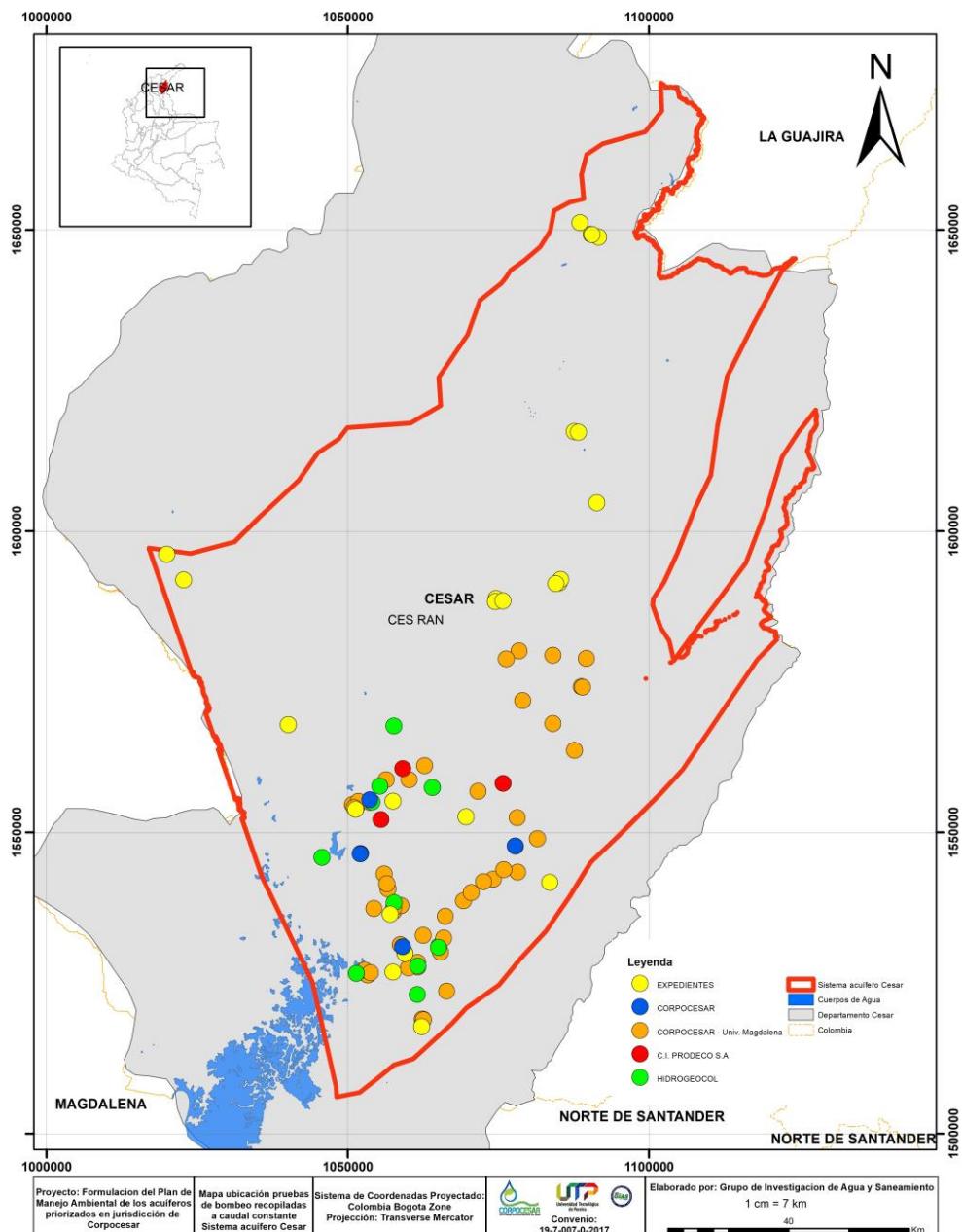


Figura 137. Recopilación de pruebas de bombeo a caudal constante.

Según la información recopilada, las pruebas de bombeo fueron ejecutadas entre los años de 1994 y 2014, para un total de 106 pruebas; en la Tabla 46 se observa la cantidad de pruebas de bombeo realizadas por año.

Tabla 46. Cantidad de pruebas de bombeo según el año de ejecución

Año	Recopiladas en:		No. Pruebas de bombeo
1994	Hidrogeocol - Drummond (INGEOMINAS)		4
2005	C.I. PRODECO S.A	3 pruebas	4
	Hidrogeocol - Drummond	1 prueba	
2007	Hidrogeocol - Drummond		6
2008	Expedientes		1
2010	CORPOCESAR - Universidad del Magdalena	60 pruebas	67
	Expedientes	3 pruebas	
	CORPOCESAR	4 pruebas	
2011	Expedientes		5
2012	Expedientes		2
2013	Expedientes		2
2014	Expedientes		8
Sin fecha	Expedientes	3 pruebas	7
	CORPOCESAR	4 pruebas	
TOTAL			106

En la Figura 138, se puede observar que los valores de la capacidad específica de las pruebas de bombeo recopiladas.

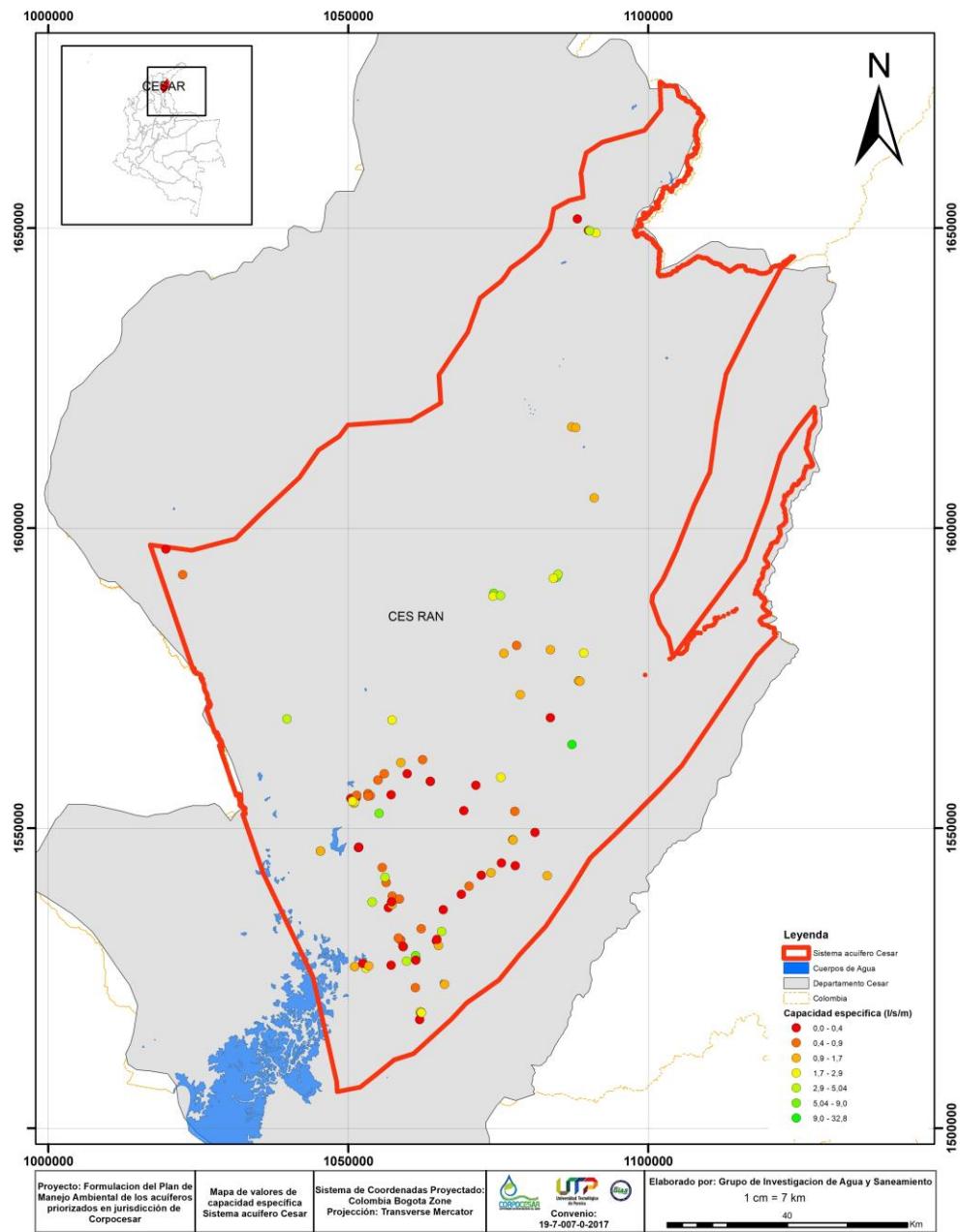


Figura 138. Valores capacidad específica de las pruebas de bombeo recopiladas.

En la Figura 139, se puede observar los valores de trasmisividad de las pruebas de bombeo recopiladas.

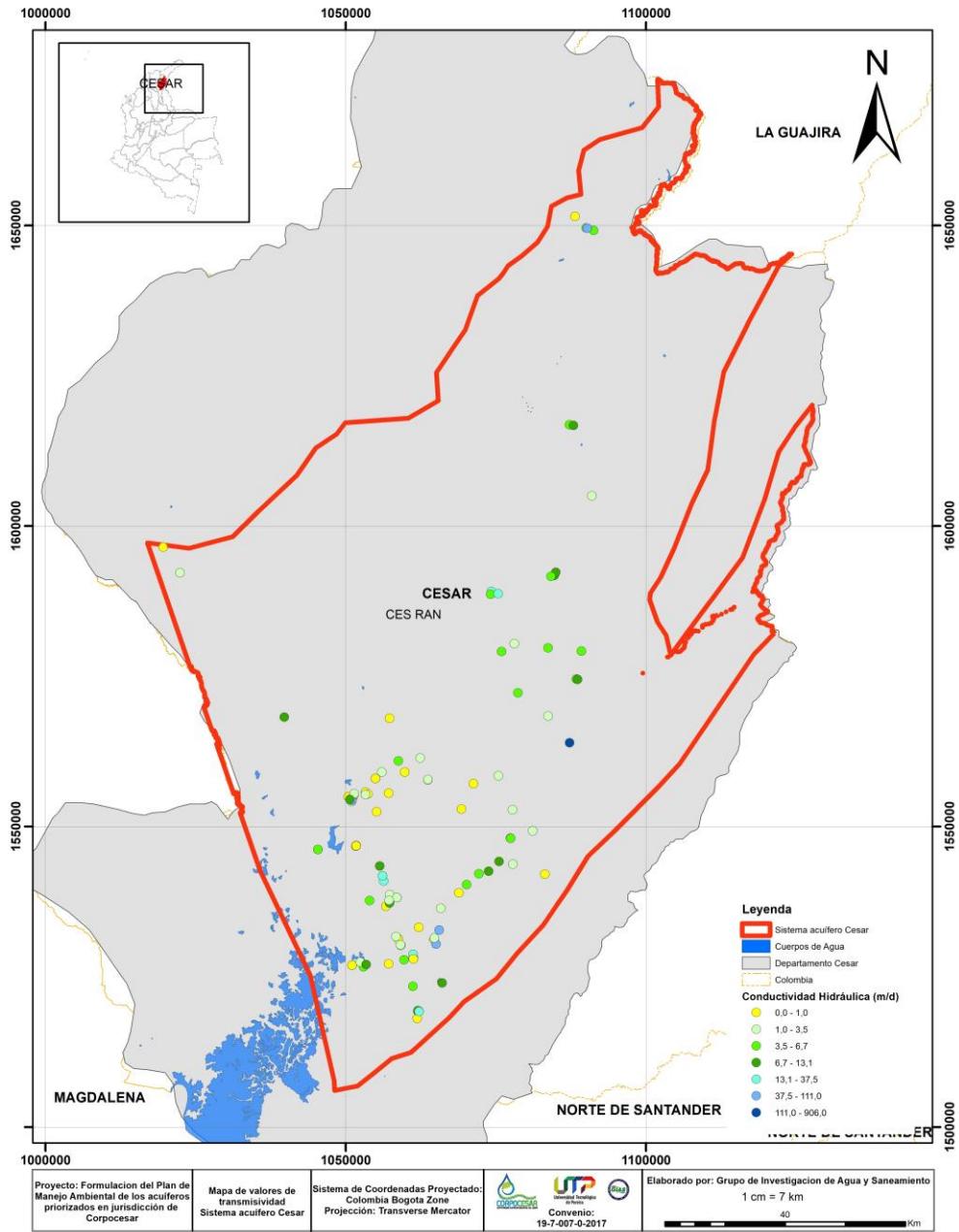


Figura 139. Valores de trasmisividad de las pruebas de bombeo recopiladas.

En la Figura 140, se puede observar los valores de conductividad hidráulica de las pruebas de bombeo recopiladas.

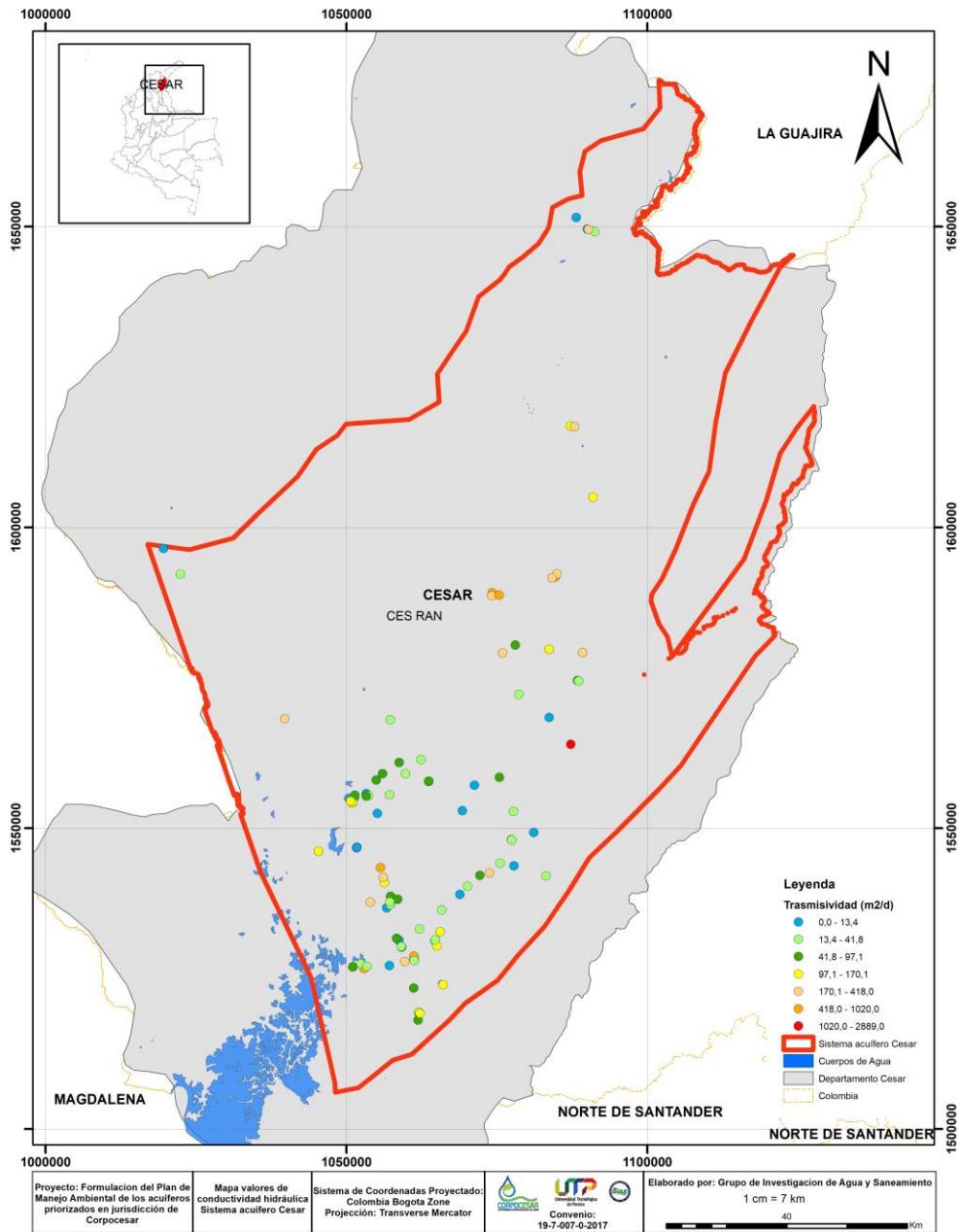


Figura 140. Valores de conductividad hidráulica de las pruebas de bombeo recopiladas.

2.8.4 Caudal escalonado

Para la zona de influencia del sistema acuífero Cesar, se cuenta con una (1) prueba de bombeo a caudal escalonado realizada por funcionarios de CORPOCESAR, que normalmente se utilizan para determinar la curva característica de un pozo; la cual permite fijar los criterios de mantenimiento, determinar costos de extracción de un metro cúbico de agua y seleccionar los equipos de bombeo adecuados (MADS, 2014). En la Tabla 47, se relaciona la mencionada prueba.

Tabla 47. Pruebas de bombeo con caudal escalonado

ID	1		
Nombre del predio	Pista Los Nieto		
Propietario	Hernando Nieto		
Tipo de PAS	Aljibe		
Latitud	1548072		
Longitud	1077422		
Fecha realización de la prueba	09-agosto-10		
Duración	2h	2.5h	6h
Caudal de bombeo (l/s)	3,15	2,39	1,99
Nivel estático (m)	1,7		
Nivel dinámico (m)	6,8		
Abatimiento máximo (m)	5,1		
Capacidad específica (l/s/m)	0,65	1,8	3,11
Recuperación de la columna de agua (m)	4,4		
Porcentaje abatimiento total	86%		

2.8.5 Pruebas tipo Slug Test

En el área que comprende la zona de estudio del sistema acuífero Cesar, se ha llevado a cabo 13 pruebas de bombeo tipo Slug Test (Tabla 48). Sólo a 5 pruebas le determinaron la capacidad específica y transmisividad, y 9 pruebas le determinaron el valor de la conductividad hidráulica. En la Figura 141, se muestra la ubicación de la pruebas de bombeo dentro del área de influencia del sistema acuífero Cesar.

Tabla 48. Características del pozo de monitoreo

ID	Nombre del predio	Tipo de PAS	Coordenaadas		Fecha realización de la prueba	Duración	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Abatimiento máximo (m)	Capacidad específica (l/s/m)	Transmisividad (T)	Conductividad hidráulica (K)	Método
			N	E									
1	Becerril	Piezómetro No. 2	1565046	1085544	05-jul-06	4h 40min	1,19	0,58	0,61	1,19	0,5126	0,56	HVORSLEV
2	Becerril	Piezómetro No. 2	1565046	1085544	10-mar-06	3h 13 min	0,01	0,51				0,15	Bouwer-Rice
3	Chiriguana	Piezómetro No. 4	1526961	1052683	10-mar-06	4h 18min	6,42	6,97	0,55				
4	Chiriguana	Piezómetro No. 4	1526961	1052683	10-mar-06	5h 7min	6,67	6,96	0,29				
5	Chiriguana	Piezómetro No. 4	1526961	1052683	10-mar-06	1h 10min	6,97	6,93	0,04	1,23	0,0325	21,33	HVORSLEV
6	Chiriguana	Piezómetro No. 4	1526961	1052683	10-mar-06	1h 05 min	5,74	6,92				1,12	bouwer-Rice
7	Codazzi	Piezómetro No. 1	1604838	1090994	02-jul-06	4.31 h	6,42	6,97	0,55				
8	Codazzi	Piezómetro No. 1	1604838	1090994	02-jul-06	5h 7min	6,66	6,96	0,3				
9	Codazzi	Piezómetro No. 1	1604838	1090994	03-jul-06	1h 20min	3,14	3,12	0,02	1,23	0,0163	5,54	HVORSLEV
10	Codazzi	Piezómetro No. 1	1604838	1090994	05-jul-06	1h 13 min	1,91	3,11				1,30	Bouwer-Rice
11	El Paso	Piezómetro No. 5	1560349	1036445	20-abr-06	55 min	14,5	14,48	0,02	1,23	0,0163	5,53	HVORSLEV
12	La Palmita	Piezómetro No. 3	1542914	1074214	05-jun-06	4h 10min	7,35	7,31	0,04	1,23	0,0325	1,59	HVORSLEV
13	La Palmita	Piezómetro No. 3	1542914	1074214	05-jun-06	3h 13 mi	6,12	7,27				0,36	Bouwer-Rice

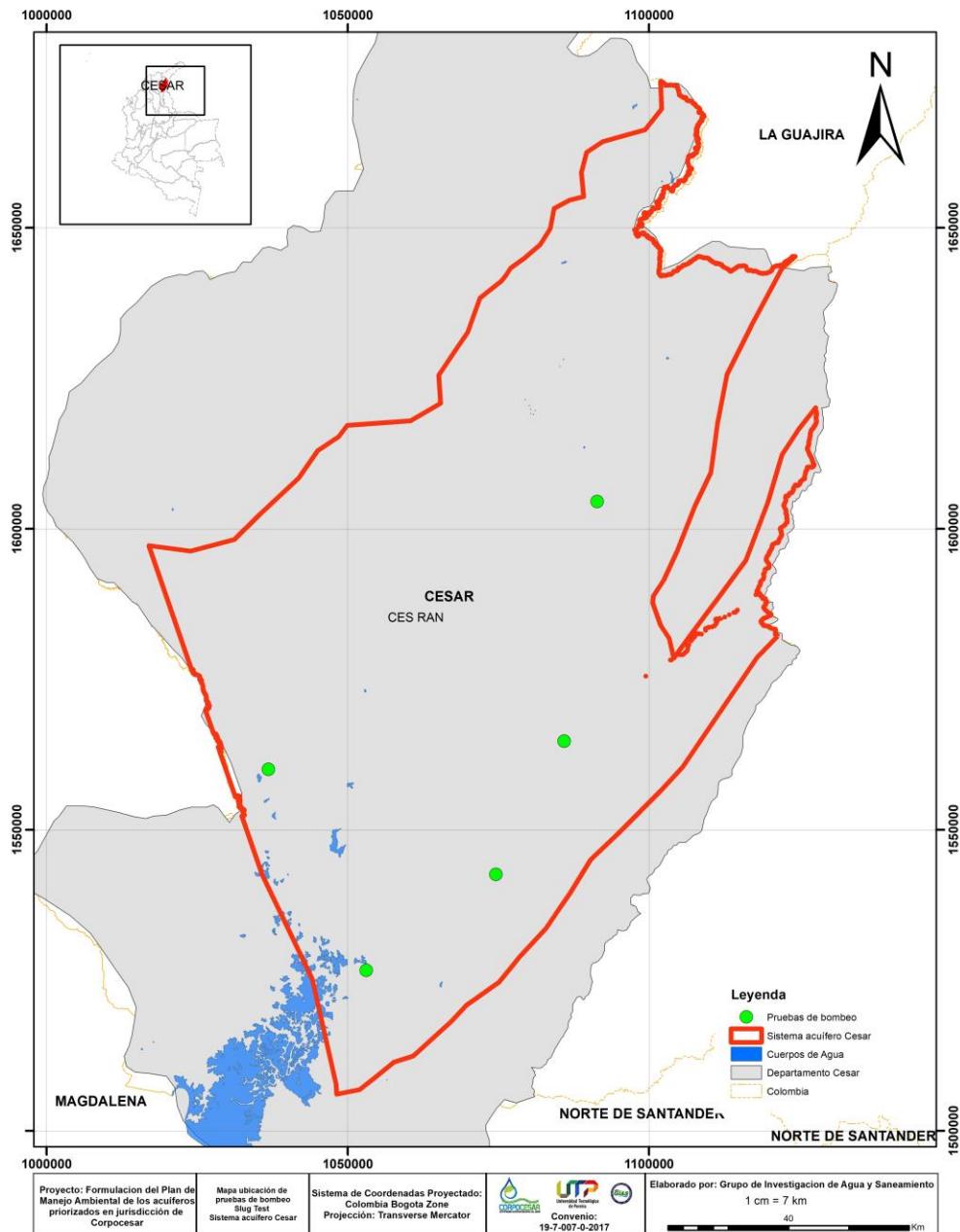


Figura 141. Ubicación pruebas de bombeo tipo Slug Test.

2.8.6 Conclusiones de las características hidráulicas del acuífero

La información recopilada de pruebas de bombeo a caudal constante con mayor distribución durante el año 2010 fue la recopilada en el estudio realizado por CORPOCESAR y la Universidad del Magdalena, lo que permitió de manera general mostrar la distribución espacial de los valores de Capacidad Específica, Trasmisividad y Conductividad Hidráulica para una zona determinada dentro del sistema acuífero Cesar.

Se recomienda actualizar y mejorar el análisis de hidráulica de pozos para el sistema acuífero Cesar, a través de la realización de pruebas de bombeo a caudal constante en Puntos de Agua Subterránea seleccionados, de tal manera que tenga una distribución espacial adecuada para el análisis de los datos procesados, y en la medida de lo posible realizar 2 campañas de pruebas de bombeo durante un periodo seco y uno lluvioso del año.

Para las futuras pruebas de bombeo que se realicen en la zona, se recomienda el almacenamiento de la información que incluya toda la información requerida para el análisis de las mismas (coordenadas, profundidad y diámetro del PAS, caudal bombeado, entre otros).

2.9 REDES DE MONITOREO

El recurso hídrico subterráneo a diferencia del superficial sufre cambios en su cantidad y calidad a tasas muy lentas que ocurren por debajo de la superficie y que abarcan grandes extensiones. Puesto que no es posible determinar dichos cambios con un simple recorrido de campo, se hace necesario contar con una red de monitoreo. El monitoreo de la respuesta de un acuífero y de sus tendencias de calidad son básicos para lograr una gestión eficaz del agua subterránea y controlar los impactos de la extracción y de las cargas de contaminantes sobre el recurso.

2.9.1 Objetivos de una red de monitoreo

Los objetivos de la red de monitoreo de aguas subterráneas dependen de la escala (regional, local), prioridades, intereses y de las necesidades de los usuarios, por ello su determinación es compleja. Los objetivos generales de toda red de monitoreo son (Aller et al., 1991):

- Identificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema de aguas subterránea.
- Definir el estado, en cantidad y calidad, de las aguas subterráneas.
- Identificar los efectos de los procesos naturales y los impactos humanos de los sistemas hidrogeológicos.
- Pronosticar a largo plazo las tendencias en cantidad y calidad de las aguas subterráneas.
- Definir el grado de vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos.
- Definir medidas a ser adoptadas para prevenir la degradación de las aguas subterráneas o restaurar los acuíferos que hayan sido afectados.
- Determinar prioridades y conflictos entre los usuarios de los recursos hídricos subterráneos y otros recursos naturales.

2.9.2 Clasificación de los sistemas de monitoreo

Las redes de monitoreo hidrogeológico se clasifican de manera general en cuatro (4) tipos: 1) Redes **piezométricas**, cuyo fin es modelar la tendencia de las aguas subterráneas y validar las direcciones de flujo locales o regionales; 2) **Redes Hidrogeoquímicas**, que permiten evaluar la evolución de las aguas subterráneas (muestras representativas no contaminadas) y validar las direcciones de flujo obtenidas por la interpretación de los niveles piezométricos, 3) **Redes de Calidad**, que permiten determinar las calidad de las

aguas subterráneas mediante la medición de parámetros físico-químicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox, oxígeno disuelto, alcalinidad, entre otros) y microbiológicos (coliformes fecales y totales) y 4) **Redes para determinar Cantidad**, a través de pruebas de bombeo que puedan ser llevadas a cabo no sólo en los piezómetros seleccionados, sino en pozos, aljibes y manantiales, con el objeto de conocer el comportamiento del acuífero. Los resultados del monitoreo deben ser evaluados regularmente, con el fin de tomar las acciones o medidas correctivas en aquellas zonas o piezómetros en los cuales los valores no sean concordantes con las evaluaciones.

Además, Los sistemas y redes de monitoreo se pueden clasificar de acuerdo a su función en tres grupos principales, que no son mutuamente excluyentes: (Tuinhof et al., 2006).

- Sistemas Primarios o de monitoreo y vigilancia que sirven para detectar cambios generales en el flujo del agua subterránea y sus tendencias de calidad, con objeto de aportar el conocimiento científico necesario para entender el recurso de agua subterránea. Este monitoreo es aplicado a puntos de observación de menor importancia para la red, por lo que su frecuencia de monitoreo será menor.
- Sistemas Secundarios o de monitoreo de protección que se usan principalmente para hacer seguimiento a zonas donde el recurso sea estratégico como por ejemplo donde haya abastecimiento público.
- Sistemas terciarios son para evaluar y controlar el impacto de riesgos específicos del agua subterránea.

Adicionalmente, dado que algunos puntos de monitoreo tendrán mayor relevancia respecto que otros con relación a los planes o políticas adoptadas o según un estudio específico, las redes se pueden clasificar según su importancia relativa en (ACWI, 2009):

- Redes de monitoreo no estresadas: se caracterizan por juntar puntos cuya actividad extractiva es baja a ausente y que no están bajo presión constante como, por ejemplo, cuando no hay bombeo a la superficie. En estos puntos no hay mucha probabilidad de variación en las características a medir.
- Redes de monitoreo focalizadas: son aquellas redes de monitoreo ubicadas sobre cuerpos de agua subterránea perturbados de manera más frecuente, principalmente debido a la manipulación humana. Sus fluctuaciones podrían influir en un cambio en el paisaje o afectar a algún ecosistema existente.

2.9.3 Diseño de la red de monitoreo

Al diseñarse una red de monitoreo de aguas subterráneas es imprescindible definir los siguientes aspectos básicos (Moleiro et al., 2002):

- Los objetivos de la red
- La distribución y representatividad espacial de los puntos de monitoreo
- La frecuencia de la toma de mediciones
- El tipo y número de variables a monitorear

La densidad de pozos de monitoreo depende de varios factores: a) tamaño y heterogeneidad del sistema acuífero, b) Características geológicas e hidrogeológicas del sistema, c) vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

Las frecuencias óptimas para la toma de mediciones depende de aspectos hidrogeológicos (tiempo de residencia, velocidad de flujo) y condiciones climáticas y consideraciones estadísticas. En un acuífero libre la frecuencia de medición y toma de muestras debe ser mayor que en un acuífero confinado.

Para definir las áreas y las variables a monitorear es necesario conocer la litología del acuífero. Los parámetros generales que se miden en una red de monitoreo se presentan en la Tabla 49.

Tabla 49. Parámetros propuestos para medir en la red de monitoreo de calidad de agua.

Parámetros de campo	pH Temperatura (T°C) Conductividad eléctrica (CE) ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Potencial Redox (Eh) Oxígeno disuelto (OD)
Parámetros de Laboratorio Físico-Químicos	Iones mayores: Ca, Mg, Na, K, HCO ₃ , CO ₃ , Cl, SO ₄ , NO ₃ . Iones Menores: Fe, Si, Mn. Iones Traza: As. Otros parámetros: dureza total y alcalinidad total. Sólidos Disueltos Totales Color Turbiedad Conductividad eléctrica del agua Indicadores de contaminación NO ₃ PO ₄ Hidrocarburos Totales (Estaciones de Gasolina) Indicadores de contaminación microbiológica Coliformes totales y fecales

Para tener muestras representativas de las condiciones del acuífero es ideal instalar pozos de monitoreo a distintas profundidades con rejillas a intervalos conocidos. Si se utilizan pozos ya existentes, se debe conocer las características de diseño y la información de su construcción. Si se usan pozos ya existentes de abastecimiento de agua para el monitoreo, se debe tener en cuenta que se puede obtener muestras de agua que puede ser una mezcla de diferentes aportes.

Herrera-Zamarrón (2009) establecen que los insumos para el diseño de una red de monitorio óptima son:

1. Estudio hidrogeológico del acuífero (modelo conceptual del acuífero).
2. Estudio hidrogeoquímico del acuífero (entendimiento de la problemática de calidad del agua del acuífero).

3. Revisión en campo de los pozos que pueden conformar la red de monitoreo y escoger el o los que reducen al máximo la suma de la varianza del error de la estimación de los abatimientos en todos los puntos de estimación (varianza total)(Herrera-Zamarrón; Simuta-Champo y Bravo, 2007).
4. Establecer objetivos de la red de monitoreo (Traducir objetivos en términos matemáticos y diseño de la red de monitoreo), es decir que cada nuevo pozo que se añade a la red es aquel que resulta en una varianza total menor.
5. Evaluación de la red de monitoreo (criterios hidrogeológicos, criterios de calidad del agua y validación estadística).
6. Seguimiento, evaluación y modificación de la red de monitoreo.

La calidad de la información colectada es un factor importante para el diseño de las redes de monitoreo, la cual es obtenida de los pozos tanto de la Corporación como de los actualmente son inspeccionados o monitoreados; es de resaltar que un los modelos hidrogeológicos poseen diversas interpretaciones tanto cualitativas como subjetivas, cuya validez es probada a través de un continuo seguimiento de sus variables y propiedades, haciendo un factor determinante la operación de una red de monitoreo de manera sistemática.

2.9.4 Red de monitoreo para el sistema acuífero Cesar

El sistema acuífero Cesar en la actualidad cuenta con cinco (5) piezómetros propiedad de Corpocesar (Figura 142), sin embargo, estos se hacen insuficientes para monitorear las variaciones del acuífero en el tiempo. Las características generales de los piezómetros se muestran en la tabla 50.

Tabla 50. Características de los piezómetros realizados por CORPOCESAR (2005).

Piezómetro	Prof. Perforada (m)	Prof. Registrada (m)	Intervalo Filtros (m)	Nro. de filtros	Conductividad Hidráulica (K) m/día	Litología	Observaciones
Chiriguaná	35	31,5	6-9 y 10,5-13,5	2	2,3x10e1	Depósito de Cuaternario e intervalos de arenas de grano fino y arcillas rojas a pardas bastantes solubles.	Se captaron los primeros 15 metros que presentaban aguas dulces, los resultados del registro eléctrico muestran la presencia de aguas ligeramente salobres. Conductividad 95 $\mu\text{s}/\text{cm}$ que confirman el carácter de aguas dulces de las aguas almacenadas en los primeros metros del depósito aluvial.
El Paso	40	39	26,5-35,5	1	5,5	Depósito de Cuaternario e intervalos de arenas de grano fino y arcillas rojas a pardas bastantes solubles.	Conductividad del orden 558,4 $\mu\text{s}/\text{cm}$ que confirman un agua con mayor contenido iones cationes e indican que el agua almacenada en los primeros metros de formación Cuesta. El PH medido es del orden los 7,65 unidades lo que confirma que el agua es casi de PH neutro y de un carácter ligeramente básico.

Piezómetro	Prof. Perforada (m)	Prof. Registrada (m)	Intervalo Filtros (m)	Nro. de filtros	Conductividad Hidráulica (K) m/día	Litología	Observaciones
Becerril	16,5	15,5	13-15	1	0,56	Depósito de Cuaternario de bloques rocas ígneas y fragmentos de arenas, calizas dentro de una matriz arenosa arcillosas y Lutitas negras con un lente de caliza gris fracturada de la formación La Luna.	Conductividad del orden 650 $\mu\text{s}/\text{cm}$ que confirman un agua con mayor contenido iones cationes e indican que el agua almacenada en las calizas de la formación La Luna. pH ligeramente básicos (8)
La Palmita (La Jagua)	32	30	18-29 (18-21 y 26-29)	2	1,59	Depósito de Cuaternario e intervalos de arenas de grano fino a medio con arcillas rojas a pardas bastantes solubles.	Conductividad del orden 76 $\mu\text{s}/\text{cm}$ que confirman un agua con muy poco transporte dentro de los sedimentos lo que confirma la recarga de agua lluvia de estos Cuaternarios.
Hacienda Las Flores (Agustín Codazzi)	31	30	12-30 (12-15 y 26-30)	2	5,54	Depósito de Cuaternario con presencia de bloques de rocas ígneas con guijos y arenas de grano grueso y gravas.	Conductividad del orden 465 $\mu\text{s}/\text{cm}$ que confirman un agua con transporte dentro de los sedimentos y el posible aporte de iones carbonato por la presencia de material calcáreo. pH neutro (7,65) de carácter ligeramente básico.

Es de resaltar que estos cinco (5) piezómetros, según la litología descrita y las profundidades finales de perforación, se encuentran captando el acuífero del cuaternario, el cual se encuentra geológicamente en los depósitos de llanura aluvial (QIIa).

La Corporación ha venido realizando desde el año 2009 monitoreo a los pozos pertenecientes a Palmeras de Alamosa. En el año 2009, realiza el monitoreo específicamente de siete (7) pozos localizados en el municipio de Becerril, a los cuales se les realizan mediciones de niveles, pH y conductividad eléctrica. Entre los años 2009 y 2011 se colectan 2.039 datos de niveles, determinando que la máxima variación de descenso de 9.29 m corresponde al periodo entre el 6 de octubre del 2009 al 14 de abril de 2011. Entre el 20 de junio de 2012 al 22 de noviembre de 2012, el comportamiento de los pozos monitoreados es similar, siendo los mayores valores identificados en el pozo del lote A-16; finalmente concluyen que los monitoreos realizados entre el 6 de octubre de 2009 y el 22 de noviembre de 2012 los niveles han descendido en el orden de magnitud de los 9 a los 10 m, como también entre los 3 y los 6 m (descenso inmediato posterior).

Adicionalmente, entre los años 2015 a 2017, la Corporación ha hecho monitoreo de niveles y de calidad (parámetros físico-químicos) a algunos pozos con concesión de aguas subterráneas. Estos pozos son: Palmas Oleaginosas de Casacara (Pozo Fábrica), la Cartuja (pozos 1, 2, 3 y 4), Los Alacranes, Centro de Investigación Motilonia Agustín, Las Flores (Oleflores Pozos, C-8-1, D-8-1, B-10 y C-6-1), Suhares B-1 y B-2,

El Carmen (pozos 2, 4, 5 y 6), Sinamiaca. Es de anotar que en esta información no se presenta el diseño detallado del pozo y no se indica la geología asociada al mismo, sin embargo, se asume que estos se encuentran localizados en la llanura aluvial (QIIa) asociada a la planicie del Cesar, para efectos de incorporarlos en la red de monitoreo. Adicionalmente, los pozos tienen característica variadas, su profundidad varía desde 29 m el de menor profundidad y de 141 m el de mayor profundidad, los caudales captados varían entre los 1.5 hasta los 88 l/s, y con filtros que van desde un único filtro hasta los 8 filtros, estos últimos sugiriendo captación de varias unidades permeables capaces de almacenar agua interestratificadas con zonas de arcillas o lodos, permitiendo concluir de manera general la presencia de acuíferos confinados de tipo multicapa (Tabla 51).

Tabla 51. Características de los pozos con concesión monitoreados por CORPOCESAR (2006-2014).

Piezómetro	Prof. Perforada (m)	Intervalo Filtros (m)	Nro. de filtros	Q (Concesión) l/s
SUHARES B-1	64,35	13-42 y 48-57	2	45
SUHARES B-2	70	17,65-49,65; 52,65-58,5 y 64,35-70	3	32
EL CARMEN_POZO 1	140	115-140	1	50
EL CARMEN_POZO 2	141	135-141	1	
EL CARMEN_POZO 4	40	32-40	1	25
EL CARMEN_POZO 5	74,9	70-74,9	1	50
CORPOICA Motilonia Codazzi	29	14-26,4	1	3,6
La CARTUJA_POZO1	55	18-23, 29-31 y 33-37	3	36
La CARTUJA_POZO2	63	22-26, 28-41, 45-49 y 51-60	4	88
La CARTUJA_POZO3	51	18-22, 32-38 y 44-51	3	87
La CARTUJA_POZO4	63	17-41, 45-49 y 51-63	3	56
LOS ALACRANES_POZO 1	83	16-19, 26-29, 31-34, 46-49, 54-57, 63-66, 71-74 y 81-83	8	65
PALMAS OLEAGINOSAS DE CASACARA	38	-	-	-

Fuente: CORPOCESAR (2017-2018).

La tabla anterior sugiere, que los pozos se encuentran captando el acuífero del cuaternario o de llanura aluvial (QIIa) y del terciario (cuestas?), debido a que estos se encuentran principalmente hacia el pie de monte de la Serranía del Perijá, donde los sedimentos cuaternarios son menos potentes, siendo posiblemente monitoreado el acuífero del terciario.

Según lo anterior, para el sistema acuífero Cesar, el cual es geológicamente heterogéneo y con una vulnerabilidad intrínseca a la contaminación alta, se sugiere una red de monitoreo preliminar que consiste en los cinco (5) piezómetros propiedad de CORPOCESAR localizados específicamente en los municipios de Agustín Codazzi, El Paso, Becerril, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná, (PIEZ1, 2, 3, 4 y 5; representados en verde en la Figura 142). Se incluyen además dieciocho (18) pozos en concesión y en los cuales la Corporación regularmente viene realizando monitoreo: La Cartuja (1, 2, 3 y 4), Las Flores_Oleoflores (Pozos

C81, D81, B10 y C61), Suhares (B1 y B2), El Carmen (Pozos 2, 4, 5 y 6), Sinamaica, Los Alacranes y Palmas de Oleaginosas de Casacara (Pozo Fábrica), Coporica (representados en fucsia en la Figura 142). Esta red de monitoreo sería únicamente de **línea base o de referencia**, cuyo fin es hacer observaciones a largo plazo con una frecuencia baja y con mediciones de los parámetros establecidos en la tabla 49, que permitan incrementar el conocimiento del sistema de flujo del acuífero del cuaternario; toda vez que este sistema es el más explotado en la cuenca del Cesar (INGEOMINAS, 2002-2003c), los procesos y tendencias de calidad y cantidad serán determinantes para la implementación del Plan de manejo Ambiental del Acuífero. Adicionalmente, se tienen 20 pozos en los cuales Corpocesar y la Universidad del Magdalena, 2011 hicieron mediciones para determinar la calidad del agua en el acuífero y los cuales vale la pena hacer un seguimiento en la calidad del agua (representados en amarillo en la Figura 142). Finalmente, existe una red de piezómetros privados localizados principalmente al interior de la actividad minera y en predios con actividades agrícolas y ganaderas. Se considera importante su integración en la red de monitoreo sugerida, para poder ir mejorando la distribución de dicha red y poder obtener resultados a largo plazo de manera más consistente en cuanto a niveles piezométricos y datos de calidad. No obstante, es importante aclarar que para el planteamiento de la red de monitoreo del sistema acuífero Cesar hace falta un mayor conocimiento del acuífero y por lo tanto, esto hará parte de un estudio posterior.

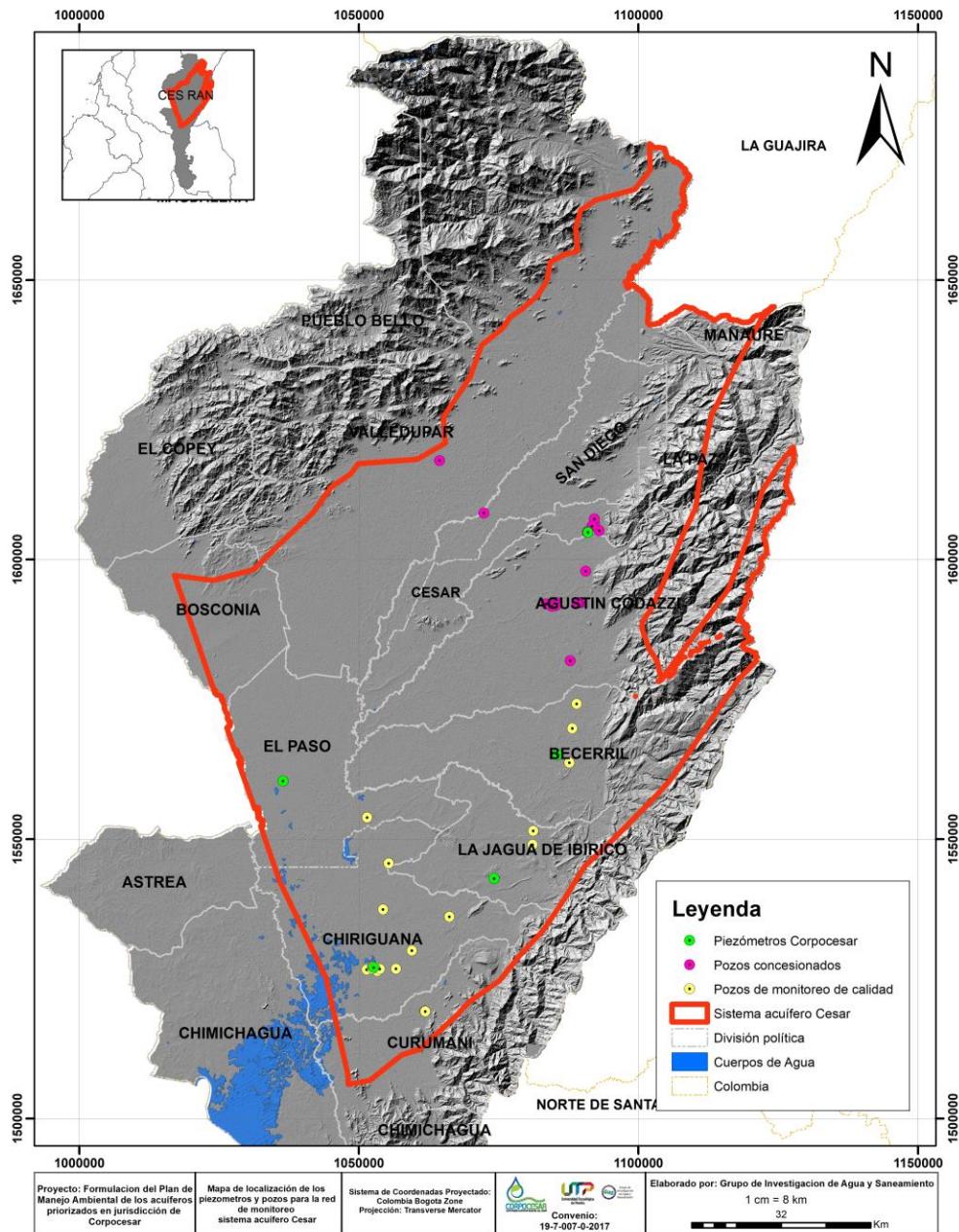


Figura 142. Pozos y Piezómetros para red de monitoreo preliminar en el sistema acuífero Cesar.

2.10 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

2.10.1 Modelo geológico-geofísico

El modelo geológico-geofísico es obtenido a través de los diferentes estudios geológicos y geofísicos llevados a cabo en el departamento del Cesar, permitiendo de manera preliminar determinar la conformación

geométrica de algunas de las formaciones acuíferas definidas para la zona, para lo cual la geofísica permite de manera general determinar la profundidad y los espesores promedio de las unidades acuíferas presentes en el substituto.

2.10.1.1 Geofísica

Si bien es cierto existe numerosa información geofísica (Geoeléctrica) para el acuífero priorizado, no existe una base de datos digital que permita facilitar la ubicación o localización, el análisis, interpretación e integración de una manera sistemática los resultados hallados, como es el caso del trabajo INGEOMINAS (1995). Este trabajo cuenta con un gran volumen de datos pero la localización está supeditada al escaneo de los planos, los cuales pueden sumar error al momento de materializar los puntos. Sin embargo, los resultados geoeléctricos son tomados para el análisis de las unidades permeables presentes en el sistema acuífero Cesar como se describe más adelante.

Para el caso del Bloque Los Venados prospectado en el mes de diciembre de 2017, en el marco de la formulación del PMA del sistema acuífero Cesar, existen sondeos eléctricos verticales que aparentemente se encuentran en o muy cerca de los sondeos realizados o compilados por el SGC (INGEOMINAS, 1995) como se observa en el mapa de Isorresistividades a 50 metros y específicamente en las Planchas 33-IV-C, 40-II-A, B, C y D, y entre las planchas 40-I-B y D (Figura 37).

El análisis de los Sondeos Eléctricos Verticales -SEV's-, evaluados según la información secundaria, presentan en general desde suelos hasta gravas o conglomerados los siguientes geopotenciales:

- De manera regional los suelos en el Acuífero priorizado Cesar, según los geopotenciales, presenta resistividades entre los 4 Ohm-m a los 1020 Ohm-m, clasificados como suelos secos, los cuales se presentan desde superficiales hasta los 8.8m de profundidad con espesores entre los 1.15m y los 8.8m. Para esta unidad geoeléctrica el valor de resistividad más común es 80 Ohm-m, profundidad de 1.3m de ocurrencia e igual espesor. Los suelos descritos como residual limo-arcilloso, arcillo-limoso seco, arcilloso, arcillo-limoso, arcillosos limosos secos, arenos-gravosos, entre otros, presentan resistividades desde los 7.4 Ohm-m hasta 320 Ohm-m, profundidades desde superficiales hasta los 6.7m y espesores entre los 0.5m a 6.7m. La resistividad más común en estos materiales es de 61 Ohm-m, espesores y profundidades comunes de 0.8m.
- Los materiales arcillosos se presentan ampliamente distribuidos en el registro geológico de la zona, presentando inicialmente resistividades para las formaciones cuaternarias (Qlla) entre 0.109 Ohm-m a 8.2 Ohm-m, apareciendo desde la superficie hasta los 73.7m m y espesores centimétricos (laminillas de arcillas) hasta 87.7m. Arcillas salobres presentan resistividades entre 3 y 4 Ohm-m y espesor de 73.7m. La unidad Aluvial (Qal) presenta resistividades locales de 3 Ohm-m con profundidades desde 1m hasta los 8.8m y espesores entre 3.6 y 4.2m; algunas arcillas se presentan intercaladas con arenas y con presencia de lentes de gravas arrojando resistividades entre 11 y 16 Ohm-m, presentes en los intervalos de profundidad 17.9-130.7m, 24.8-177.8m y 130.7-177.8m y espesores desde los 47.1m mínimo a los 153m máximo. Las arcillas se presentan en varios casos intercaladas con arenas saturadas presentan resistividades desde los 3 Ohm-m hasta los 117 Ohm-

m, entre los 1.2m hasta los 130m de profundidad y espesores desde los 2.5m hasta los 177m. es de resaltar que el valor más común en resistividad para estos materiales es de 15 Ohm-m, la profundidad más recurrente es 3.5m a 35m y espesor de 31m. Arcillas intercaladas con arenas con agua salobre presentan resistividades entre 3 Ohm-m a 8 Ohm-m con espesores desde los 2,5m hasta los 33m y profundidades entre los 1.5m a 8.8m. (ligeramente superficiales y posiblemente asociadas al Qlla). De manera puntual la Formación Barco (TpB) presenta arcillas con un valor de resistividad de 9.55 Ohm-m distribuidas entre los 114 y 208m de profundidad.

- Los limos presentan resistividades entre los 11 y 28 Ohm-m, presentes desde la superficie hasta 53.2m de profundidad y espesores desde pocos centímetros a 33.1m; limos y arcillas con presencia de agua a la base, según la información geoeléctrica de la base de datos, presenta resistividades entre 8 Ohm-m y 13 Ohm-m, intervalos de profundidad desde los 2.1m a 20.1m y 3.3m a 34.9m, con espesores de 18m y 31.6m., estas resistividades son asociadas al sistema acuífero Llanura Aluvial (Qlla).
- Las arcillolitas asociadas con la Formación Cuesta, presenta resistividades entre los 6 Ohm-m y 9 Ohm-m, presentes desde los 0.5m hasta los 12m de profundidad y espesores entre 2m y 8m aproximadamente. La Formación Barco presenta arcillolitas-areniscas con resistividades de 17 Ohm-m y 76.7 Ohm-m, las cuales ocurren en intervalos de profundidad de 7.63-125m y 7.99-21.66m, presentando espesor de 117.6m a 13.67m. En términos generales las arcillolitas se encuentran con resistividades entre los 3.2 Ohm-m a los 76.7 Ohm-m, distribuidas en profundidades de 0.5m a 209m, y espesores en el rango de 1.9m hasta los 193m. Lutitas asociadas a formaciones cretácicas (Ksm, Ksl) presenta resistividades desde los 3 Ohm-m hasta los 200 Ohm-m, con rangos de profundidad desde los 4.17m hasta 2080m y espesores entre los 2.35m a 2299.9m. Finalmente se observa una unidad con resistividades de 19 Ohm a 275 Ohm-m correspondientes a la Formación La Quinta (volcánico) aflorante hacia el municipio de Curumaní, presentando profundidades desde los 71.6m hasta 142.4m y espesores de 61.5m a 84.7m.
- Datos de resistividad de limolitas asociadas a las Sedimentitas de Arjona (Tpaa?) presenta valor de 9.86 Ohm-m, profundidad entre los 11.09m a 65.21 y espesor de 54.11m presente hacia la región de Chiriguaná. Hacia Bosconia se presenta valor aislado de 9.8 Ohm- de resistividad asociado a la Formación Cuesta, con una profundidad de 30.19m a 148.46m y un espesor de 118.07m; además se presentan valores de resistividad de 200 Ohm-m asociados con la Formación Guatapurí, presente entre los 4m y los 150m de profundidad y con un espesor de 146m, generando un posible acuífero en porosidad secundaria.
- Las arenas, al igual que las arcillas se encuentran de manera general en el registro geológico de las formaciones presentes en la cuenca del Cesar, siendo estas las más ampliamente distribuidas y definidas en los registro geoeléctricos permitiendo determinar de manera general que es el sedimento con mayor potencial hidrogeológico de la región; en términos generales presente resistividades desde los 4 Ohm-m (arenas saturadas de agua salobre) hasta los 830 Ohm-m (arenas saturadas), aflorando en intervalos desde la superficie hasta los 132,9m de profundidad, y espesores desde pocos centímetros hasta 177m, asociadas a las rocas cuaternarias y el terciario principalmente. Las arenas saturadas con agua salobre y duras presentan resistividades entre los 4

Ohm-m y 830 Ohm-m, con intervalos de profundidad desde la superficie hasta los 119,5m y espesores entre 2.8m y 177m, asociados principalmente a la unidad Llanura Aluvial (QIIa) a la llanura aluvial y posiblemente a rocas terciarias. Las arenas secas o aparentemente sin agua, presenta resistividades entre 6 Ohm-m y 554 Ohm-m, con profundidades desde la superficie hasta los 132.9m y espesores centimétricos (láminas de arenas) hasta los 122.5m, asociados en general a las formaciones cuaternarias principalmente. Para el caso de la Llanura Aluvial (QIIa) presenta resistividades desde los 15.7 Ohm-m hasta los 278 Ohm-m, presentes desde la superficie hasta los 5.3m de profundidad y con espesores desde pocos centímetros hasta 5.3m.

- En cuanto a las areniscas, las cuales se encuentran ampliamente distribuidas en el registro geológico (Sedimentitas de Arjona, Formaciones Cuesta, Barco, Cuervos y Guatapurí) de la cuenca del Cesar presentan en términos generales resistividades entre los 3 Ohm-m hasta los 457.5 Ohm-m, abarcando profundidades desde los 3.3m hasta los 2193m, y espesores variables desde 8.45m hasta 2281m (valor arrojada para Codazzi). Las areniscas saturadas a parcialmente saturadas presentan resistividades entre los 3.8 Ohm-m hasta los 270 Ohm-m (arenisca conglomerática saturada), cuya ocurrencia inicia a los 8.5m hasta los 2562m de profundidad, con espesores en los intervalos entre los 26m y 163m, correspondientes de manera general a la Formación Guatapurí y Formación Cuesta hacia la municipalidad de Bosconia. Areniscas saturadas con aguas salobres, según tabal de Sondeos Eléctricos Verticales compilada, presenta resistividades desde los 3 Ohm-m hasta los 8.5 Ohm-m, distribuida entre los 9m y 128,5m de profundidad, con espesores en intervalos entre los 52m a 163m. Finalmente las areniscas con aguas duras presentan resistividades entre los 3 Ohm-m a los 346 Ohm-m, con profundidades desde los 12.5m hasta los 128.5m, y espesores de intervalos entre los 87m y 191m. Entre Bosconia, La Jagua y El Paso, la Formación Cuesta presenta resistividades desde los 3 Ohm-m hasta los 457.5 Ohm-m, con intervalos de areniscas parcialmente saturadas, presentando profundidades de ocurrencia entre los 3,3m hasta 180m, y espesores desde los 8.45m hasta 142.9m.
- Las gravas determinadas mediante geoeléctrica presentan de manera general resistividades desde los 6.85 Ohm-m hasta los 5493.6 Ohm-m, presentes desde la superficie hasta los 155.3m de profundidad, y espesores de pocos centímetros hasta 142.3m, asociados principalmente a las formaciones cuaternarias y específicamente a la Llanura Aluvial (QIIa). Las resistividades asociadas a las zonas saturadas con gravas presentan resistividades entre 41 Ohm-m y 55.8 Ohm-m, ubicadas desde los 1.7m a los 23.7m de profundidad y espesores entre 9.21m a 22m, asociados a la unidad cuaternaria aluvial.
- Las rocas detríticas gruesas consolidadas se encuentran asociadas a los conglomerados de la Formación Cuesta (Tmc), presentando resistividades desde los 568.2 Ohm-m a 12855? Ohm-m, los cuales pueden ser reinterpretados como bloque o clastos de rocas resitivas cerca de la superficie dado su espesor y su profundidad de ocurrencia. Las gravas de la unidad Llanura Aluvial (QIIa), presenta resistividades desde los 9.4 Ohm-m hasta los 4019 Ohm-m, presentes desde la superficie hasta los 6.54m de profundidad y espesores desde pocos centímetros a los 6.5m. La unidad Abanico Aluvial (Qcal) presenta resistividades a partir de los 58.6 Ohm-m hasta los 671.4 Ohm-m presentes desde la superficie hasta los 3.95m de profundidad y con espesores de pocos centímetros hasta los 4m aproximadamente, en esta se encuentra incluida la unidad Terrazas aluviales (Qt).

- Por último, el basamento registrado en la prospección geofísica general presenta resistividades entre 1 Ohm-m a 9568.1 Ohm-m, cuya ocurrencia está definida desde los 4.13m hasta los >939m (Área de Curumani) y espesores determinados entre los 39.5m a 783.7m, distribuidos en las unidades del cretáceo (Kmc, Ksl y Kir), rocas ígneas, granito porfídico, Formación Guatapuri y rocas entre el Paleozoico hasta el jurásico, presentes en el acuífero priorizado. En algunos sectores se define el basamento terciario con resistividades entre los 3.9 Ohm-m y 780 Ohm-m, con profundidades desde los 21m a >126m.

INGEOMINAS (1995) sintetiza las resistividades en general halladas en el estudio realizado en el departamento del Cesar, como se indica en la Tabla 52.

Tabla 52. Valores de resistividad para el Departamento del Cesar y litología asociada.

Resistividad (Ohm-m)	Litología asociada
1-9	Arcillas, shales o arenas y gravas con agua salobre
9-15	Limos o arenas con agua poco dulce
15-30	Arenas finas a gruesas con agua dulce
30-100	Gravas y arenas gruesas con agua dulce
>100	Calizas, limolitas, volcanitas, conglomerados, cuerpos ígneos y metamorfitas

Fuente: INGEOMINAS (1995).

En términos generales, la capas según la geofísica (SEV's) presentan las siguientes características:

- **CAPA 1:** Conformada en general por arcillas, arenas, limos, gravas, conglomerados, suelos secos, suelos arcillosos, suelo arcillosos seco, suelos residuales limo-arcillosos, suelos arcillo-limosos secos, suelos arenos-gravosos con arcillas, arcillas y arenas con agua salobre, suelos secos con fragmentos (gravas)y material de relleno de vía; presentando resistividad mínima de 0.7 Ohm-m hasta 12.855 Ohm-m, espesores milimétricos hasta 15m y profundidades desde la superficie hasta los 15m, sugiriendo la capa más superficial que cubre las diferentes unidades presentes de manera regional en la zona. Las unidades correlacionadas con la geoeléctrica son la Llanura Aluvial (QIIa), Conos o Abanicos Aluviales (Qcal), terrazas aluviales (Qt) y Formación Cuesta (Tmc).
- **CAPA 2:** La constituyen en general las arenas y gravas, arenas, limos, arcillas arenas secas, arenas y gravas secas, arenas arcillosas, arenas y gravas en matriz arcillosa secas, rocas volcánicas y volcánclásticas, arcillas intercaladas con arenas, lentes arcillosos, bloques en matriz arenosa, arenas saturadas, arenas arcillosas y conglomerados; con resistividades entre los 0.4 Ohm-m a 5493.6 Ohm-m, espesores milimétricos hasta los 146m y profundidades desde la superficie hasta los 150m. Las capas saturadas o estratos están conformados por arenas, arcillas intercaladas con arenas y arenas gruesas principalmente con intercalaciones de arcillas; las resistividades halladas para estas capas saturadas se encuentran entre los 8.9 Ohm-m y los 830 Ohm-m (aguas duras), presentando profundidades desde 1.2m hasta los 90.2m y espesores entre 3.3.m hasta 99m; capa considerada como parte de las unidades cuaternarias y posiblemente con las terciarias del tope. En

esta capa se han correlacionado las unidades con las unidades del cuaternario (Qlla, Qcal, Qal y Qt), Formación Cuesta, Cuervos y Guatapuri.

- **CAPA 3:** Conformada por arenas, limos, areniscas, limolitas, arcillolitas, lutitas, gravas, conglomerados, gravas y arenas o areniscas saturadas, limos y arcillas húmedas, arenas arcillosas y lentes gravosos o arcillosos, arcillas intercaladas con arenas, basamento resistivo y arenas secas; litologías o sedimentos con resistividades entre los 2 Ohm-m y 7500 Ohm-m, espesores desde pocos centímetros hasta 500m y profundidades desde la superficie hasta 284m. Las unidades saturadas se encuentran definidas por sedimentos de tipo gravas, arenas, arcillas intercaladas con arenas y arcillolitas intercaladas con areniscas, presentando resistividades de 4 Ohm-m a 800 Ohm-m (arenas saturadas de agua salobre). Por último, las aguas salobres específicamente se encuentran asociadas a arenas y areniscas saturadas intercaladas con arcillas, presentando resistividades entre 4 Ohm-m a 8 Ohm-m, espesores de 16.5m a 177m y profundidades entre los 3.6m y los 118m. Las unidades que se encuentran relacionadas a esta capa según la interpretación dada en los trabajos previo sugieren a las unidades cuaternarias (Qlla, Qal, Qcal y Qt), la Formación Cuesta, Barco y Cuervos.
- **CAPA 4:** Es al parecer la transición de manera general de las unidades cuaternarias al dominio terciario, presentando asociaciones litológicas de arcillas, shales negros, lutitas, areniscas, limolitas, gravas, arcillas, areniscas y areniscas intercaladas con limolitas, arenas saturadas y basamentos resitivos; las resistividades se presentan en el rango de 0.1 Ohm-m a 6442 Ohm-m, espesores centímetros (0.46m) hasta 2299.9m y profundidades de intervalos entre superficiales (pocos centímetros) hasta 2321m. las unidades saturadas se encuentran definidas por la presencia de arenas y areniscas y arcillas intercaladas con areniscas, arrojando resistividades de 3.2 Ohm-m a 346 Ohm-m, espesores entre los 27m a 177m y profundidades de ocurrencia entre los 5.5m y los 177.8m; las aguas salobres identificadas en los sondeos se encuentran definidas por arenas y areniscas localmente intercaladas con arcillolitas, cuyas resistividades están entre 3 Ohm-m a 7.3 Ohm-m, espesores de 44m a 145m y profundidades entre 9m a 128.5m. Las unidades correlacionadas con esta capa son los depósitos de Llanura Aluvial (Qlla), depósitos aluviales (Qal), las Formaciones Cuesta, Barco y Cuervos, las Sedimentitas de Arjona, Formación Guatapuri y las unidades Jurásicas y Cretácicas aflorantes (Ksm, Ksl, Kir y Jqv).
- **CAPA 5:** Constituida principalmente por arenas y areniscas, gravas, arcillolitas y limolitas, areniscas intercaladas con limolitas, arenas intercaladas con arcillas y basamento geoeléctrico; esta capa se caracteriza por presentar resistividades en el rango de 1 Ohm-m a 5481 Ohm-m , espesores entre superficial puntual (0.1m) hasta 783.7m y profundidades desde los 2.6m hasta 939.1m; es de resaltar que gran parte de los registros determinó la presencia del basamento geoeléctrico, el cual presenta resistividades entre 4 Ohm-m y 765.4 Ohm-m, espesores entre 77.73m y >783.7m, y profundidades desde 4.13m hasta los 939.1m. Finalmente las unidades saturadas conformadas por arenas y areniscas saturadas y arcillolitas intercaladas con areniscas presentan resistividades entre 4.1 Ohm-m y 87 Ohm-m, con espesores de 53.7m a 193m y profundidades relacionadas e dichos espesores entre los 15m y 252m; y las aguas duras presentan resistividades 4.1 Ohm-m y 46 Ohm-m, espesores de 85m a 193m y profundidades desde los 15m hasta 126m. Las unidades

correlacionadas con esta capa son la Llanura Aluvial (Qlla), las Sedimentitas de Arjona, Formación Cuesta, Formación Guatapurí y las rocas del Paleozoica hasta el Cretácico aflorantes en la zona.

- **CAPA 6:** En esta capa se encuentra dominante el basamento resistivo ya sea terciario o de baja resistividad como el asociado a las rocas más antiguas de la región; sin embargo, se presentan algunos sondeos en los cuales se identificaron arcillas, areniscas y conglomerados parcialmente saturados, con registros de geopotencial entre los 1 Ohm-m y 4724 Ohm-m, espesores entre los 3m a los 370m, y profundidades desde los 8.1m a 600m. El basamento presenta resistividades desde 1 Ohm-m hasta 250 Ohm-m; y sedimentos parcialmente saturados asociados con la Formación Cuesta presenta resistividad de 30Ohm-m, espesor de 31.74m a 136,61m y profundidades entre 43.39 y 180m. Algunas unidades por localización y distribución geográfica aparecen en el registro geoeléctrico como son la Llanura Aluvial (Qlla), las Sedimentitas de Arjona, Formación Cuesta y las unidades correspondientes a los basamentos resistentes y las rocas antiguas de la zona (Jqv, Kir, Pzmv).
- **CAPA 7:** Presenta en general resistividades entre los 1 Ohm-m y los 1000 Ohm-m, espesores entre 2m y 300m y profundidades desde los 18,1m hasta los 550m. Esta capa aparentemente no presenta importancia hidrogeológica, sin embargo, se observan resistividades entre 1 Ohm-m hasta 9 Ohm-m que obedecen a la presencia de arcillas, arenas o gravas con agua salobre; resistividades entre 9 Ohm-m y 15 Ohm-m. con posible presencia de arenas finas a gruesas con agua dulce y resistividades mayores a 100 Ohm-m que podrían representar rocas sin importancia hidrogeológica.
- **CAPA 8:** Presenta máximos geoeléctricos de 1000 Ohm-m y mínimos de 1 Ohm-m, espesores desde los 2m hasta los 330m y profundidades entre los 21m y los 460m. Las resistividades altas podrían indicar sedimentos secos. Es de resaltar la presencia de resistividades entre 1 Ohm-m a 50 Ohm-m, intervalos en los cuales en las anteriores capas se evidencia la existencia de zonas saturadas o permeables, las cuales pueden de igual manera estar en esta capa.
- **CAPA 9:** Se encuentra definida por la presencia de resistividades entre los 3 Ohm-m y 400 Ohm-m, a profundidades entre los 23m y los 499,5m, y espesores entre los 90m y los 200m; algunas resistividades pueden ser correlacionadas con sedimentos de grano fino tipo arcillas a arenas de grano posiblemente saturadas e interestratificadas.
- **CAPA 10:** Presenta resistividades entre los 4 Ohm-m a los 30 Ohm-m, y profundidades >183.1m, que pueden ser asociados a sedimentos finos tipo arcilla hasta arenas de grano fino, que pueden o no estar saturadas.

En ese orden de ideas existen áreas en donde la Llanura Aluvial (Qlla) presenta resistividades en el rango de los 0.1 Ohm-m hasta los 5493.6 Ohm-m, desde la superficie hasta los 155.3m y espesores entre superficiales y los 142m, permitiendo plantear que esta unidad presenta, según geofísica, un espesor máximo de 142 m, el cual varía de acuerdo a la geometría y características tectónicas de la cuenca. Las unidades aluviales recientes (Qal) presenta resistividades entre los 28 Ohm-m a 1219 Ohm-m, con espesores entre los 9m y los 13m aproximadamente, con profundidades de 0.7m hasta los 23.7.m. La unidad denominada Abanicos o

Conos Aluviales (Qcal) presenta resistividades entre los 26 Ohm-m hasta 671 Ohm-m, espesores entre 0,3m hasta 101.6m y profundidades desde superficiales a 114,7m; finalmente la unidad denominada terrazas (Qt) presenta resistividades de 41 Ohm-m a 156 Ohm-m, y profundidades desde superficiales hasta 16.36m.

Las formaciones terciarias en general presentan resistividades entre los 3 Ohm-m (arcillolitas, limolitas saturadas) hasta los 12855 Ohm-m (conglomerado), con profundidades desde la superficie hasta los 2193m y espesores centimétricos (0.345m) hasta los 2281m. Valores de unidades saturadas se encuentran entre los 3 Ohm-m hasta los 9 Ohm-m, presentes desde los 12m a los 148m de profundidad y con espesores entre los 6.36m hasta los 118m.

Por último, las formaciones cretácicas y pre-cretácicas presentes ampliamente en las márgenes del acuífero priorizado y como remanentes aislados producto de la deformación tectónica presente en la zona conforman el basamento geoelectrónico del área, debido a que los resultados de geopotencial arrojaron valores entre los 1 Ohm-m hasta los 4724 Ohm-m, con profundidades desde los 4m hasta 2321m, asociadas a posibles zonas superficiales impremables o de roca fresca o acucierres a mayor profundidad.

Las unidades saturadas (salobres, duras y dulces) distribuidas desde la capa 1 hasta la 6 (en menor proporción) presentan resistividades desde los 3 Ohm-m (arenas saturadas) hasta los 830 Ohm-m (areniscas saturadas con agua salobre), profundidades entre los 1.2m hasta 252m, y espesores entre 3.3m y 193m.

Es de resaltar que gran parte de la base de datos carece de información interpretativa que permita asociar en mayor volumen los datos de resistividad obtenidos, por lo tanto, se recomienda realizar el análisis e interpretación de tales resultados para incorporarlos en el modelo hidrogeológico de la zona.

En conclusión, las unidades en las cuales se encuentran los principales acuíferos de la cuenca del Cesar son las cuaternarias y terciarias, conformando acuíferos de tipo libre a semiconfinado a localmente confinados y acuíferos semiconfinados a confinados de tipo multicapa para las unidades terciarias.

La información secundaria de los sondeos eléctricos verticales permitió realizar los siguientes mapas de resistividad, teniendo en cuenta la información de la tabla 4, la cual indica el número de SEVS localizados y la tabla 52 del INGEOMINAS (1995) para los valores de resistividad de los materiales:

- **MAPA DE RESISTIVIDAD A 25m:** Se presentan zona puntual de resistividad baja hacia el NE de Bosconia (Bloque Los Venados) y zonas de resistividades bajas a intermedias indicando zonas permeables y altos resistivos hacia el sur del acuífero priorizado y del polígono de referencia (Figura 143).

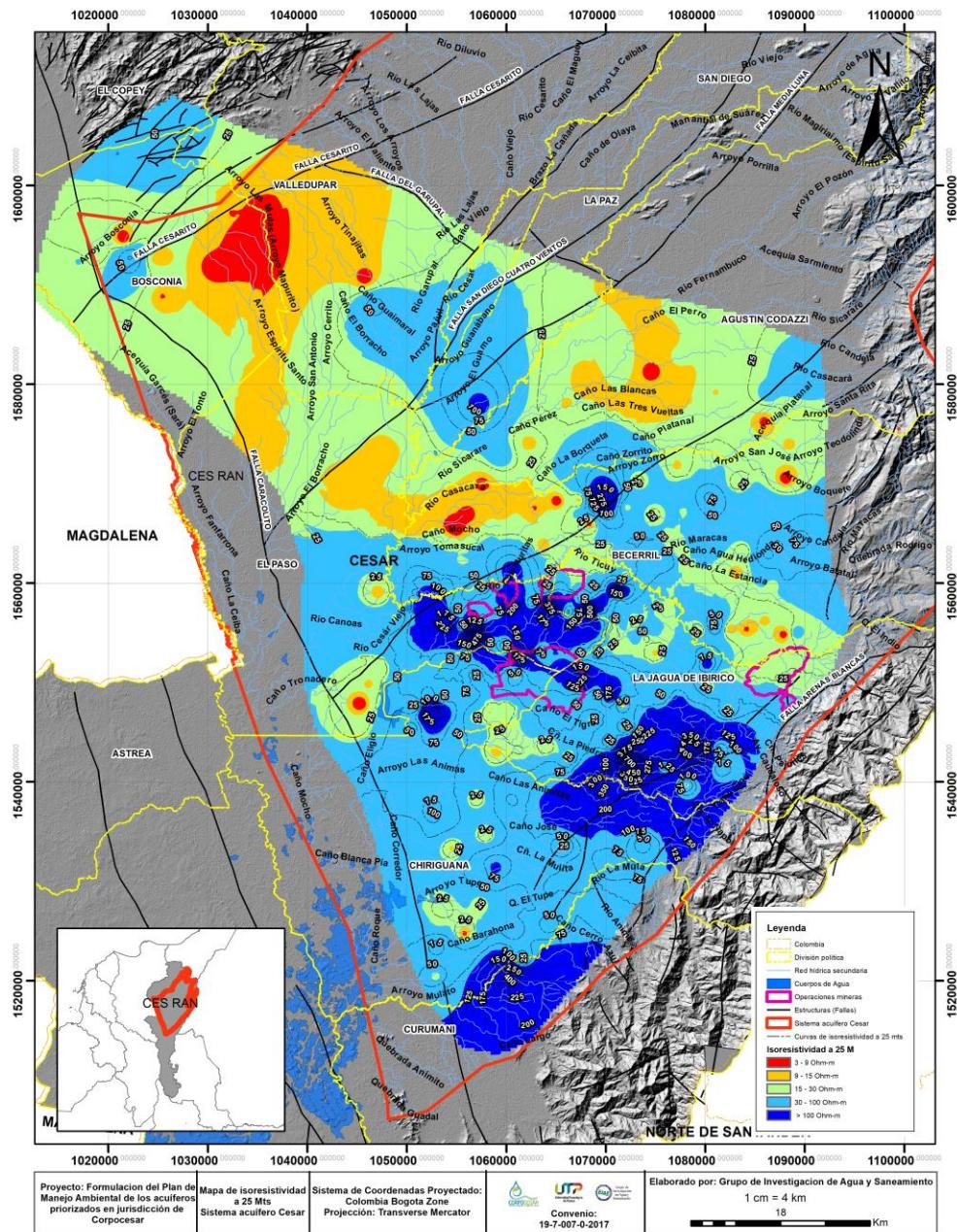


Figura 143. Mapa de isoresistividad a 25 m de la parte centro-sur del sistema acuífero Cesar.

- **MAPA DE ISORESISTIVIDAD A 50m:** Se observa incremento en resistividades bajas en los alrededores de Bosconia (aguas salobres) y aparición de altos resistivos hacia Caracolí, concordantes con rocas de grano fino presentes en la cantera cercana a dicho sector; aparecen bajos resistivos hacia Becerril y se mantiene de manera irregular los resistivos medios concordantes principalmente con unidades permeables de la zona de tamaño de gran fino a grueso. En las operaciones mineras se presentan resistividades entre 30 Ohm y 100 Ohm-m sugiriendo gravas y arenas con agua dulce a los 50m correlacionable con la unidad Cuestas aflorante en gran parte de la zona o la aparición de la formación carbonífera (Figura 144).

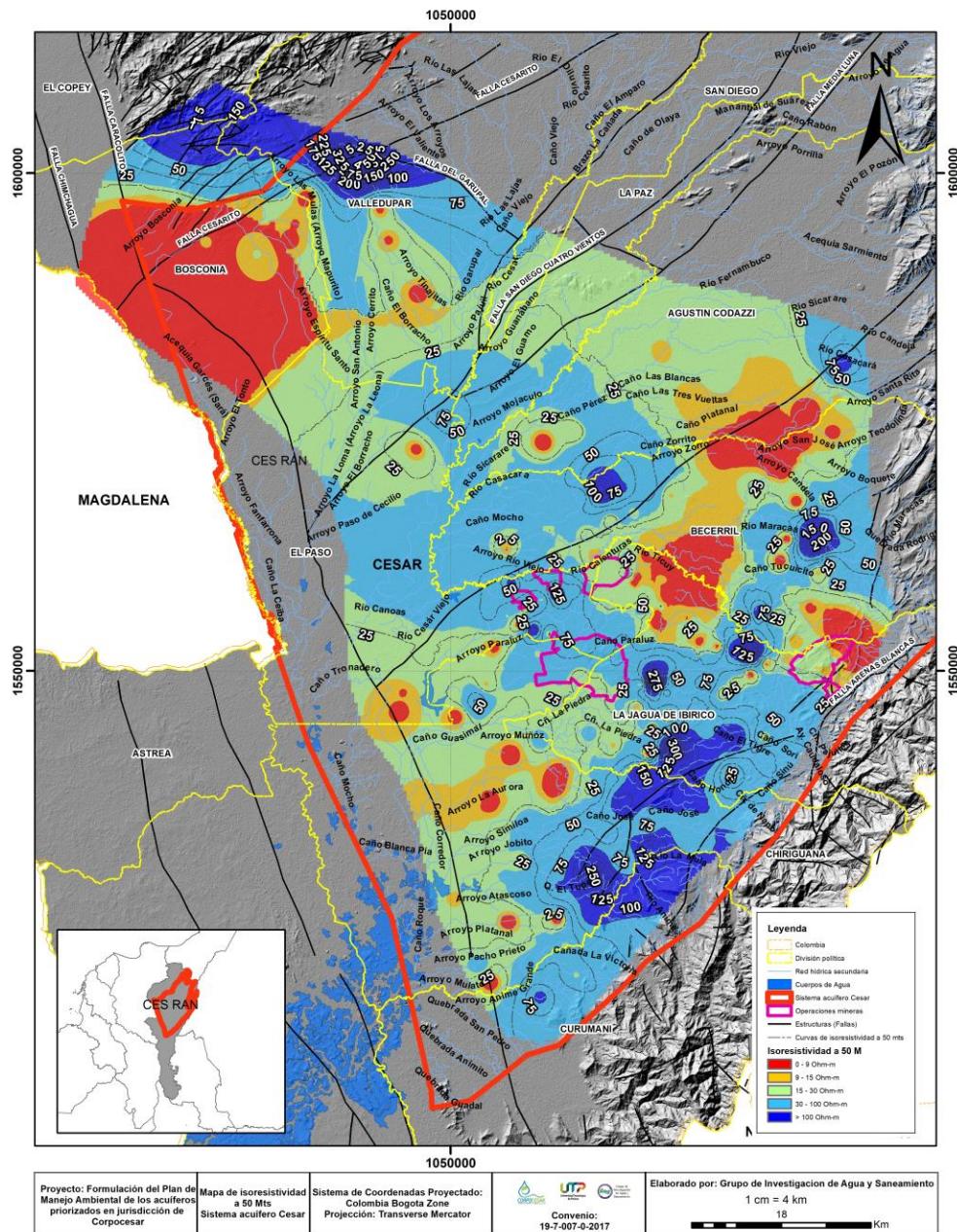


Figura 144. Mapa de isoresistividad a 50 m de la parte centro-sur del sistema acuífero Cesar.

- **MAPA DE ISORESISTIVIDAD A 100m:** se observan bajos resistivos a manera de parches aislados sugiriendo facies finas o zonas permeables con agua salobre y hacia la parte norte del polígono de referencia se presenta franja en dirección NW-SE asociado a sedimentos finos permeables posiblemente con saturación baja. Se acentúan los altos resistivos hacia Bosconia con posible permeabilidad secundaria, y hacia la Jagua de Ibirico; resistividades intermedias se presentan igualmente a manera de parches los cuales se consideran como rocas permeables que pueden estar o no saturadas (Figura 145).

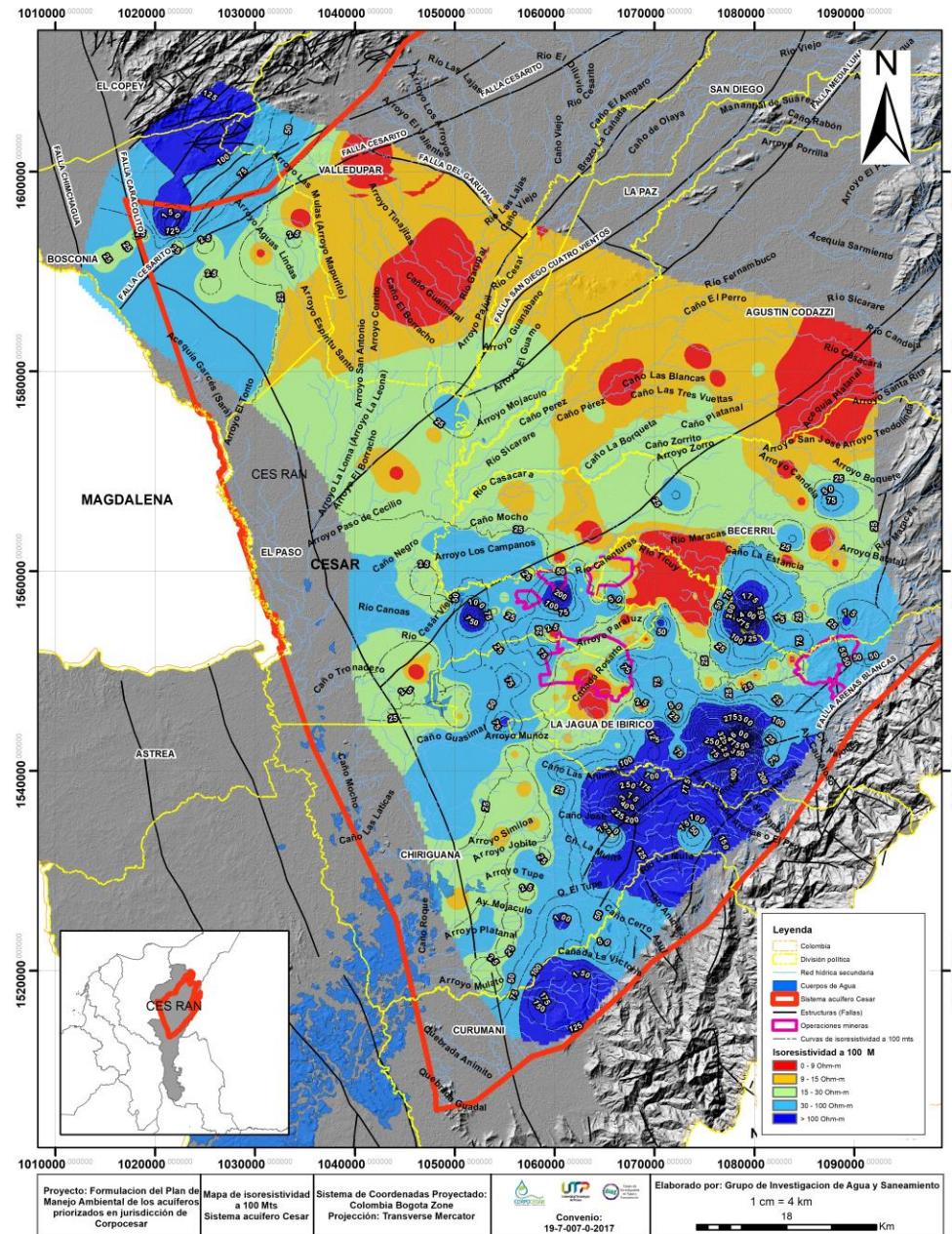


Figura 145. Mapa de isoresistividad a 100 m de la parte centro-sur del sistema acuífero Cesar.

- MAPA DE ISORESISTIVIDAD A 200 m:** Se mantiene los altos resistivos hacia la zona SE del polígono de referencia o del acuífero priorizado, se evidencia un incremento sustancial en las bajas resistividades que obedecen a patrones litológicos hacia la zona centro este del polígono. En las operaciones mineras se observa a manera de parches aparentemente la formación carbonífera (Cuervos) y zona de bajos resistivos en el pit de Drummond (Figura 146).

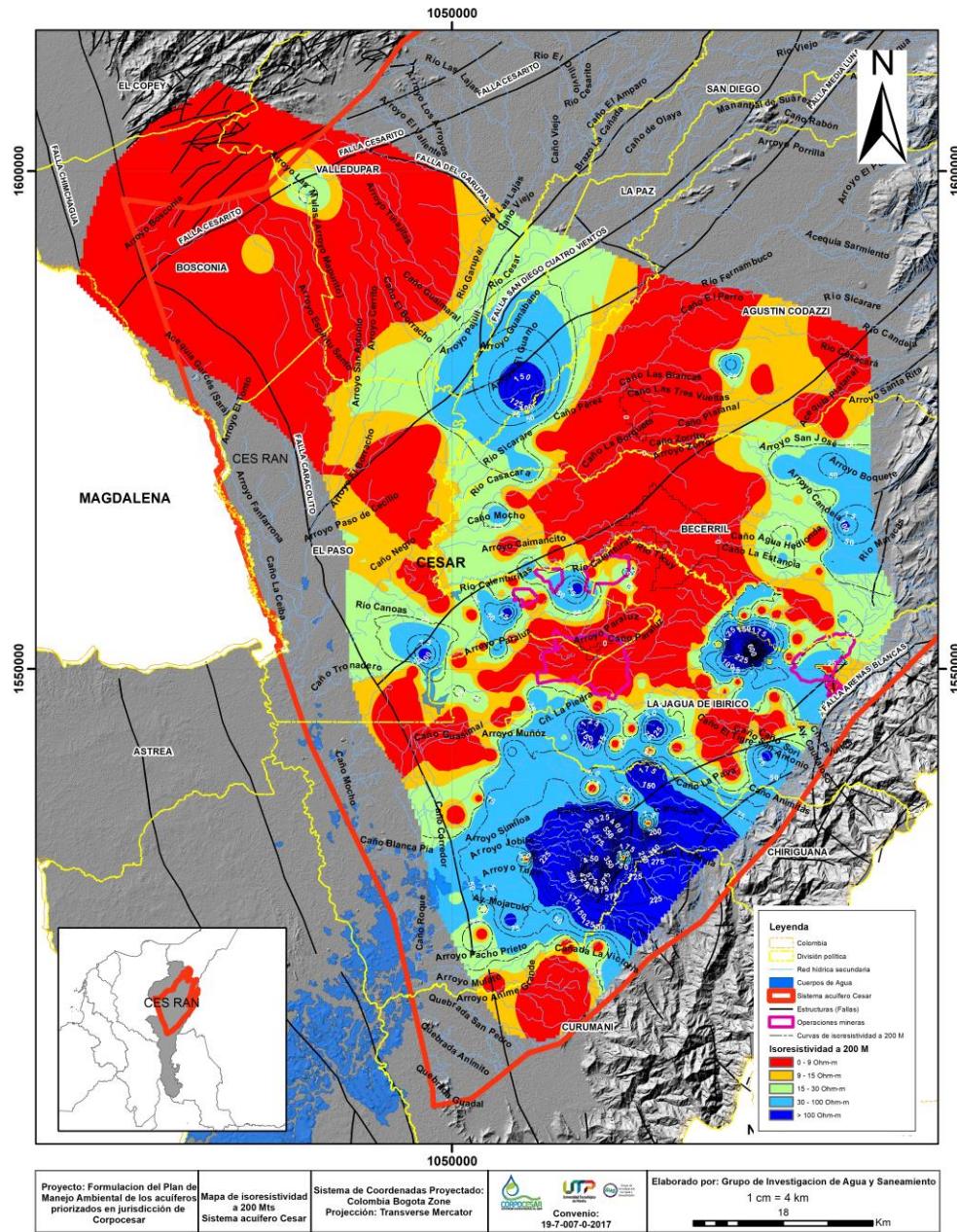


Figura 146. Mapa de isoresistividad a 200m de la parte centro-sur del sistema acuífero Cesar.

2.10.1.2 Unidades hidrogeológicas

Un acuífero es una formación geológica capaz de suministrar agua subterránea útil a pozos y manantiales. Todos los acuíferos tienen dos características fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de transmitir el agua subterránea; pero el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra y su magnitud puede variar con la estructura geológica, desde unos cuantos km^2 a muchos miles de km^2 (Foster et. al. 2002-2006).

Las unidades hidrogeológicas, pueden agrupar uno o varios acuíferos, y se clasifican teniendo en cuenta las características geológicas, geofísicas de los materiales, distribución espacial tanto en superficie como en el subsuelo, calidad del agua subterránea, mapas de isopiezas, propiedades hidráulicas de las rocas, hidrología y precipitación, factores que se no se encuentran en su totalidad para su determinación (MADS, 2014); sin embargo, se plantean las siguientes UH (Figura 147).

- a) Grupo de Sedimentos Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Muy Pequeña o Acuíferos de Alta a Moderada Productividad (A1)

Los acuíferos de alta a moderada productividad en la unidad hidrogeológica se encuentran conformados por los depósitos de llanura aluvial (Qlla), depósitos aluviales recientes (Qal), abanicos o conos aluviales (Qcal) y terrazas aluviales (Qta) que en general, están conformados por intercalaciones de arenas, gravas y niveles de lodos que en algunos sectores le imprimen cierto grado de confinamiento, buenas permeabilidades y porosidades, baja compactación, generando acuíferos de porosos de tipo libre a semiconfinado.

El espesor estimado es variable, pero en general para estas unidades es desde la superficie hasta los 142m (Qlla), de acuerdo con los resultados de la exploración geoeléctrica. En la Llanura Aluvial (Qlla) se encuentran diseñados la mayoría de pozos, aljibes y con ocurrencia muy puntual de manantiales, presentando niveles estáticos desde la superficie (manantiales, pozos y aljibes) hasta los 22.50m y un promedio de 5.9m de profundidad.

La unidad denominada Abanicos o Conos Aluviales (Qcal) presenta una amplia distribución de aljibes como fuentes de captación, presentando niveles estáticos desde 2.5m a 11.57m de profundidad con un promedio de 5.58m; por último y la de menor importancia en este grupo, se presenta la unidad denominada terrazas o terrazas aluviales (Qta) presentando solo aljibes con niveles estáticos entre 7.32m y 10.92m de profundidad y un promedio de 9.12m. Niveles dinámicos aislado para los abanicos aluviales (Qcal) presentan un promedio de 6.62m de profundidad y para la llanura aluvial (Qlla) de 1.15m a 18.56m de profundidad con un promedio de 8.13m.

Los valores de caudales estimados para la unidad de llanura aluvial (Qlla) presentan valores de 10.03l/día hasta los 833.3l/día y de 0.42l/día en promedio, y para la unidad de terraza (Qt) valores entre 0.56l/día a 3.33l/día; no se cuentan con valores de referencia para la unidad de abanicos (Qcal).

Desde el punto de vista de interés hidrogeológico se considera a la unidad Llanura Aluvial (Qlla) regionalmente de interés hidrogeológico Grande a intermedio; la unidad abanico aluvial (Qcal) cuyos datos se encuentran distribuidos localmente en el abanico del Valledupar (Qav) el cual a su vez se encuentra suprayaciendo la llanura aluvial se considera de pequeño interés hidrogeológico regionalmente, pero de importancia hidrogeológica intermedia de manera puntual; finalmente la unidad de terraza (Qta) se considera de importancia hidrogeológica pequeña debido a su escala y distribución en el Acuífero priorizado Cesar.

CORPOCESAR y La Universidad del Magdalena (2011) determinan los siguientes parámetros hidráulicos para el sistema acuífero Cesar: Capacidad específica promedio 1.42 lps/m, transmisividad promedio es de 239,12 m²/día y la permeabilidad promedio es de 45,01 m/día, valores que soportan la clasificación de la unidad hidrogeológica de importancia regional intermedia a localmente grande.

Por ser el acuífero de mayor extensión, este se encuentra incluido en los bloques tectónicos Río Cesar, Los Venados, Codazzi-Sicarare, Becerril-La Loma y Rincón Hondo, zonas donde la influencia de las fallas pueden o no afectar las recargas o descargas del acuífero a las demás unidades hidrológicas e hidrogeológicas presentes en la zona; la unidad de Abanicos o Conos Aluviales (Qcal) evaluada pertenece al Bloque Cesar, que a su vez se encuentra suprayaciendo discordantemente los depósitos de llanura aluvial.

- b) Grupo de Rocas Fracturadas y Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande a Pequeña, o Acuíferos de Moderada a Baja Productividad (A2)

Los acuíferos de moderada a baja productividad en el acuífero priorizado, son unidades hidrogeológicas conformadas por intercalaciones de cuarzo areniscas grises de grano medio a grueso y conglomerados con fragmentos de cuarzo, con intercalaciones de arcillolitas, limolitas, lutitas y mantos de carbón, asociados en general a las Sedimentitas de Arjona (Tpaa) y las formaciones Cuesta (espesor de 120m a 450m), Barco (180m) y Cuervos (180m a 250m), presentando espesores, de acuerdo a la información geoeléctrica, de 2281m para estas unidades en conjunto (Figura 147); Drummond (2013) indica en la Formación Cuervos una conductividad promedio de 0,0682 m/d (baja).

El acuífero del terciario se caracteriza por ser de apariencia continua, multicapa, de extensión regional, comportamiento semiconfinado a confinado y de importancia hidrogeológica intermedia a pequeña; son captados en las zonas mineras donde los pozos son usados para abastecimiento público y actividades domésticas y pecuarias, así como para el monitoreo del mismo. Es de resaltar que los afloramientos más importantes de esta unidad se localizan en la zona minera; Bloque Becerril-La Loma, del acuífero priorizado, zona que es intervenida por procesos extractivos que modifican hidráulicamente a los acuíferos terciarios y a los del cuaternario.

- c) Grupo de Sedimentos y Rocas Porosas o Fracturadas con Muy Pequeña Importancia Hidrogeológica o Sin Importancia, o Acuíferos con baja a Muy Baja Productividad (A3)

Las rocas y sedimentos con muy baja productividad localizados en las partes marginales del Acuífero priorizado Cesar, los cuales presentan porosidades primarias a secundarias (fracturas, diaclasas y disolución) y permeabilidades variables de acuerdo a la litología. En el área están conformados por las unidades cretácicas, jurásicas y algunas paleozoicas, que hacen parte de los bloques tectónicos Rincón Hondo y Los Venados, generando acuíferos confinados a semiconfinados fracturados de apariencia continua a localmente discontinua (disolución), de extensión local y de muy pequeña importancia hidrogeológica. Niveles estáticos de las rocas cretácicas (K1c) presentan valores desde los 0.21m a 2.84m de profundidad, sugiriendo captaciones en acuíferos someros (Figura 147).

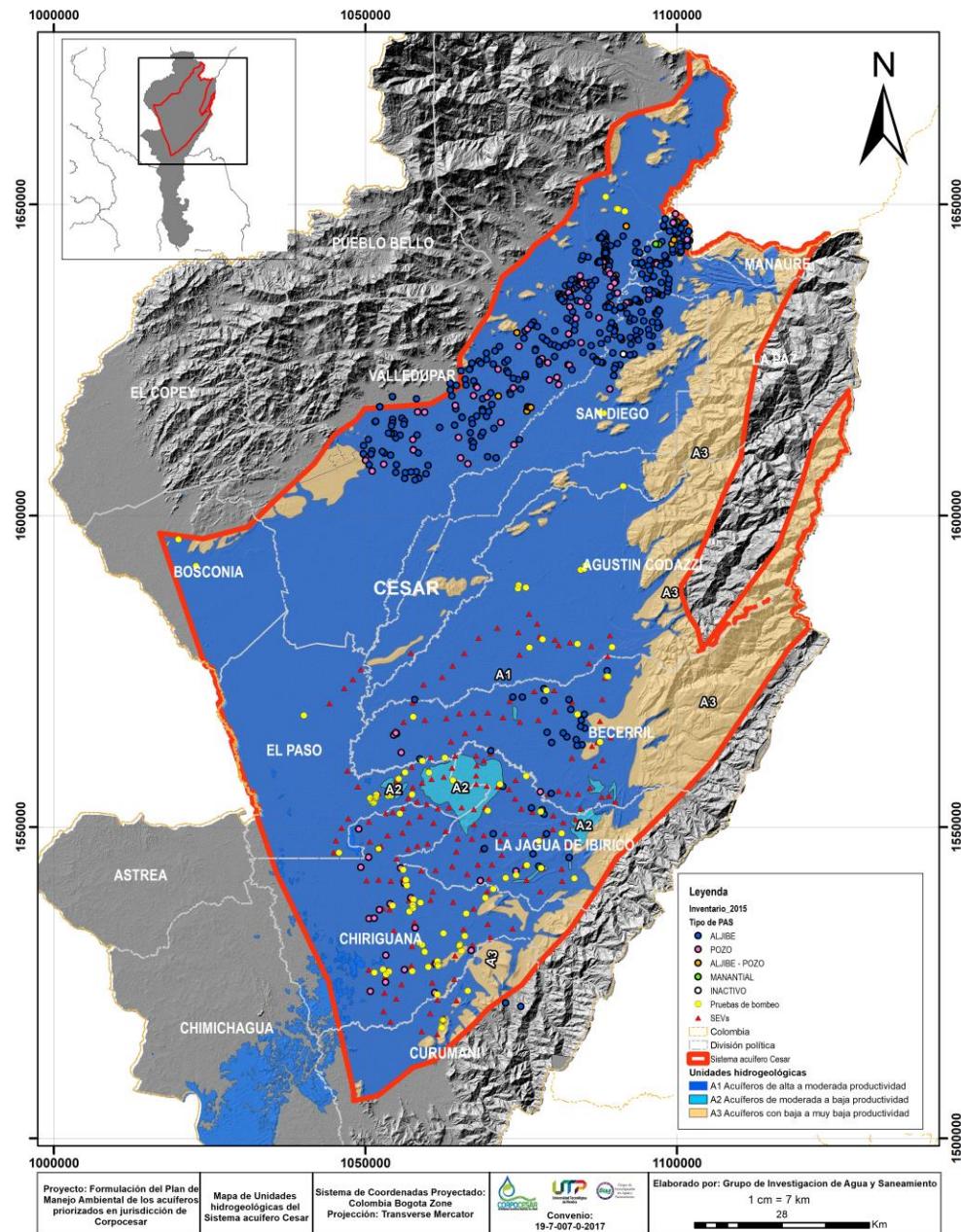


Figura 147. Mapa de Unidades Hidrogeológicas generalizadas para el sistema acuífero Cesar.

2.10.2 Hidrología

Del análisis hidrológico realizado para 25 estaciones se concluye que las lluvias se presentan entre los meses de abril hasta noviembre, los meses de mayor precipitación son mayo (176.5 mm) y octubre (204.8 mm) y los meses de menor precipitación son enero (13.9 mm) y febrero (30.36 mm). La concentración de las lluvias se da en la zona SE, hacia el pie de monte de la Serranía de Perijá entre los municipios de Curumaní, Chiriguaná, La Jagua de Ibirico y Becerril (1500 a 1600 mm de precipitación); áreas donde nacen importantes corrientes de agua que atraviesan las zonas mineras ubicadas en el sistema acuífero Cesar y disminuyendo

en intensidad hacia el NE en área de influencia del pie de monte de la Sierra Nevada de Santa Marta, entre los municipios de Valledupar y Bosconia. La mayor evapotranspiración coincide con la temporada de lluvias en noviembre y disminuye durante el tiempo de menor pluviosidad en la zona. La distribución general de la evapotranspiración en el sistema acuífero Cesar es en dirección NW-SE y hacia la parte central del mismo, oscilando entre 152.3 y 197.4 mm, siendo noviembre el mes de menor evapotranspiración y marzo el mes de mayor evapotranspiración. El cálculo de escorrentías para los períodos húmedos y secos indican mayores escorrentías para los meses de **mayo y octubre** y menor escorrentía para los meses de **marzo y diciembre**. Durante la época del fenómeno del Niño los meses de mayor escorrentía corresponden a **mayo y octubre** y los de menor escorrentía a **marzo y julio**; para el caso del fenómeno de la Niña los meses de mayor escorrentía corresponden a **septiembre y octubre** y los de menor escorrentía a **febrero y marzo**, sugiriendo que existen algunas concordancias en los períodos de máximos y mínimos de escorrentías en la zona asociados a los fenómenos de Niño y Niña. Finalmente, de acuerdo al análisis de la recarga potencial para el sistema acuífero Cesar, la mayor recarga se presenta hacia el sur de la zona de estudio y la menor hacia la zona norte; adicionalmente, se evidencia que el acuífero presenta recarga potencial por precipitación únicamente en el mes de octubre durante período normal y fenómeno del Niño que es el mes de mayor precipitación y en los meses de septiembre, octubre y noviembre durante el fenómeno Niña.

2.10.3 Hidráulica e hidrodinámica

La información hidráulica del acuífero fue recopilada de diferentes fuentes. De los expedientes de concesión de aguas subterráneas se recopiló información de 24 pruebas de bombeo a caudal constante, de las cuales solamente 20 contaban con la información suficiente para el cálculo de los valores de Transmisividad (T), conductividad hidráulica (K), y coeficiente de almacenamiento (S). Las transmisividades calculadas oscilaron entre 3.61 y 1020 m²/día, las conductividades hidráulicas entre 0.02 y 111 m/d y los coeficientes de almacenamiento entre 1,00E-07 a 2,12E-01. De estos valores se puede concluir que existen seis (6) pozos asociados a acuíferos confinados, ocho (8) pozos relacionados con acuíferos semiconfinados y tres (3) acuíferos libres. Adicionalmente, el análisis de las pruebas de bombeo a caudal constante recopiladas de las empresas mineras, los expedientes de concesiones y el estudio realizado por CORPOCESAR y la Universidad del Magdalena permitió mostrar la distribución espacial de los valores de Capacidad Específica, Transmisividad y Conductividad Hidráulica para una zona determinada del sistema acuífero Cesar. La capacidad específica promedio en el área de estudio es de 1.65 lps/m, la transmisividad promedio es de 152,99 m²/día y la conductividad hidráulica promedio es de 16.85 m/día. Los valores de la capacidad específica entre 0 l/s/m y 1,7 l/s/m presentan una mayor concentración en la parte centro-sur hacia el área de influencia de las explotaciones mineras, y los valores más altos se presentan en la zona nor-este del polígono de referencia, siendo mayores a 2,9 l/s/m, en la zona del municipio de Agustín Codazzi, zona con niveles piezométricos altos, asociados probablemente a unidades acuíferas altas (abanicós o conos aluviales); estos valores coinciden con la transmisividad, donde los valores entre 0 m²/d y 170 m²/d, se encuentran en la parte centro-sur del acuífero, y los valores mayores a 418 m²/d se encuentran la parte nor-este del municipio de Agustín Codazzi; así mismo, la conductividad hidráulica con valores entre 0 m/d y 13.1 m/d se encuentran en su mayoría en la parte sur-oeste, mientras que los valores mayores a 37.5 m/d se encuentran en la parte nor-este del acuífero. El Pozo No. 257 ubicado en el sector de Becerril ha generado desviación en la distribución espacial, debido a sus altos valores reportados para la capacidad específica (32,86 l/s/m), transmisividad

(2889,3 m²/d) y conductividad hidráulica (905,74 m/d), resultados que no pueden ser validados debido a que no se cuenta con información de otros años para su análisis.

2.10.4 Hidrogeoquímica

El análisis de la información suministrada permitió clasificar las aguas como de tipo bicarbonatada, sódica-potásica, clorurada, sódica potásica y bicarbonatada cárquica magnésica, permitiendo definir una tendencia específica de las aguas presentes en el sistema acuífero Cesar. Los pH presentan valores que van desde los 5.2 hasta 8, pasando de ácidos (escuela Nueva San Roque), hasta alcalinos. La alcalinidad interpretada arrojó valores entre 25 – 420 mg/l (alcalinidad media). Los valores de dureza se encontraron entre 11.4 y 249.7 mg/l, indicando que hay un comportamiento heterogéneo en los diferentes pozos de monitoreo, encontrando aguas blandas (dureza entre 0 - 75 mg/l) y moderadamente duras (dureza entre 75- 150 mg/l), en la gran mayoría y aguas duras (dureza entre 150 - 300 mg/l) en cinco (5) pozos, finalmente la conductividad eléctrica según resultados de análisis previos, presento rangos entre 50 y 1631 ($\mu\text{s}/\text{cm}$), sugiriendo presencia de aguas con salinidad baja (A1) hasta agua altamente salina (A3).

2.10.5 Red de flujo

El análisis de los datos del inventario de los años 2004, 2013 y 2015, arrojó que los puntos evaluados, en su mayoría aljibes, se encuentran ubicados principalmente en el acuífero de la Llanura Aluvial (QIa), presentando niveles estáticos entre superficiales hasta los 22.5 m de profundidad, niveles dinámicos entre 3.04 m y 21.06 m de profundidad y caudales estimados entre 0.1 l/s a 833l/s. En el acuífero priorizado se identificaron tres tendencias de flujo: 1) tendencia SW , donde aparentemente el flujo local es descendente y el cono aluvial (Qca) se podría comportar como una zona de acuífero que recarga de llanura aluvial (QIa); 2) tendencia SW, la cual es coincidente con el flujo regional natural concordante con la configuración de la cuenca la cual se encuentra inclinada hacia el SE; y 3) tendencia W-SW, el cual es igualmente concordante con la red hídrica regional con tendencia al S-SE debido al control general regional de la cuenca (Sección 2.4). Hacia la parte NE de Valledupar se observa de igual forma que flujos provenientes de esta zona en dirección SW, lo que permite concluir en términos generales es que el acuífero priorizado regionalmente presenta una dirección de flujo W-SW a S, con flujos locales en dirección SE provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta, S-SE provenientes de la parte alta de la Cuenca del Cesar y W-SW originados en la Serranía del Perijá; es importante resaltar que aparentemente existe una barrera hidráulica en la Ciénaga de Zapotosa, la cual no permite recarga con las unidades permeables presentes en la zona.

2.10.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Un modelo hidrogeológico conceptual es la distribución superficial de las unidades hidrogeológicas, la geometría, las propiedades hidráulicas del acuífero (sistema de flujo) y las fuentes, las zonas y la magnitud de la recarga, así como la calidad del agua subterránea. El modelo requiere para su construcción información previa y conocimiento de las características fisiográficas, hidrográficas, climáticas, de los suelos y la región (Betancur, Palacio y Escobar, 2012).

La descripción del sistema acuífero general asociado a la cuenca del río Cesar fue realizada a partir de la revisión y análisis de la información secundaria suministrada por CORPOCESAR, siendo este modelo la primera aproximación a un modelo hidrogeológico debido a que su carácter dinámico hace que se construya continuamente.

La geometría del Sistema de Acuíferos del Cesar (SAC) está relacionada principalmente, hacia la zona del Valle del Río Cesar, a la ocurrencia de rocas terciarias denominadas de base a techo como Formación Barco (Unidad carbonífera, 1000m a 1950m de espesor), Formación Cuervos (espesores entre 249m a 426m), Formación Cuesta (160m a 400m de espesor, localmente 800m) y cuaternarios generalizados (Depósitos de Llanura de inundación, conos o abanicos aluviales, terrazas aluviales y depósitos aluviales recientes, con espesores entre los 5m a 100m), con contactos transicionales entre las dos primeras unidades de la base y discordantes al tope desde la Formación Cuesta hasta los cuaternarios. La geometría es claramente controlada por la tectónica, debido a que el SAC se encuentra limitado por sistemas de fallas tanto al E (Falla Arenas Blancas), W (Falla Cesarito) y S (Falla Caracolíctico) principalmente, que en conjunto delimitan de manera general la Cuenca del Río Cesar, esta fallas tanto del este como del oeste bordean la Sierra Nevada de Santa Marta y a la Serranía del Perijá, zonas donde los afloramientos principales constituyen parte de los acuíferos de la cuenca (A2 y A3).

El MHC propuesto para el Acuífero priorizado Cesar está conformado, de manera general, por tres (3) sistemas acuíferos, el primero conformado por los depósitos o sedimentos cuaternarios sin diferenciar, el segundo por las unidades terciarias que se encuentran discordantes con el cuaternario principalmente, y el último asociado a las rocas cretácicas y pre-cretácicas aflorantes dominante en la Serranía del Perijá.

El contacto entre cuaternario es discordante, entre las unidades terciarias varía de transicional a discordante y en las unidades cretácicas y pre-cretácicas los contactos son variados desde concordantes, transicionales, netos hasta discordantes, de manera local en general pueden presentarse fallados, lo que dificulta el entendimiento sobre la existencia o no de conexiones hidráulicas entre estas unidades. Las unidades terciarias se presentan aflorando en superficie como bloques aislados en la zona centro sur y hacia la parte baja de la Serranía del Perijá, áreas donde el terciario se encuentran topográficamente más alto que las unidades cuaternarias, pero a su vez topográficamente bajo con referencia a las unidades cretácicas y pre-cretácicas aflorando en la Serranía del Perijá. Las descargas de estas unidades es aparentemente progresiva desde las más altas a las más bajas, a través de afloramientos principalmente y en las zonas de contacto. Es importante mencionar que de acuerdo al inventario se cuentan con puntos tanto en el cuaternario como en las rocas cretácicas y pre-cretácicas en las cuales se determinó el nivel freático, indicando claramente que existen captaciones de agua en las tres unidades mencionadas; sin embargo, en estas unidades se desconoce si existe o no conectividad hidráulica, debido a que la mayoría de puntos inventariados se encuentran en la unidad del cuaternario, seguido de los terciarios, los cuales específicamente se localizan en el área de influencia minera y los cretácicos y pre-cretácicos localizados de manera puntual hacia la SNP.

Sistema Acuífero Cuaternario del Cesar (SACC): Debido a la tectónica de la región, este sistema acuífero se encuentra dividido en siete (7) bloques (INGEOMINAS, 1995) o subsistemas delimitados por las fallas de mayor importancia en la cuenca del Cesar e incluidos en la unidad hidrogeológica A1; presentan espesores variables entre los 10m y los 300m, los cuales dependen de las características tectonoestratigráficas asociadas al bloque donde se presentan. En términos generales se encuentra conformada por sedimentos

aluviales recientes, de llanura aluvial, terraza y de abanicos o conos aluviales, constituidos por sedimentos asociados a diversas facies sedimentarias que varían tanto en la horizontal como en la vertical. Esta unidad presenta geopotenciales en el rango de los 0.1 Ohm-m hasta los 5493.6 Ohm-m y un espesor de 142m los cuales varían de acuerdo a la geometría y características tectónicas de la cuenca. Las unidades aluviales recientes (Qal) presenta resistividades entre los 28 Ohm-m a 1219 Ohm-m, con espesores hasta los 13m aproximadamente, la unidad denominada Abanicos o Conos Aluviales (Qcal) presenta resistividades entre los 26 Ohm-m hasta 671 Ohm-m, espesores entre 0,3m hasta 101.6m y profundidades desde superficiales a 114,7m; finalmente la unidad denominada terrazas (Qt) presenta resistividades de 41 Ohm-m a 156 Ohm-m, y profundidades desde superficiales hasta 16.36m. Según las resistividades este acuífero es considerado como libre a semiconfinado en las zonas de abanicos (Qav) pudiendo considerarse de tipo multicapa pero debido a que no se cuenta con suficiente información se asume esta unidad de manera integral. Pruebas de bombeo realizadas en términos generales, no son las más representativas del acuífero debido a que se desconoce el diseño de los pozos (localización de los filtros) o aljibes y que unidad o unidades son las captadas o cortadas; por lo tanto, no se precisa sobre las transmisividades asociadas a esta unidad. Este sistema, en términos generales, es considerado como un acuífero libre. De acuerdo a los análisis hidrológicos, según la base de datos, el principal mecanismo de recarga es la infiltración directa de agua lluvia que puede corresponder posiblemente a los períodos de mayo y octubre. Esta unidad no cuenta con estimaciones de recarga real. Se desconoce si existe algún tipo de conexión hidráulica entre los ríos, lagunas y arroyos tributarios del río Cesar y esta unidad o con la ciénaga de Zapatoza. Los patrones de flujo regionales sugieren que las aguas de la unidad del Cuaternario descargan aparentemente al río Cesar o afluentes del mismo, aunque no se cuentan con datos de campo que sustenten tal hipótesis. Es importante resaltar que el factor estructural de acuerdo a las interpolaciones por el método spline con berreras sugieren que las fallas hacen parte importante dentro del comportamiento de las redes de flujo del acuífero, las cuales a su vez controlan de manera regional la red de drenajes de la cuenca.

Sistema Acuífero Terciario del Cesar (SATC): Este sistema acuífero se encuentran constituido por las formaciones terciarias aflorantes en la zona minera y el pie de monte de la Serranía de Perijá principalmente, rocas que presentan resistividades entre los 3 Ohm-m (arcillolitas, limolitas saturadas) hasta los 12855 Ohm-m (conglomerado), con profundidades desde la superficie hasta los 2193m y espesores centimétricos (0.345m) hasta los 2281m. Valores de unidades saturadas se encuentran entre los 3 Ohm-m hasta los 9 Ohm-m, presentes desde los 12m a los 148m de profundidad y con espesores entre los 6.36m hasta los 118m. Este acuífero desde el punto de vista estratigráfico y sedimentológico es considerado confinado multicapa a semiconfinado. La información de este sistema se encuentra concentrada principalmente en la zona minera presente en el Acuífero priorizado Cesar, la cual de acuerdo al análisis realizado presenta vacíos de información. Los principales mecanismo de recarga considerados para este acuífero, de manera hipotética, son las aguas lluvias por infiltración directa de las lluvias locales. En las zonas donde las unidades terciarias se presentan por debajo del cuaternario, se desconoce la zona de descarga y recarga de las aguas subterráneas de dichos acuíferos. Se desconoce si existe conectividad hidráulica entre estas unidades. Las direcciones de flujo determinadas hipotéticamente en el área determinada como Sicarare presenta dos tendencias NW (flujo local) y SW (flujo de apariencia regional).

Sistema Acuífero Cretácico a Pre-cretácico del Cesar (SAC-PCC): Por último, las formaciones cretácicas y pre-cretácicas presentes ampliamente en las márgenes del acuífero priorizado y como remanentes aislados producto de la deformación tectónica desarrollada en la zona, conforman el basamento geoeléctrico del área,

debido a que los resultados de geopotencial arrojaron valores entre los 1 Ohm-m hasta los 4724 Ohm-m, con profundidades desde los 4m hasta 2321m, posible acucierre; sin embargo, esta unidad hacia la Serranía del Perijá presenta zonas permeables actualmente explotadas, sugiriendo la presencia de acuíferos, de manera preliminar, permeables de tipo fracturados o libres, relacionados a zonas con altos potenciales. No se cuenta con la suficiente información que permita determinar las diferentes propiedades hidrogeoquímicas, hidráulicas e hidrogeológicas de este sistema debido a que gran parte de las actividades extractivas se encuentran hacia el sistema cuaternario y locamente en el sistema terciario.

3. ASPECTOS DE ESPECIAL IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA

3.1 ZONAS DE RECARGA ASOCIADAS AL SISTEMA ACUÍFERO CESAR

La recarga de un acuífero se puede definir como el movimiento del agua procedente del exterior o del área de influencia del mismo (aguas por precipitación, superficiales o de transferencia de otros acuíferos y artificiales) que fluye de manera natural a través de suelos o materiales con alta capacidad de infiltración y permeabilidad hacia las formaciones o unidades hidrogeológicas saturadas, siendo incorporadas en el sistema y alcanzando las reservas subterráneas.

Lerner (1990) plantea la clasificación sobre las fuentes de recarga de la siguiente manera: 1) **Recarga directa o recarga difusa:** originada o proveniente del agua lluvia. 2) **Recarga concentrada o indirecta:** producto de cauces permanentes, estacionales o efímeros. 3) **Flujos laterales:** provenientes de otros acuíferos por transferencia. 4) **Retorno de riegos:** excesos de riegos o perdidas en los canales de distribución. 5) **Recarga urbana:** generados por fugas en las redes de abastecimiento y redes de alcantarillado.

Para la determinación de la recarga, en términos generales dado el alto nivel de incertidumbre inherente en los métodos de evaluación, se mencionan algunos métodos convencionales que permiten definirla, como son: 1) **Medidas directas:** método empleado mediante la construcción de lisímetros los cuales permiten medir el flujo que drena hacia el acuífero. 2) **Balance Hídrico:** en este método se determinan los flujos de entrada y de salida en el sistema, siendo el residuo de la ecuación de balance la recarga del acuífero; de este análisis hacen parte otros elementos como los balances de humedad del suelo, de agua en canales, el método de fluctuaciones del nivel freático y el que iguala la descarga a la recarga. 3) **Trazadores:** utilizado para determinar las fuentes de recarga y descarga, este método permite cuantificar la recarga mediante el balance de masas del trazador. 4) **Aproximación de Darcy:** en este procedimiento se utilizan los valores de cabezas hidráulicas a partir de ecuaciones de flujo como las de Richards y Boussinesq, posteriormente se determina la velocidad de infiltración en el sistema; si se determina directamente de la ecuación de Darcy. 5) **Métodos empíricos:** son aquellas ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con otras variables como es el caso de la precipitación. Es importante resaltar que las técnicas para la determinación de la recarga no cuantifican el valor real sino que estiman la recarga potencial (Rushton, 1988) refiriéndose al agua que es infiltrada pero que no puede o no alcanza el nivel freático del sistema; además, las tasas de recarga pueden ser altamente variables tanto espacial como temporalmente.

INGEOMINAS (2002) en el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (Versión 2.0), Mapa del Estado del Recurso de la Plancha 5-04, plasma las características de las zonas de recarga asociadas con el acuífero Cesar (Ver figura 148), donde establece hacia la parte N-NE desde el municipio de San Diego y parte N-NE del municipio de Valledupar la presencia de sedimentos con flujo intergranular con: 1) “Áreas de recarga constituidas por depósitos no consolidados de alta capacidad de infiltración”, descritas como “Qtz” (Acuíferos cuaternario-Terrazas Aluviales), los cuales se encuentran de manera general entre los ríos Garupal y Sucarabuena localizados en la parte baja del pie de monte de la Sierra Nevada de Santa Marta; y 2) “Áreas de recarga constituida por depósitos no consolidados de baja capacidad de infiltración”, definidos geológicamente como “Qc” (Acuíferos cuaternarios- Conos Aluviales?). Igualmente se presentan, según el plano del INGEOMINAS, rocas con flujo intergranular hacia la zona de Bosconia, donde se observa un “área

de recarga constituida por formaciones sedimentarias multicapa de baja capacidad de infiltración” denominado geológicamente como “Ngm” o Acuífero Cuesta, el cual conforma los acuíferos y unidades confinantes del terciario. Por último, se presentan las rocas con “flujo intergranular y/o a través de fracturas y/o carstificación”, estos, según el mapa del INGEOMINAS se encuentran dominante hacia la Serranía de Perijá y puntualmente en Bosconia al N-NE del municipio; estas áreas son: 1) “Áreas de recarga constituidas por formaciones sedimentarias clásicas y carbonatadas de alta capacidad de infiltración”, definidas geológicamente como Acuífero La Luna (Kism?) o acuíferos y unidades confinantes del Cretáceo; y 2) “Áreas de recarga constituidas por formaciones sedimentarias clásicas y carbonatadas de baja capacidad de infiltración” determinadas por formaciones como Acuífero Cogollo (Kit) y Acuífero la Luna (Ksm), incluidos de igual forma en los acuíferos y unidades confinantes del cretáceo. Se menciona adicionalmente que en dicho mapa se muestran o presentan “Regiones acuíferas con buenas posibilidades de explotación de agua subterránea y acuífero(s) recomendado(s) T= Acuífero Terciario”; estas áreas se encuentran localizadas como franjas alargadas en el pie de monte de la Serranía del Perijá, al E y al NW de Chiriguaná, entre la Jagua de Ibirico al S, pasando por el municipio de Becerril y Agustín Codazzi y hacia la parte N de dicho municipio; y una franja alargada en dirección NE desde el municipio de San Diego hasta el municipio de Villanueva al W. La última zona o franja se encuentra localizada hacia al parte centro norte de la llanura aluvial determinada de igual manera como una zona o región acuífera importante en dirección NE-SW (Ver Figura 148).

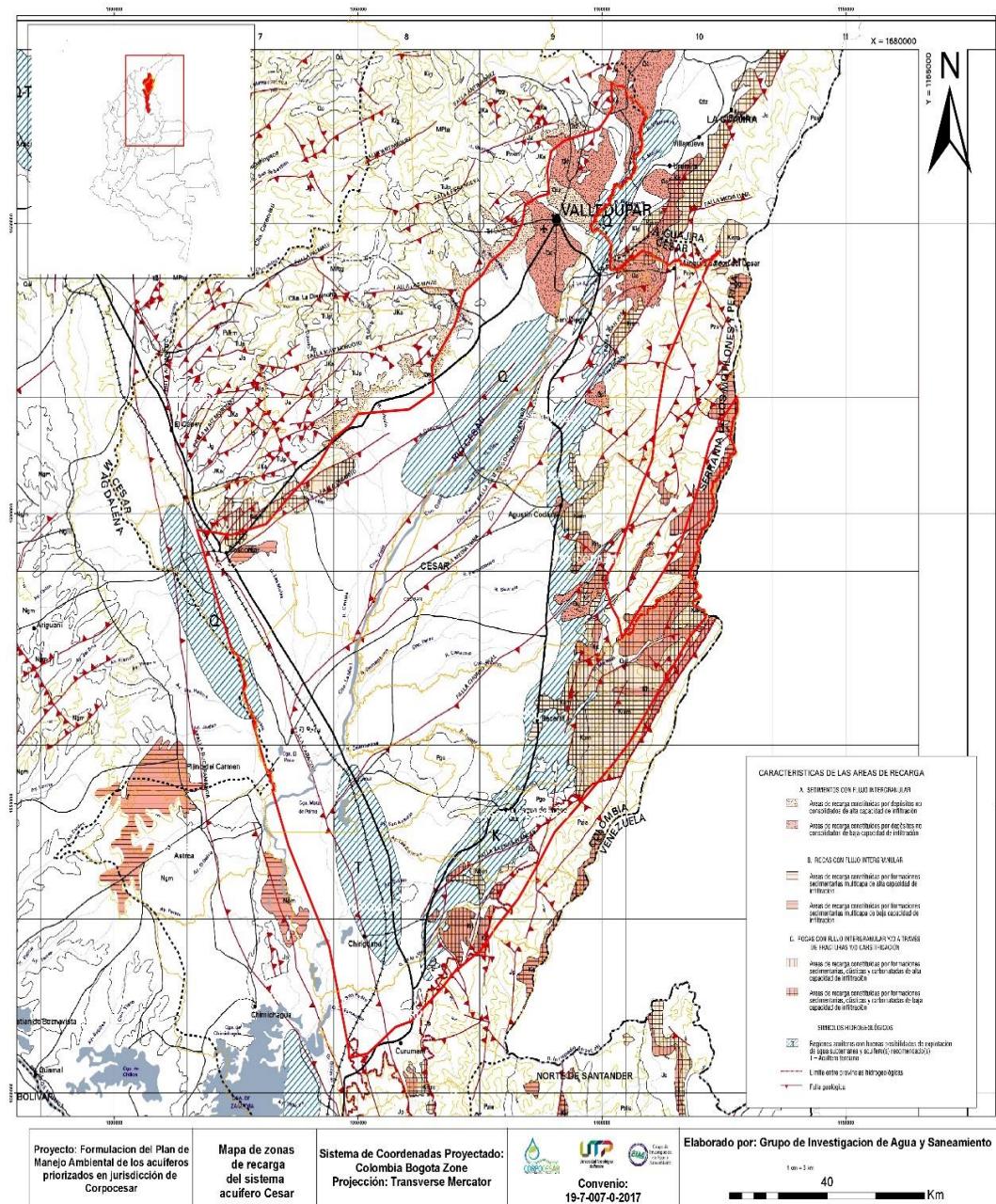


Figura 148. Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (Versión 2.0). Mapa del Estado del Recurso de la Plancha 5-04 a escala 1:500.000 (2002).

INGEOMINAS (2003) en la memoria técnica de la Plancha 5-04 del Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia a Escala 1:500.000, hace referencia al Acuífero Cesar-Qal (6) que está conformado por intercalaciones espesas de gravas y arenas con fragmentos de origen ígneo y volcánico, y por delgadas capas limo-arcillosas y arcillosas que en general se adelgazan lateralmente. La tectónica de la zona que generó un antiguo graben permitió la acumulación de dichos sedimentos, siendo la zona de mayor

acumulación hacia el centro del valle con un espesor de 300 m, cubriendo las sedimentitas terciarias y rocas carbonáticas del cretácico.

El Acuífero Cesar-Qal está conformado por aguas subterráneas generalmente semiconfinadas pero las intercalaciones arcillosas imprimen condiciones confinantes con flujos artesianos surgentes vistos al sur de la ciudad de Valledupar. Mencionan además, que casi todo el flujo dentro del acuífero es de carácter local con infiltraciones moviéndose desde la superficie en la periferia hacia las corrientes superficiales y principalmente al río Cesar; flujos laterales están presentes los cuales recargan probablemente el acuífero provenientes de las rocas calcáreas de las márgenes elevadas de la cuenca.

Para el presente trabajo de diagnóstico del sistema acuífero Cesar, se evidenció que se cuenta con muy poca información que permita determinar o definir de manera precisa las zonas de recarga para el acuífero; por lo tanto, se decide retomar o acoger el mapa de zonas de recarga y el informe presentado por el INGEOMINAS (2002 y 2003) como parte del diagnóstico preliminar del acuífero. Comparando las zonas de recarga establecidas por el INGEOMINAS con las líneas de flujo determinadas en este diagnóstico, se evidencia de que las direcciones de flujo generalmente locales están relacionadas con las rocas presentes a lo largo de la Serranía del Perijá en su flanco occidental y de manera parcial a las rocas presentes en la Sierra Nevada de Santa Marta en su flanco oriental, lo que concuerda con lo planteado por el INGEOMINAS (2002) en el Mapa del Estado del Recurso de la Plancha 5-04 a escala 1:500.000.

Como conclusión se recomienda realizar un programa que permita determinar o definir mediante algunas de las metodologías citadas las zonas de recarga del sistema acuífero Cesar o de los diferentes subsistemas acuíferos que lo conforman, debido a que estos pueden comportarse de manera independiente y no como un solo sistema.

3.2 ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La resolución 872 de 2006 del MADS (antes Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) establece la metodología para determinar el índice de escasez de las aguas subterráneas que es una medida para determinar el grado de explotación de un acuífero en términos de oferta y demanda. Allí se establece la siguiente ecuación:

$$I_{EG} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Ci}}{Q_E} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde,

I_{EG} : Índice de escasez para aguas subterráneas

Q_{Ci} : Caudal captado en la i -ésima captación ($\text{m}^3/\text{año}$)

Q_E : Caudal explotable del acuífero ($\text{m}^3/\text{año}$)

N: número de captaciones

El caudal captado Q_{Ci} se calcula como la sumatoria de los volúmenes extraídos del acuífero (pozos, aljibes,

manantiales) cuantificados a través de sistemas de medición de los mismos cuando las captaciones cuenten con estos. De no ser así, se calculará a través del caudal concesionado. Por último, si no existe información sobre el caudal concesionado, se usarán métodos indirectos basados en los inventarios de PAS, las características de la captación (especificaciones de la bomba, régimen de bombeo, dimensiones del tanque de almacenamiento) y las resoluciones de módulos de consumo establecidas por la autoridad ambiental.

El caudal explotable Q_E por su parte, se calcula con la recarga del acuífero y un coeficiente adimensional que toma valores entre 0.3 y 1 de acuerdo con el régimen de explotación establecido por la autoridad ambiental.

Para la determinación del caudal captado en el sistema acuífero Cesar, se cuenta con información de 276 PAS que reportan información de caudal aproximado ya que la mayoría de estos carecen de sistemas de medición de caudales. Este número representa el 13% del total de PAS que se tienen inventariados para un caudal captado de 2775.15 L/s. En cuanto a la información contenida en los expedientes de concesiones, esta no es representativa del acuífero ya que tan solo un 1% de ellos están legalizados. Por último, la Corporación tiene establecidos módulos de consumo para aguas superficiales los cuales se han aplicado a aguas subterráneas, sin embargo, a la fecha no se ha hecho ningún estudio para establecer los módulos de consumo por uso específicos para aguas subterráneas. Por lo anterior, la información que se tiene para el sistema acuífero Cesar es insuficiente para calcular la demanda real de agua sobre el acuífero. Otra limitante para la estimación de la demanda, es la falta de competencia de la Corporación en los grandes proyectos mineros, lo que dificulta la obtención de información precisa y oportuna.

En cuanto a la oferta del recurso, o caudal explotable es posible calcularla por medio de la estimación de las reservas estáticas y dinámicas del acuífero. En el estudio entregado en el año 1995 y realizado por INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano) se calcularon las reservas estáticas de agua subterránea para el Departamento del Cesar. Estas fueron determinadas por bloques tectónicos usando los valores de espesor saturado, área y la porosidad efectiva. La Tabla 53 muestra las reservas calculadas para los bloques tectónicos pertenecientes al sistema acuífero Cesar.

Tabla 53. Reservas de agua para el sistema acuífero Cesar

Bloque tectónico	Reserva (10^6m^3)
Río Cesar	82411
Los Venados	9817
Codazzi – Sicarare	27020
Becerril – La Loma	22875
Rincón Hondo	13689
TOTAL	155802

La suma total de las reservas estáticas de agua subterránea para el sistema acuífero Cesar suman 155.802 millones de m^3 . Sin embargo, este análisis se confina a la jurisdicción del Departamento del Cesar y es de anotar que el bloque Río Cesar se extiende hacia el departamento de la Guajira. Para el caso de las reservas dinámicas, estas se calculan a partir de la recarga por precipitación obtenida a partir del balance hídrico (sección 2.5). En el sistema acuífero Cesar se presenta recarga por precipitación de 25.7 mm para el mes de Octubre, sin embargo, se debe tener en cuenta que este cálculo no representa una distribución espacial de la zona de estudio.

No obstante, los acuíferos pueden presentar cambios por procesos ocurridos en la escala de tiempo como lo son: las variaciones en los niveles piezométricos asociados a la disminución de la recarga, variaciones por procesos hidrogeoquímicos naturales y cambios de calidad del agua por efecto de la contaminación. Por lo tanto, se desconoce si los volúmenes de agua calculados para el año 1995 han disminuido significativamente, lo que hace que la oferta efectiva de agua subterránea sea inferior a la reportada.

Finalmente, para el sistema acuífero Cesar no es posible establecer el índice de escasez o lo que es lo mismo la relación oferta-demanda, por lo que no se pudo determinar si el grado al que está siendo explotado el acuífero compromete las reservas futuras y se está dando una sobreexplotación del mismo. Así mismo, fenómenos como la variabilidad climática afectará la recarga de acuíferos y la calidad del agua subterránea, siendo los acuíferos someros los más vulnerables que los profundos, pues en la medida en que disminuya la disponibilidad del agua superficial, aumentará la presión sobre la subterránea.

3.3 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación

En Colombia debido a la escasa información con la que se cuenta, se ha empleado recurrentemente el método GOD (Foster, 1987) para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, ya que el método es recomendado para áreas con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de los mismos. El método GOD considera tres parámetros de evaluación:

- Tipo de Acuífero (G):**

Indica la condición de confinamiento del acuífero y establece las siguientes categorías: 1) no confinado, 2) no confinado-cubierto, 3) semiconfinado, 4) confinado y 5) sin presencia de acuífero. La condición de confinamiento de los acuíferos es una función que interviene directamente en la vulnerabilidad natural del agua subterránea ante una contaminación potencial, ya que en general en acuíferos confinados o cautivos con un espesor considerable de capa confinante, el acceso de contaminantes es más restringido. Para el cálculo de los valores se tomó el mapa de unidades hidrogeológicas, ya que en éste se plasman las características de las unidades permeables y los acuíferos que las conforman.

- Litología (O):**

Incluye una caracterización general de la zona que subyace al acuífero a evaluar, en cuanto a la naturaleza litológica (mapa geológico del sistema acuífero Cesar), al grado de consolidación y el fracturamiento de la roca. La importancia de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad radica en su potencial para la interceptación, absorción y eliminación de bacterias y virus patógenos; para la atenuación de minerales pesados y químicos orgánicos a través de precipitación (carbonatos, sulfatos e hidróxidos); para la absorción e intercambio catiónico y para la absorción y biodegradación de algunos compuestos orgánicos de origen natural o sintético. Sin embargo, la zona no saturada puede en ocasiones actuar sólo como un retardante del efecto contaminante, cuando se enfrenta a contaminantes móvil y persistente. Las características litológicas de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos, pueden dar indicios de la condición de confinamiento de los acuíferos y de la profundidad a la que se podría encontrar el agua.

- **Profundidad (D):**

Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados, para lo cual se toma el mapa de niveles piezométricos asociados a las formaciones permeables de mayor importancia en la zona (QIla y Qcal) y los valores de la roca de zócalo (unidades del terciario, cretácicas, jurásicas y paleozóicas).

En ese orden de ideas, se plantea la siguiente ponderación de acuerdo a las características generales del acuífero priorizado (Tabla 54).

Tabla 54. Tabla de ponderaciones estimadas para el cálculo de la vulnerabilidad del sistema acuífero Cesar.

G	TIPO DE ACUÍFERO	UNIDAD	VALOR
No confinado	QIla+Qcal+Qt (A1)	1	
No confinado-cubierto	Basamento (A3)	0,7	
Semi-confinado	Tmc (A2)	0,5	
Confinado	Tpb (A2)	0,3	
Sin presencia de acuífero	-	0,1	
O	LITOLOGÍA	UNIDAD	VALOR
Dominantemente gravas y arenas, en menor proporción arcillas	QIla	1	
Gravas y arenas, en menor proporción limos	Qcal	0,7	
Gravas y arenas	Qt	0,7	
Conglomerados y areniscas y arcillolitas saturadas	Tmc	0,5	
Arenas y limos, interestratificación de carbones	Tpb	0,4	
Basamento geoeléctrico (Kmc, Ksl, Kir, Jqv, Fm. Guatapurí, entre otras)	Basamento	0,3	
D	NIVEL FREÁTICO O ESTÁTICO	UNIDAD	VALOR
Alto	Qt	1	
Medio alto	Basamento	0,7	
Medio	Qcal	0,6	
Bajo	QIla	0,5	

Una vez realizado el análisis mediante la álgebra de mapas en ArcGIS, se generó el mapa de vulnerabilidad (Figura 149). En la figura se puede observar que en términos generales la llanura Aluvial (QIla) presenta vulnerabilidad muy alta seguida por la unidad Abanico Aluvial de Valledupar (Qav) con una vulnerabilidad alta y hacia la parte norte del acuífero se presentan a manera de franjas en dirección NW-SE las vulnerabilidades entre moderadas, bajas a muy bajas. Es importante mencionar que a pesar que las zonas de baja y media montaña asociadas a la Serranía del Perijá se encuentren definidas con una vulnerabilidad muy alta, esto se debe principalmente a que al ser esta una zona de recarga de acuíferos, la pérdida de cobertura boscosa y el mal uso del suelo, son factores que disminuyen drásticamente la capacidad de recarga, sumado a que de acuerdo al análisis hidrológico del sistema acuífero Cesar no presenta recargas significativas por precipitación salvo en el mes de octubre para los tres escenarios evaluados. Cabe resaltar de igual manera, que las condiciones de cobertura vegetal y la capacidad de retención de los suelos a lo largo del tiempo se han visto afectadas producto de la ganadería extensiva, perdiendo gran capacidad de retención de los suelos y

convertiéndose las aguas de precipitación en agua de escorrentía con baja capacidad de infiltración debido a modificaciones en las texturas de los suelos, la temperatura del suelo y la intensidad de las precipitaciones.

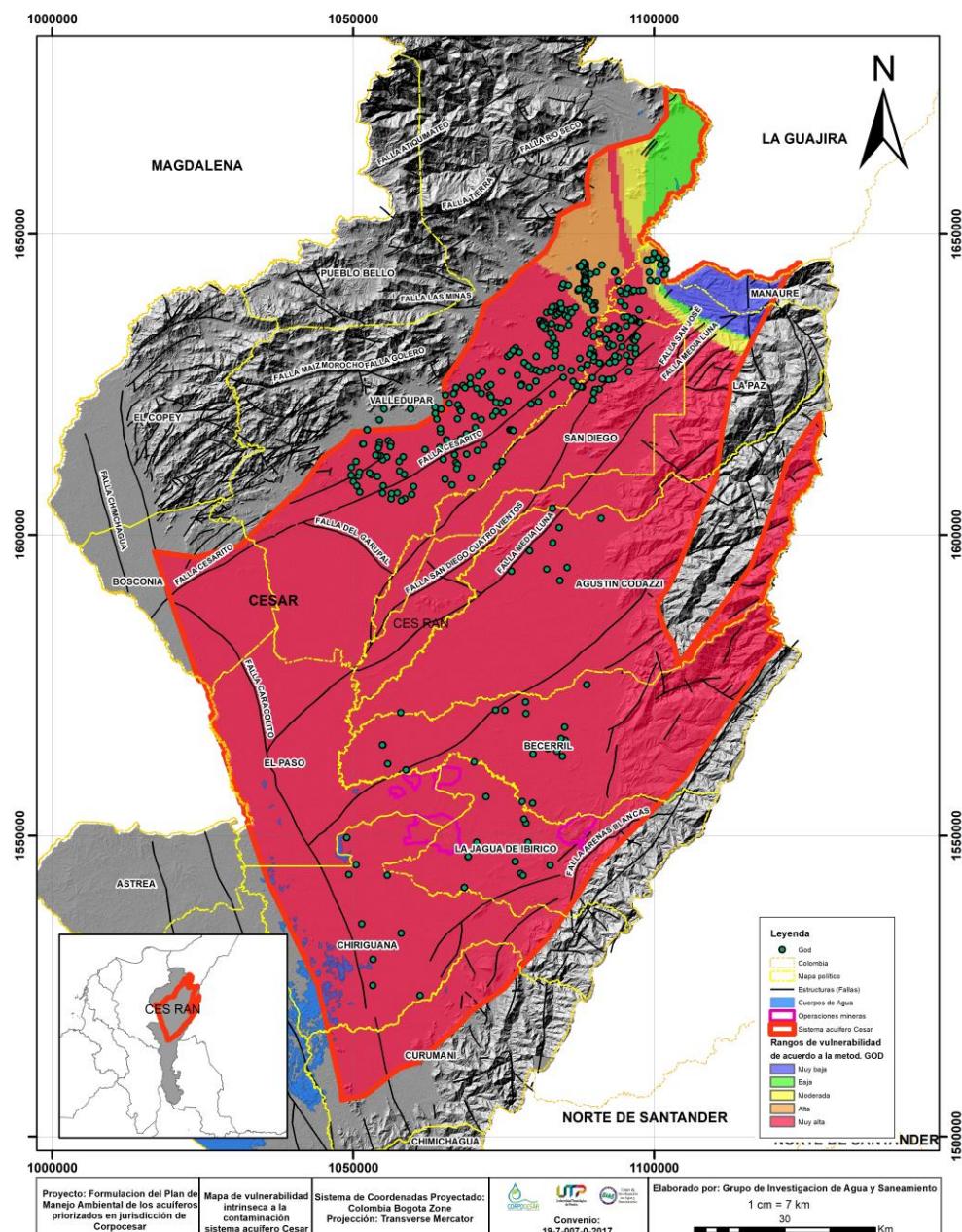


Figura 149. Mapa de Vulnerabilidad Intrínseca mediante el método GOD para el sistema acuífero Cesar.

3.3.1 Inventario de fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas

Los acuíferos se contaminan desde la superficie como consecuencia de descargas de contaminantes o lixiviados sobre el subsuelo generados por las actividades urbanas, industriales, agrícolas, mineras, entre otras (Zaporozec, 2002). Las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales,

pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar. Sucede esto porque las aguas del acuífero tienen un ritmo de renovación muy lento. Por lo tanto, cuando se contamina, tarda mucho tiempo en recuperar sus condiciones anteriores. Los perfiles naturales del suelo atenúan muchos contaminantes de forma activa. Sin embargo, no todos los perfiles de suelo y estratos subyacentes son igualmente eficaces en la atenuación de contaminantes (Foster et al., 2001) y los acuíferos, son particularmente vulnerables a la contaminación cuando, por ejemplo, se encuentran rocas consolidadas altamente fisuradas. Así mismo, los acuíferos no confinados o freáticos son más susceptibles a ser contaminados cuando su zona no saturada es muy delgada y la profundidad al nivel freático es poca.

El uso indiscriminado de productos agrícolas tales como fertilizantes, pesticidas y plaguicidas, así como el vertido de desechos industriales, los lixiviados provenientes de los botaderos de basuras, los materiales producidos durante las labores mineras y los desechos de la actividad ganadera, son fuentes de contaminación de las aguas subterráneas. La Tabla 55 muestra una clasificación general de las actividades potencialmente contaminantes de los acuíferos y los contaminantes derivados de cada actividad.

Tabla 55. Fuentes de contaminación de las aguas subterráneas y los contaminantes derivados de cada actividad

FUENTE DE CONTAMINACIÓN	TIPO DE CONTAMINANTE	CAUSAS
Actividad agrícola	Nitratos, amonio, pesticidas, organismos fecales	Aplicación incontrolada de agroquímicos
Actividad pecuaria	Nitrógeno, fósforo, organismos fecales	- Manejo inadecuado de los residuos sólidos y líquidos provenientes de la actividad pecuaria. - Uso de residuos sólidos y líquidos de la actividad como abono.
Saneamiento <i>in situ</i> (lagunas de oxidación, alcantarillado, descargas de aguas residuales al suelo, pozos sépticos, letrinas)	Nitratos, hidrocarburos halogenados, microorganismos	- Mal funcionamiento y poco mantenimiento - Baja cobertura del sistema de alcantarillado. - Inexistencia de STAR. - Construcción deficiente (ej. Falta de impermeabilización).
Sitios con almacenamiento subterráneo de hidrocarburos (EDS)	Hidrocarburos aromáticos, benceno, fenoles, hidrocarburos halogenados	- Fugas de los tanques de almacenamiento. - Derrames accidentales.
Disposición de residuos sólidos y disposición de lodos residuales domésticos	Amonio, salinidad, hidrocarburos halogenados, metales pesados, nitratos	- Disposición inadecuada en botaderos a cielo abierto. - Producción de lixiviados por mala operación de los sitios de disposición.
Industria (metalúrgica, pintura y esmaltes, maderera, tintorerías, pesticidas, curtidurías)	Tricloroetileno, tetracloroetileno, hidrocarburos halogenados, fenoles, metales pesados, cianuro, alcalobenceno, hidrocarburos aromáticos, pentaclorofenol.	- Mala disposición y almacenamiento de residuos sólidos y líquidos
Exploración/Extracción de gas y petróleo	Salinidad (cloruro de sodio), hidrocarburos aromáticos	- Derrames accidentales por mal estado y falta de mantenimiento en tuberías
Minas de carbón y metales	Acidez, metales pesados, hierro, sulfatos	- Existencia de minería ilegal. - Uso indiscriminado de metales.
Cementerios	Putrescina, cadaverina, microorganismos patógenos, metales pesados, isótopos radiactivos, dioxinas.	Lixiviación de la descomposición cadavérica.

Fuente: Adaptado de Banco Mundial (2002), FAO (2006b), Betancur (2008), Velasco y Minota (2012).

En el sistema acuífero Cesar se han identificado diversas fuentes de contaminación de las aguas subterráneas. Gran parte de estas amenazas se encuentran asociadas a los núcleos poblados que presentan un acelerado crecimiento poblacional que trae consigo impactos significativos sobre la cantidad y la calidad del agua subterránea. Un estudio desarrollado por Corpocesar e IDEAM (2006) identificó durante recorridos de campo las siguientes fuentes de contaminación:

- El inadecuado manejo de residuos sólidos y vertimientos líquidos es un común denominador en muchos municipios del departamento que se caracterizan por bajas inversiones en infraestructura de los sistemas de tratamiento de aguas servidas y por el bajo o nulo mantenimiento a la infraestructura existente. En algunos casos los sistemas de tratamiento de aguas residuales ya superaron su capacidad de diseño.
- Pozos sépticas o letrinas sobre el acuífero libre e interceptando la dirección del flujo de las aguas subterráneas.
- Disposición inadecuada de residuos líquidos provenientes de las letrinas o pozos sépticos, de lagunas de oxidación de algunos municipios, y de los residuos provenientes de los cultivos de palma.
- Disposición inadecuada de residuos sólidos en botaderos a cielo abierto en algunos municipios, los cuales se localizan sobre el acuífero libre que son altamente vulnerables a la contaminación. Así mismo, se evidenció la disposición de residuos en el fondo de aljibes abandonados.
- Construcción de pozos de mediana a gran profundidad sin las mínimas normas técnicas de construcción y operación que eviten que sus conos de bombeo se pongan en contacto hidráulico con focos de contaminación.
- Identificación de estaciones de servicio que no cuentan con pozos de monitoreo para detectar fugas de los tanques de almacenamiento.

A continuación se describen de manera más detallada cada una de las fuentes potenciales de contaminación en el sistema acuífero Cesar.

Actividad Agrícola

La agroindustria es otra actividad que representa una amenaza de contaminación de los acuíferos del departamento por el uso indiscriminado de agroquímicos y la mala disposición de los subproductos de la actividad. Según información suministrada por la Gobernación del Cesar y publicada en los datos abiertos en línea del Gobierno Nacional, para el año 2016 en el sistema acuífero Cesar se encuentran principalmente cultivos de palma de aceite con 32.696 Ha; café 19.991 Ha; maíz tradicional 12201 Ha y arroz 12005 Ha. En la Figura 150 se puede ver la distribución de los principales cultivos por municipio.

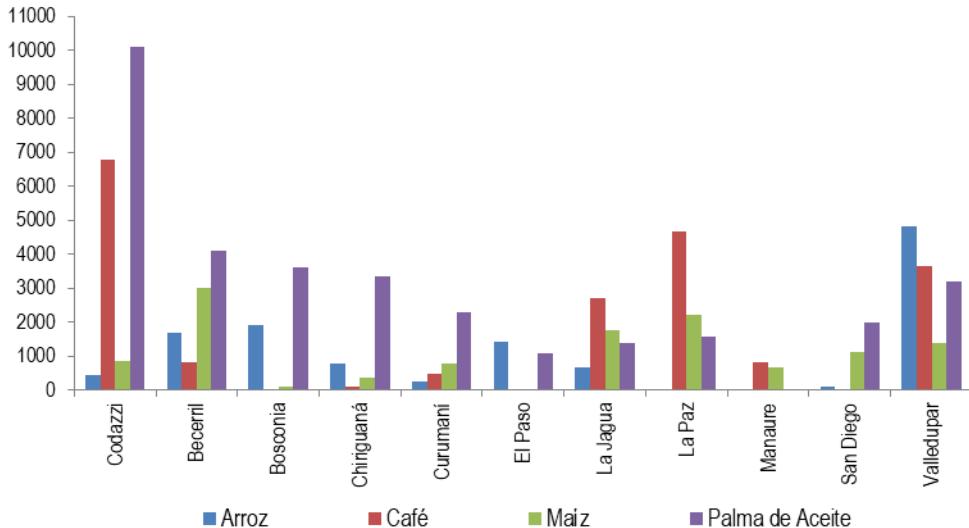


Figura 150. Distribución de los principales cultivos por municipio en sistema acuífero Cesar.

Se ha identificado prácticas inapropiadas de enterramiento de contenedores con agroquímicos en el municipio de Agustín Codazzi (Corpoceasr- IDEAM, 2006) que con el paso del tiempo por su deterioro liberan al suelo y posteriormente a los acuíferos, grandes cantidades de contaminantes, especialmente nitratos, fosfatos y pesticidas convirtiéndose en una amenaza importante de contaminación de los acuíferos de la zona.

Actividad Pecuaria

Según el último censo nacional pecuario 2016, el departamento del Cesar cuenta con 1.357.512 cabezas de ganado de los cuales el 25% se concentra en los municipios de Valledupar y Agustín Codazzi. Corpocesar e IDEAM, 2006 en su informe reportan que durante las visitas de campo pudieron evidenciar que en la mayoría de los aljibes que se ubican en la zona rural de los municipios de Codazzi, Bucaramanga, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y El Paso, se encuentran cerca o dentro de establos que albergan ganado vacuno y equino, además de porquerizas; en las visitas de campo fue posible observar la presencia de excrementos animales cerca de estas captaciones en sus zonas de operación y protección.

Saneamiento In Situ

El tratamiento de aguas residuales (PTAR) de los municipios de Agustín Codazzi, Bucaramanga, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná, El Paso y Bosconia se lleva a cabo mediante la operación en serie de lagunas de oxidación. Según información reportada por Corpocesar e IDEAM, 2006 las PTARs de los municipios de Codazzi, Bucaramanga, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná se encuentran localizadas sobre una secuencia de gravas arenas, en una matriz limo arenosa a arcillosa que conforman la zona superior de los Sistemas Acuífero de Origen Aluviales (Qlla). Muchos de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales fueron ubicados sobre acuíferos libres por lo que son más vulnerables a la contaminación.

Según la información reportada por la Contraloría departamental 2015, la capacidad de diseño de algunas lagunas ya fue superada, esto indica que no se le está dando un tiempo de retención suficiente al agua residual para su tratamiento, debido al que el caudal de entrada supera el caudal de diseño. Con esto se puede afirmar que el efluente de la planta presenta contaminación (sólidos, algas y espumas) que influyen sobre la calidad del cuerpo de agua superficial receptor, o del sistema acuífero superficial si la impermeabilización de la laguna no es adecuada y los efluentes se infiltran al suelo. Durante visitas de campo se pudo constatar que el efluente de la mayoría de las lagunas presenta coloración verdosa, que indica la presencia de algas y baja sedimentación en las mismas.

Adicionalmente, en la zona rural existe una baja cobertura del servicio de alcantarillado, por lo que muchos predios rurales vierten sus aguas residuales directamente al suelo. Algunos de los PAS inventariados reportan condiciones sanitarias de las captaciones (Figura 151).

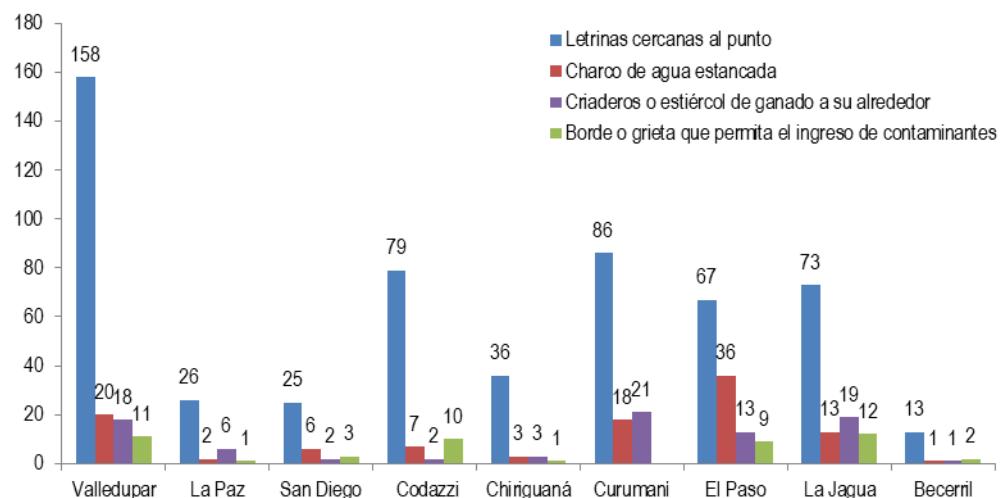


Figura 151. Condiciones sanitarias de las captaciones de los PAS en el sistema acuífero Cesar

La Figura 151 muestra que con mucha frecuencia se encuentran pozos sépticos ubicados cercanos a las captaciones lo que incrementa la amenaza de contaminación ya que éstas interceptan la dirección de flujo de las aguas subterráneas. Así mismo, en un número importante de pozos se encontraron charcos de agua estancada y animales o estiércol cerca de las captaciones.

Adicionalmente, al revisar los expedientes de vertimientos para el sistema acuífero Cesar, se encontró que solamente existen 44 permisos de vertimientos en todo el acuífero. De estos vertimientos, se pudo evidenciar que casi la mitad de los mismos hacen las descargas de las aguas servidas suelo y un porcentaje pequeño a fuentes de agua superficiales cercanas, los demás descargan directamente al sistema de alcantarillado (Figura 152).

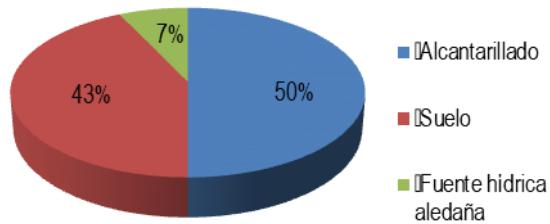


Figura 152. Receptor de los vertimientos sistema acuífero Cesar

Disposición de Residuos Sólidos.

En los municipios de Becerril, Chiriguaná y Bosconia se hace la disposición final de residuos sólidos en botaderos a cielo abierto (Figura 153). Por su parte, los rellenos sanitarios de las cabeceras municipales no cuentan con medidas que eviten eventos potenciales de contaminación, como es la infiltración de los lixiviados generados.



Figura 153. Botadero a cielo abierto Chiriguaná. Fuente: ESP de Chiriguaná

En la Tabla 56 se presentan el estado de los sistemas de alcantarillado y de la disposición de residuos sólidos en cada uno de los municipios que conforman el sistema acuífero Cesar.

Tabla 56. Vertimientos líquidos y sólidos en los municipios del sistema acuífero Cesar.

Acuífero	Municipio	Alcantarillado	Disposición de Residuos Sólidos
Cesar	El Paso	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 95% • Cabecera municipal: STAR, laguna de oxidación que vierte al río Calenturitas. • Hay 1730 predios en la zona rural que disponen directamente al suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 100% • Disposición en relleno regional de Bosconia.
	La Jagua De Ibirico	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 90% • Posee 2 STAR, lagunas de estabilización y luego es vertido al río Sororia y al caño Lavar. Las lagunas no operan correctamente y no cumplen con su objetivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 100% • Disposición de residuos en el relleno sanitario ubicado en Bosconia. • El municipio cuenta con planta de beneficio animal a la cual no se le hace control de vertimientos.
	Agustín Codazzi	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 75% 90% • Cuenta con STAR, laguna de oxidación que vierte al caño Culebras. Las lagunas presentan falta de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disposición en relleno sanitario de Valledupar.
	Becerril	<ul style="list-style-type: none"> • STAR. Cuenta con 3 lagunas de oxidación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 90% • Se lleva a una celda transitoria que por sus características puede ser considerado botadero a cielo abierto.
	Chiriguaná	<ul style="list-style-type: none"> • STAR. Cuenta con tres lagunas de estabilización. Hace vertimiento a la ciénaga grande. 	<ul style="list-style-type: none"> • Botadero a cielo abierto.
	Bosconia	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 100%. • La cabecera municipal cuenta con sistema de lagunas que vierte al caño Garcés. Las lagunas no funcionan correctamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 80% • Disposición de residuos en el relleno sanitario regional ubicado en el municipio de Bosconia.
	Curumaní	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con sistema de lagunas, el cual no funciona correctamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disposición de residuos en el relleno sanitario regional ubicado en el municipio de Bosconia.
	La Paz	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con sistema de lagunas. Al 30 de noviembre de 2017 no se había realizado caracterización de las aguas residuales. 	<ul style="list-style-type: none"> • La recolección, transporte y disposición final de residuos del municipio de La Paz es realizado por Interaseo S.A.S E.S.P., con disposición en el relleno sanitario de Valledupar.
	Manaure	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con sistema de lagunas que ofrece un tratamiento adecuado de las aguas residuales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disposición de residuos en el relleno sanitario de Valledupar.
	San Diego	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura: 97% • Cuenta con sistema de lagunas. Al 24 de octubre de 2017 no se había realizado caracterización de las aguas residuales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disposición de residuos en el relleno sanitario de Valledupar.
	Valledupar	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con sistema de lagunas, pero no funciona correctamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disposición de residuos en el relleno sanitario Los Corazones ubicado en el municipio.

Fuente: Informes ambientales de la contraloría 2014-2015. PSMVs. PGIRS.

Actividad industrial

Otra amenaza significativa de contaminación del agua subterránea son las descargas de desechos industriales (PNUD, 2010). Según el informe de caracterización de impactos ambientales por vertimientos de diferentes sectores del departamento (Corpocesar, 2011), muchas industrias vierten directamente a fuentes de aguas superficiales o al suelo y en un gran número de las que poseen sistema de tratamiento de aguas residuales se evidencian fallas en su funcionamiento y la alta presencia de contaminantes en los efluentes por falta de mantenimiento. En la Figura 154 se presentan los diferentes vertimientos por sectores para cada uno de los sistemas de acuíferos.

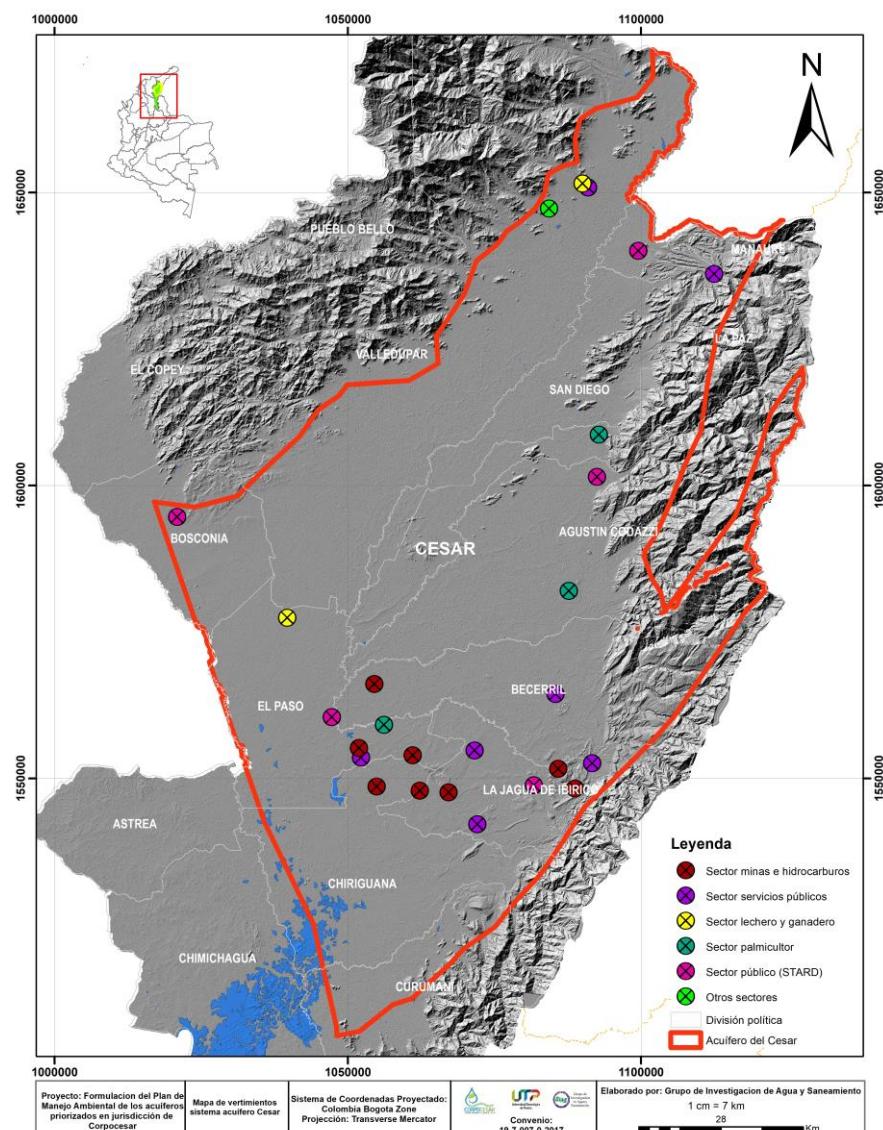


Figura 154. Vertimientos por sectores productivos en el sistema acuífero Cesar.

Fuente: Corpocesar, 2011

Minería

El departamento y especialmente el sistema acuífero Cesar tiene una fuerte presencia de la minería a cielo abierto para la extracción de carbón (Figura 155). El principal renglón económico del departamento del Cesar es la minería, la cual representa el 35.3% del PIB departamental. Esta actividad se encuentra concentrada en el sistema acuífero Cesar en los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y Becerril.

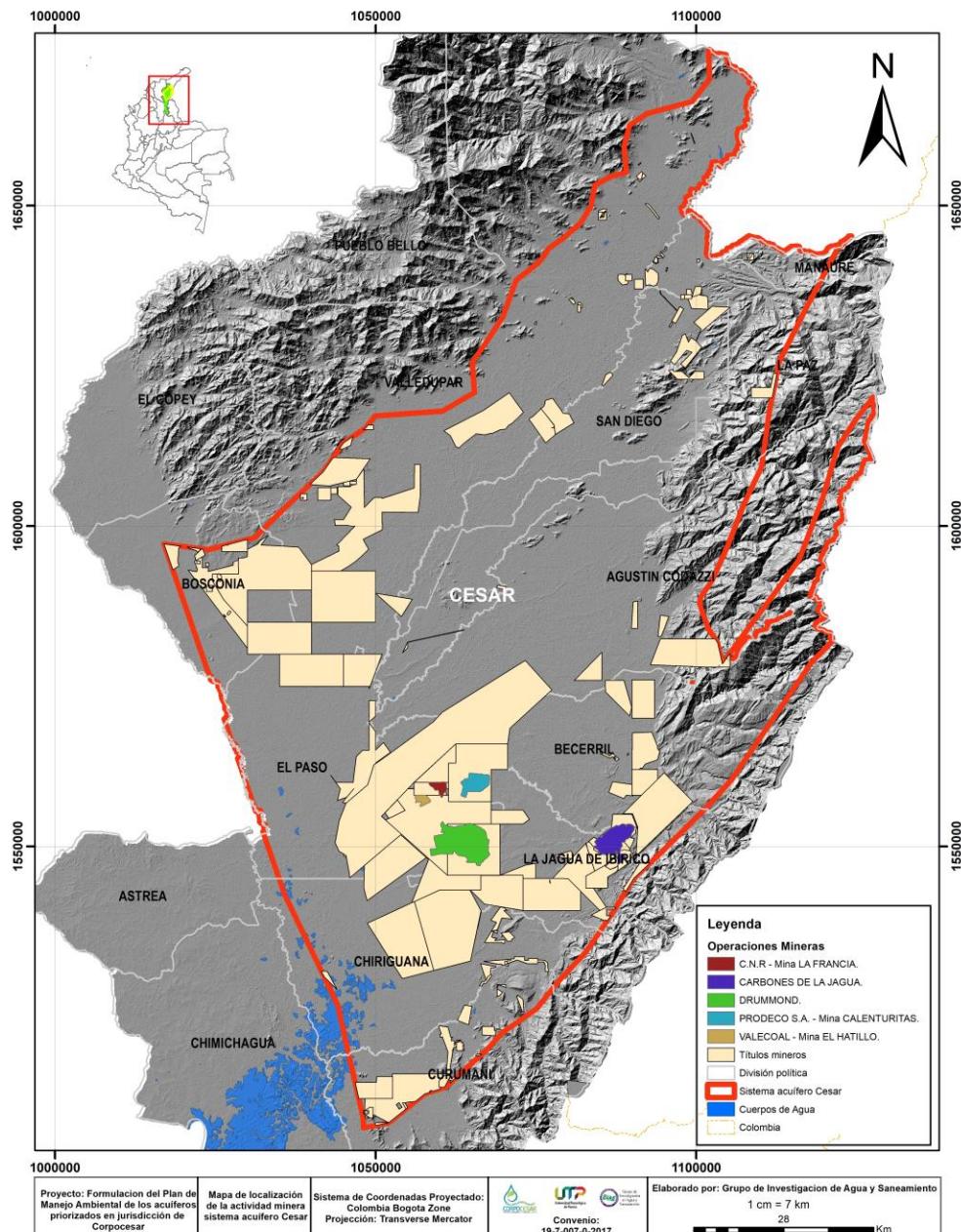


Figura 155. Actividad minera en el sistema acuífero Cesar.

Los impactos ambientales y sobre el acuífero generados por la actividad minera son múltiples aunque estos no están completamente previstos y documentados. Se destacan la remoción del suelo y subsuelo, la desviación de cauces de ríos que eventualmente alimentan el acuífero (ej. El río Calenturitas) y que se evidencian en la disminución de los niveles freáticos. Adicionalmente, los desechos provenientes de las minas presentan altas concentraciones de metales y metaloides como arsénico, cadmio, cobre y molibdeno. Las aguas asociadas a los botaderos de las minas presentan no solo altas conductividades sino también altas concentraciones de sulfatos, bicarbonatos y nitratos. Todos estos desechos (drenajes ácidos de minas) degradan la calidad de las aguas superficiales y subterráneas a escala global y regional (CGR, 2014). La CGR, pudo establecer la existencia de indicios de contaminación de aguas subterráneas con coliformes fecales en los acuíferos aluviales ubicados en la zona de influencia de los proyectos mineros de Drummond y Carbones de la Jagua. Así mismo, las muestras de agua, roca y sedimentos tomados durante el estudio demuestran que la mina de Drummond es una fuente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por sólidos suspendidos y compuestos químicos. Un diagnóstico realizado por Corpocesar en el año 2015, arroja que la actividad de extracción de carbón es una de los mayores generadores de Residuos Especiales y Peligrosos – RESPEL- tanto líquidos como sólidos, siendo los municipios de El Paso y La Jagua de Ibiríco los mayores generadores (Corpocesar, 2015). El Paso genera el 83% del total de RESPEL del departamento.

Según el último censo nacional minero (2010-2011), en el departamento del Cesar aproximadamente 10% de las unidades de producción minera son ilegales y no cuentan con título minero. Estas unidades se encuentran ubicadas dentro del sistema acuífero Cesar en los municipios de la Paz, La Jagua de Ibiríco, Curumaní, Chiriguaná, Codazzi. Otro agravante al problema de contaminación es que el 70% de las unidades de producción minera del país no cuenta con ningún tipo de autorización o permiso ambiental.

Exploración y conducción de hidrocarburos

Otras actividades como la extracción de hidrocarburos (Figura 156) y su infraestructura asociada como conducciones y pozos también representan una fuente potencial de contaminación del acuífero por ruptura accidental de las conducciones, volcamiento de vehículos de transporte y liberación de hidrocarburos que pueden migrar del suelo al acuífero por infiltración.

En la Corporación se tiene reporte de 25 accidentes desde el año 2009 (Tabla 57). De los cuales, 18 casos corresponden a derramamiento de hidrocarburos (25247.2 galones y 5 casos con cantidad indeterminada), 2 casos de derramamiento de carbón (3 toneladas y un caso con cantidad indeterminada), 3 casos de aceite vegetal (195 galones y dos casos con cantidad indeterminada), uno de nitrato de amonio (30 toneladas) y uno de hidróxido de sodio (4.5 toneladas).

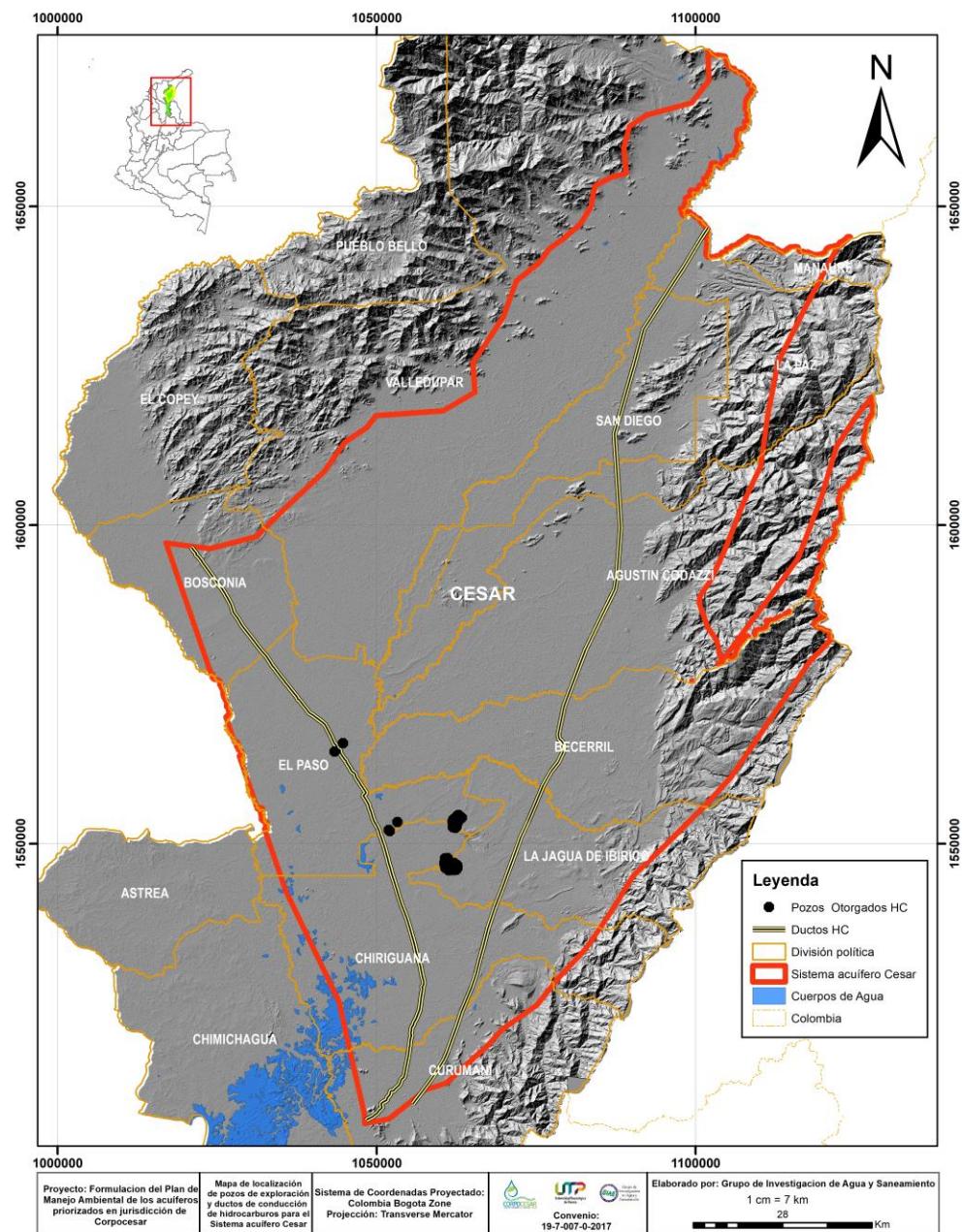


Figura 156. Pozos de exploración y ductos de conducción de hidrocarburos y gas en el sistema acuífero Cesar.

Tabla 57. Reportes de accidentes y derrames de contaminantes

Fecha	Actividad Económica	Municipio	Producto Derramado	Cantidad Derramada	Afectación a los Recursos Naturales
22/09/2009	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	La Paz	Alquíl benceno lineal	2.300 Galones	No afectó agua ni suelo
25/10/2011	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	La Jagua de Ibirico	Biodisel	2.5 Barriles	Suelo
13/08/2012	Transporte de Carga	El Paso	Nafta	No determinado	Suelo
11/11/2012	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Chiriguaná	Biodisel	100 Barriles	Suelo
14/04/2013	Transporte de Hidrocarburos	Curumaní	Petróleo crudo	15 Barriles	Suelos
9/05/2013	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Bosconia	Carbón	No determinado	No reporta
19/06/2013	Transporte de Hidrocarburos	Curumaní	Petróleo crudo	91 Barriles	Suelo y árboles
2/08/2013	Transporte de Carga	Bosconia	ACPM	No determinado	Suelo
21/08/2013	Transporte y Almacenamiento de Sustancias	Chiriguaná	Aceite de Palma	No determinado	No reporta
19/11/2013	Transporte de Carga	Curumaní	Petróleo crudo	9.576 Galones	Recurso hídrico Quebrada Aguacatal, Quebrada Quiebra Dientes
3/02/2014	Exploración de hidrocarburos convencionales y gas metano asociado a carbón	El Paso	Agua-lodo base agua	1.6 barriles	No afectó agua ni suelo
2/04/2014	Transporte de Carbón	Bosconia	Carbón	3 Toneladas	Fuente Hídrica Caño Peraluz
8/05/2014	Transporte de Petróleo	Bosconia	Soda Caustica Liquida (Hidróxido de Sodio)	4.5 Toneladas	Suelo
1/07/2014	Transporte de crudo	Chiriguaná	Petróleo crudo	No determinado	Árboles, suelo
9/07/2014	Transporte de Carga	La Jagua de Ibirico	ACPM	12 Galones	No reporta
21/02/2015	Transporte de Carga	Bosconia	ACEM	100 Galones	Suelo
8/04/2015	Exploración de hidrocarburos convencionales y gas metano asociado a carbón	El Paso	ACPM	15 Galones	Suelo
24/08//2015	Transporte de Carga	Bosconia	Petróleo crudo	No determinado	Suelo y Agua
25/09/2015	Transporte de Carga	Bosconia	Nitrato de Amonio	30 Toneladas	Suelo
5/11/2015	Transporte de Carga	Valledupar	RBD de Palmiste	195 Galones	Suelo

Fecha	Actividad Económica	Municipio	Producto Derramado	Cantidad Derramada	Afectación a los Recursos Naturales
27/02/2016	Transporte de Carga	El Paso	Petróleo crudo	2.520 Galones	Suelo
15/06/2016	Transporte de Carga	Curumaní	Petróleo crudo	500 Galones	No reporta
29/06/2016	Transporte de Carga	El Paso	Aceite de Palma	No determinado	No reporta
13/08/2016	Transporte de Carga	Curumaní	Xileno	30 Barriles	No reporta
20/06/2017	Transporte de Carga	La Jagua de Ibirico	ACPM	No determinado	No reporta

De acuerdo a la información contenida en la Tabla 58, desde el año 2008 se han reportado 9 contingencias en oleoductos; 8 de ellas por derramamiento de hidrocarburos (1052 barriles y 2 casos sin determinar cantidad), y un caso de derramamiento de 10 barriles de aguas residuales.

Tabla 58. Contingencia en oleoductos.

Fecha	Actividad Económica	Municipio	Producto Derramado	Cantidad Derramada	Afectación a los Recursos Naturales
8/04/2008	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Bosconia	Diesel	No determinado	Suelo
21/07/2008	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Bosconia	Diesel	281 barriles	Suelo
22/07/2009	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Bosconia	Diesel	80 Barriles	Suelo
9/01/2010	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Chiriguaná	Diesel	205 Barriles	Suelo y agua
11/06/2010	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Chiriguaná	Diesel	480 Barriles	Suelo y fuente hídrica caño El Tupe.
11/06/2010	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Chiriguaná	Crudo	No determinado	No reporta
28/07/2010	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Chiriguaná	Diesel	4 Barriles	Suelo y agua
3/06/2016	Minería	El Paso	Aguas residuales	10 Barriles	Suelo
27/07/2017	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburo	Curumaní	Nafta	2 Barriles	Suelo

Estaciones de servicio (EDS)

Según información recogida de los inventarios de PAS elaborados por la Corporación y de las concesiones de aguas subterráneas, muchas captaciones se encuentran localizadas en estaciones de servicio y lavaderos de vehículos. Las Estaciones de servicio deben contar con pozos de monitoreo para detectar fugas en los tanques subterráneos de almacenamiento de combustible. Sin embargo, muchos de ellos no cuentan con un sistema de monitoreo (Corpocesar e IDEAM, 2006).

Cementerios

En la cabecera municipal de los municipios de Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná, y El Paso, se encuentran cementerios que fueron ubicados sobre sistemas acuíferos vulnerables a la contaminación (Corpocesar e IDEAM, 2006). La descomposición de los cadáveres generan una sustancia llamada cadaverina la cual al no existir un monitoreo de los cementerios puede estar yendo directamente al acuífero.

3.3.2 Perímetros de protección de captaciones

Para proteger las aguas subterráneas y disminuir su riesgo de contaminación, se debe restringir o controlar ciertas actividades dentro del área circundante a la captación. Existen diferentes niveles de perímetros de protección de pozos que responden a objetivos y criterios diferentes. Foster et al. (2007), plantean cuatro niveles: la zona operacional; la zona de inspección sanitaria; el área de protección microbiológica y; el área de captura total de la fuente. De acuerdo con estos niveles, se definen estrategias de protección de los acuíferos a través de las cuales se podrán prohibir, restringir o, aceptar condicionadamente, la ubicación de ciertas actividades potencialmente contaminantes.

Para el caso del sistema acuífero Cesar, se cuenta con la información contenida en los inventarios de PAS de las condiciones de protección de las captaciones para 1500 puntos aproximadamente (Figura 157). Las condiciones más críticas se presentan por la ausencia de cubiertas adecuadas, falta de pisos de cemento alrededor de las captaciones y cercos inadecuados.

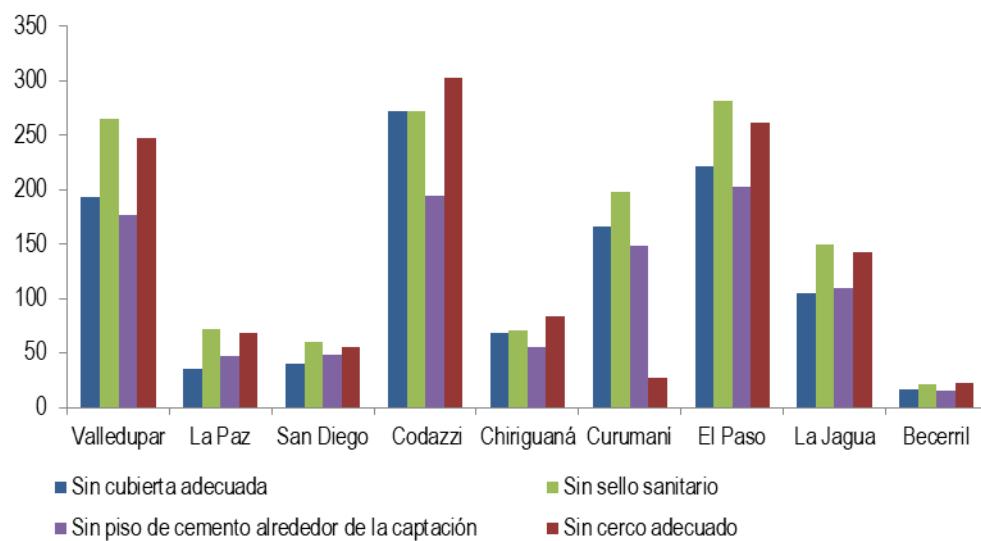


Figura 157. Condiciones de protección de captaciones en el sistema acuífero Cesar

Por su parte, el trabajo realizado por Corpocesar e IDEAM, 2006 reporta las condiciones de la zona operacional de un número importante de captaciones. Se encontró que gran parte de las captaciones de agua

que fueron inventariadas durante las campañas de campo, no presentan una protección a la zona operacional de la captación óptima, que garantice que los sistemas de bombeo no generen residuos de combustibles o aceitosos que pueden ingresar de forma directa o indirecta a las aguas subterráneas. Es frecuente encontrar aljibes y pozos sin protección, entre estos se incluyen tapas y cercas perimetrales, que facilitan el ingreso de animales que dejan sus residuos orgánicos muy cerca de la boca de la captación, o de contaminantes tales como plaguicidas que son almacenados junto a los sistemas de bombeo o en la boca de las captaciones.

3.3.3 Zonas con interferencia de pozos

Cuando se extrae agua de un pozo a un determinado caudal, se produce un descenso de nivel o superficie de abatimiento en forma de cono invertido. Si consideramos un conjunto de pozos operando sobre un mismo acuífero a distancias relativamente cortas, el funcionamiento de uno de los pozos se ve afectado por el funcionamiento de los demás, de manera que el abatimiento de cada pozo dependerá del caudal bombeado de cada pozo y el de los demás, lo que producirá una disminución del caudal que puede ser extraído por cada pozo debido al cruce de las superficies de abatimiento (Alemany et al., 2000). La distancia del pozo a la cual los abatimientos son despreciables con respecto al nivel estático se denomina radio de influencia (R).

Para determinar el radio de influencia, es necesario tener información de las pruebas de bombeo realizadas en el acuífero objeto de estudio. Para el caso del sistema acuífero Cesar, si bien se cuenta con información de pruebas de bombeo, los datos se encuentran muy espaciados unos de otros en un área muy extensa. Por lo tanto, no es posible determinar las zonas con interferencia de pozos con la información disponible.

4. DIAGNÓSTICO PARTICIPATIVO

Previo a la fase de diagnóstico se realizó, durante la fase de aprestamiento, la identificación de actores y sectores clave, así como el mapa de actores; insumos necesarios para el diseño de la estrategia de participación y comunicación. Dicha estrategia definió, para cada fase del proceso (diagnóstico, formulación, ejecución, y seguimiento y evaluación), actividades que facilitaran el intercambio de información y la participación.

La identificación de actores clave partió del inventario de puntos de agua subterránea y de la base de datos aportada por la Corporación; información que fue complementada con visitas a cada uno de los municipios que hacen parte del acuífero priorizado, a través de las cuales fueron abordadas las alcaldías municipales, las empresas de servicios públicos y algunas asociaciones productivas, para conocer su interés en el proceso de formulación del PMAA, e indagar sobre su conocimiento acerca de otros actores sociales presentes en la zona (Anexo 3, carta de presentación a entidades).

El ejercicio realizado en la fase de aprestamiento para identificar actores clave, así como para representar sus relaciones en el mapa, fue validado y complementado durante la fase de diagnóstico, mediante la realización de entrevistas y talleres orientados a la elaboración del diagnóstico participativo.

Tanto la identificación y la clasificación preliminar de actores, como su caracterización con respecto a la toma de decisiones, su interés y su posición en el proceso de formulación del PMAA; fue concordante con la información levantada posteriormente durante la construcción del diagnóstico participativo.

En la Tabla 59, se presenta a continuación el resultado del contacto establecido con los actores clave durante la fase de Diagnóstico.

Tabla 59. Contacto con actores sociales durante la fase de Diagnóstico

Tipo de Actor	Participación durante la fase de Diagnóstico
Gremiales	Ganaderos. Durante la fase de aprestamiento manifestaron interés en el proceso; posteriormente, se contó con su participación en el taller institucional (3 asistentes) donde se dio a conocer información técnica del acuífero y del proceso de formulación del PMAA; y se realizó un ejercicio para la identificación de problemáticas y escenarios deseables.
Institucionales (Administración Municipal)	Inicialmente, durante los contactos iniciales, muy pocos mostraron interés en el proceso por considerarlo competencia exclusiva de CORPOCESAR. Se identificó un desconocimiento generalizado sobre el tema, que se evidenció en la falta de programas y proyectos relacionados con los acuíferos, y en el desconocimiento de los sectores o de las comunidades rurales de su municipio que son abastecidas por aguas subterráneas. Durante el taller institucional se contó con 8 representantes de administraciones de 5 municipios. Las empresas de servicios públicos de los municipios que se abastecen de agua subterránea o las que tienen a su cargo el manejo de los pozos que suministran agua a las comunidades rurales, inicialmente mostraron gran interés en participar en el proceso. En el taller institucional realizado en Valledupar se contó con la participación

Tipo de Actor	Participación durante la fase de Diagnóstico
	de 2 empresas de servicios públicos. En el taller realizado en el municipio de Chiriguaná, se contó con la participación de la empresa de servicios públicos de Chiriguaná.
Académicos	Aunque manifestaron interés en participar en la formulación del PMAA, fue evidente la falta de interés institucional (académico) en el tema de agua subterránea. En el taller institucional se contó con la participación de 1 institución académica.
Comunitarios	Los actores comunitarios de la zona rural contactados inicialmente, mostraron interés en participar en el proceso, como una oportunidad de abordar diversas problemáticas relacionadas con la gestión del agua, entre ellas lo que consideran un insuficiente acompañamiento institucional. La información proporcionada por los líderes comunitarios mediante las entrevistas y durante el desarrollo de los talleres, fue clave para comprender las realidades locales en torno al acceso al agua. La mayoría de actores comunitarios tienen relación con las JAC de su corregimiento o vereda, y simultáneamente con los acueductos a su cargo.
Industriales	Durante el acercamiento inicial a representantes de empresas multinacionales mineras, éstos manifestaron interés y apoyo frente al proceso de formulación del PMAA. En el taller institucional se logró la participación no sólo de industrias mineras (3 empresas), sino también de representantes de la agroindustria (3 empresas).

A continuación, se describe en detalle el desarrollo de las actividades definidas en la estrategia de participación y comunicación, correspondientes a la fase Diagnóstico, cuyo resultado principal desde el componente social es el Diagnóstico Participativo, en términos de problemáticas o amenazas asociadas al acuífero, y acercamiento a escenarios deseables, ideas de proyectos o acciones para su prevención o mitigación.

4.1 Ejecución de la estrategia de participación y comunicación durante la fase de Diagnóstico.

El objetivo de esta estrategia fue dar a conocer los propósitos del PMAA y facilitar la participación de actores clave en su formulación. Para ello, durante la fase de Diagnóstico, se desarrollaron dos tipos de actividades: aplicación de entrevistas y realización de encuentros participativos o talleres. Para la realización de estas dos actividades, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios, según lo establece la guía para la formulación de PMAA, con respecto a los actores contactados:

- Actores con impacto en el recurso hídrico subterráneo.
- Actores con interés en el tema ambiental desde su competencia o función.
- Actores que se abastecen de agua subterránea.
- Actores con competencias legales para su protección.

4.1.1 Actividad 1. Entrevistas.

Descripción. Esta actividad se realizó tanto en zonas rurales como urbanas, mediante contacto directo y llamadas telefónicas a líderes comunitarios e institucionales (Tabla 60; Figura 159; Anexo 4. Guía de entrevista actores sociales y formato diligenciado de entrevistas).

Tabla 60. Entrevistas realizadas a diferentes actores comunitarios

Fecha	Líder entrevistado	Rol - Organización
16-02-2018	Over Enrique Díaz Torres	Presidente JAC Corregimiento San Sebastián - Curumaní
16-02-2018	Jifeher Aldemar Villegas Pacheco.	Presidente JAC Corregimiento Santa Isable – Curumaní
19-02-2018	Álvaro Altamar Fontalvo	Presidente JAC Corregimiento Nueva Idea – Bosconia
22-02-2018	Luis Deluquez Gámez	Presidente JAC Corregimiento El Perro – Valledupar
22-02-2018	Kelly Cuentas	Presidenta JAC Corregimiento Mariangola – Valledupar
22-02-2018	Alberto Herrera Mendoza	Representante Legal Cooperativa de Alfareros – COOMULAVAL Corregimiento El Cielo - Valledupar

Objetivo. Presentar el proceso de formulación del PMAA, su importancia y alcance; informar sobre los mecanismos de participación durante la formulación del plan, y levantar información acerca de la interacción entre actores, y su relación con el acuífero.

Resultado. Líderes comunitarios e institucionales sensibilizados sobre la importancia de participar en la formulación del PMAA, y en la implementación de acciones de cuidado y protección del acuífero priorizado.

Productos. Mapa de actores validado, e identificación inicial de problemáticas asociadas al acuífero.

El mapa de actores y sectores clave construido de manera preliminar, fue revisado y finalmente validado a partir de la información proporcionada por los líderes comunitarios entrevistados, y los demás actores clave que participaron en el taller institucional (Figura 158, Tabla 61). De las relaciones representadas en dicho esquema, resultan particularmente significativas, por su coincidencia, las que deberían darse y aún no se dan, así como las de actores y sectores con importancia alta y media en la gestión del agua. Es decir, quienes tienen mayor influencia y capacidad de acción en la gestión del recurso hídrico son, al mismo tiempo, los actores/sectores que no han construido relaciones en función de dicha gestión. Esta lectura se evidencia igualmente en las problemáticas referidas por las personas entrevistadas y por los participantes de los talleres; así como en las propuestas orientadas a la construcción de escenarios deseables, planteadas por los mismos actores.

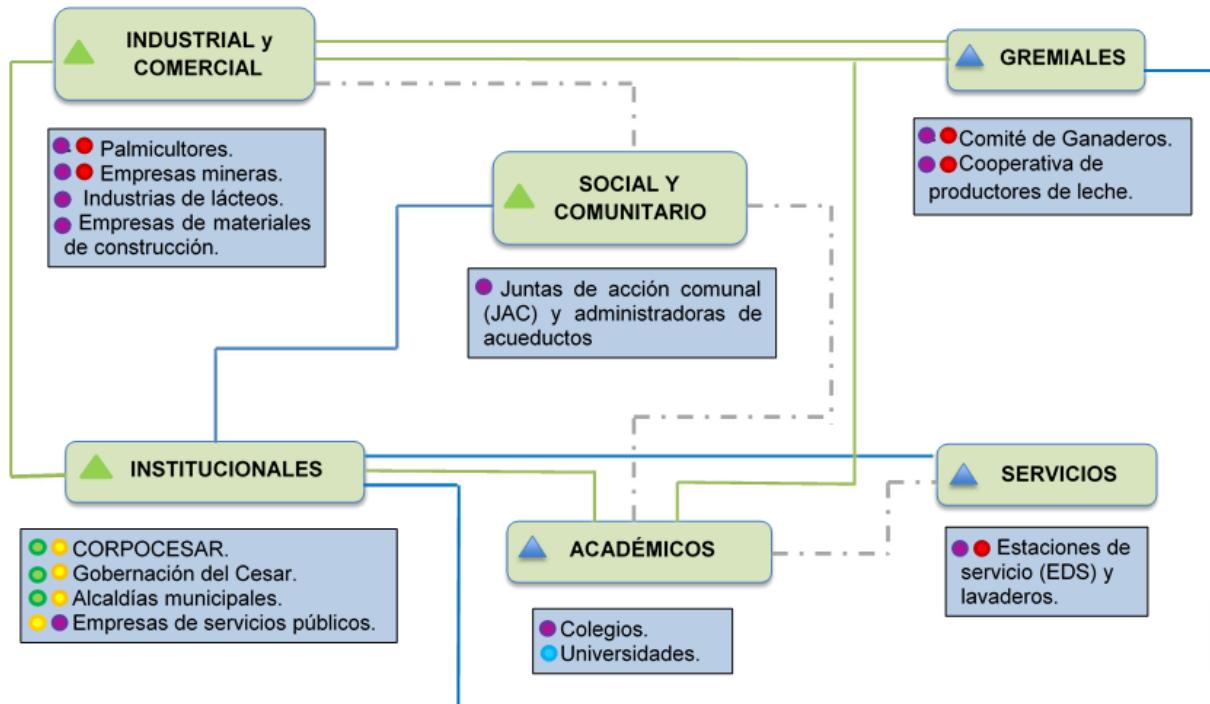


Figura 158. Mapa de actores clave en el acuífero Cesar.

Tabla 61. Convenciones del mapa de actores.

Rol en la gestión del agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> - Actor con competencias legales para su protección ● - Actor consultivo ○ - Actor con impacto potencial sobre el agua subterránea ■ - Actor con interés en el tema ambiental desde su competencia o función □ - Se abastece de las aguas subterráneas ▲
Relaciones entre actores	<ul style="list-style-type: none"> - Buena — - Regular —— - Mala —■— - Se debería dar pero no está ——-
Importancia del actor en la gestión del agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> - Alta ▲ - Media △ - Baja ▲

Con respecto a la identificación inicial de problemáticas asociadas al acuífero, se presenta a continuación, en la Tabla 62, un consolidado de las situaciones coincidentes en los municipios, expresadas por los líderes entrevistados. Este ejercicio preliminar, permitió realizar posteriormente, en el taller institucional, la revisión de estas situaciones y la incorporación de otras a partir de las cuales fueron planteadas diferentes propuestas que permitieran la construcción de escenarios deseables. Dichos escenarios constituyeron insumo para la planificación propia de la fase de formulación del Plan. El cuadro consolidado que recoge las problemáticas identificadas por municipio y en cada taller, se presenta como Anexo 5.

Tabla 62. Identificación preliminar de problemáticas y escenarios deseables, expresados por los líderes durante las entrevistas.

PROBLEMÁTICAS COMUNES	ESCENARIO DESEABLE
<p>No se realizan procesos de potabilización.</p> <p>No existe concesión, por lo tanto, no hay un real control sobre la cantidad de agua que toman los usuarios.</p> <p>Racionamientos en el servicio.</p> <p>El agua es utilizada para uso doméstico, sin embargo, algunas personas realizan conexiones fraudulentas para extraer agua y destinarla a cultivos y ganado.</p> <p>Las aguas residuales son vertidas generalmente en pozos de absorción, localizados a corta distancia del pozo principal del cual se toma el agua.</p> <p>Sistemas de potabilización inutilizados por la falta de capacitación a la comunidad sobre el manejo de esta tecnología.</p> <p>Débil apropiación comunitaria sobre el sistema de extracción, distribución y potabilización del agua.</p> <p>Sistemas de bombeo que dependen de la energía eléctrica y la gestión de la administración pública, para su permanente disponibilidad.</p> <p>Problemas de salud a causa de la deficiente calidad del agua.</p>	<p>Apoyo financiero por parte de la administración local, en caso de averías en el sistema de abastecimiento, principalmente en la bomba.</p> <p>Acompañamiento por parte de la alcaldía en la adecuación del sistema de distribución, mediante la instalación de micro medidores para realizar cobro adecuado, según el consumo de cada usuario.</p> <p>Fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua mediante procesos educativos y de apropiación social del recurso.</p> <p>Implementar acciones educativas orientadas al uso y ahorro eficiente del agua, así como programas de ahorro y uso eficiente del agua en cada acueducto comunitario.</p> <p>Acompañamiento por parte de los entes de control e instituciones, en la operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento.</p> <p>Informar a la comunidad sobre los procesos y/o proyectos llevados a cabo en el territorio, relacionados con el sistema de abastecimiento.</p> <p>Contar con un plan de contingencia en cuanto a opciones de pozos para extracción de agua.</p> <p>Construcción y adecuación de sistemas de potabilización que garanticen la calidad del recurso.</p> <p>Contar con garantías estatales sobre la calidad del servicio.</p> <p>Construcción de pozos sépticos o de plantas de tratamiento de agua residual.</p> <p>Inclusión en planes, programas o proyecto sobre potabilización de agua a nivel local o departamental.</p>

Las relaciones representadas en el mapa de actores, las situaciones expresadas en el árbol de problemas y las propuestas para la definición de escenarios deseables, constituyeron insumos de importancia durante la fase de formulación del PMAA. En particular, el establecimiento de la Mesa de Trabajo, como escenario de participación propio de la gestión del recurso hídrico de acuíferos, permitirá el reconocimiento y articulación de

acciones que adelantan o podrían adelantar los diferentes actores. Esta propuesta, entre otras planteadas durante los talleres, ha sido incorporada en el componente programático del Plan.



Over Enrique Díaz Torres . Presidente JAC
Corregimiento San Sebastián – Curumaní.



Jifeher Aldemar Villegas Pacheco. Presidente JAC.
Corregimiento Santa Isabel – Curumaní.



Álvaro Altamar Fontalvo. Presidente JAC
Corregimiento Nueva Idea – Bosconia.



Luis Deluquez Gámez. Presidente JAC
Corregimiento El Perro – Valledupar.



Alberto Herrera Mendoza. Representante Legal
Cooperativa de Alfareros COOMULAVAL.
Corregimiento El Cielo - Valledupar



Kelly Cuentas. Presidenta JAC Corregimiento
Mariangola – Valledupar.

Figura 159. Registro fotográfico de entrevistas realizadas a líderes comunitarios.

4.1.2 Actividad 2. Talleres

Descripción general. Los talleres se realizaron en tres municipios (Valledupar, Chiriguaná y El Paso), con la participación de actores institucionales, comunitarios, industriales y academia (Tabla 63), a quienes se convocó mediante visitas, oficios, afiches, correos electrónicos y llamadas (Figura 160, Anexo 6. Afiche de invitación a taller institucional y cartas de invitación a instituciones). Se contó con el apoyo de los líderes comunitarios, principalmente de las JAC, para convocar a representantes de organizaciones sociales, y lograr así que, en los talleres realizados en los municipios, su participación fuera significativa. Como parte del ejercicio se hizo entrega de dos productos impresos: un folleto con información técnica dirigida a público no experto, acerca del acuífero priorizado, su importancia y acciones para su gestión integral (Anexo 7); y un segundo material con información de competencias institucionales relacionadas con la formulación e implementación del PMAA (Anexo 8).

Tabla 63. Talleres realizados durante la fase de diagnóstico participativo

Fecha	Evento y Lugar	Horario	Número de participantes
26-02-2018	Taller Institucional Auditorio Cámara de Comercio - Valledupar	8:00 a. m. – 01:00 p.m.	48
28-02-2018	Taller con líderes de acueductos y usuarios Empresa de Acueducto - Chiriguaná	9:00 a. m. – 12:00 m.	23
01-03-2018	Taller con líderes de acueductos y usuarios. Casa de la Cultura – El Paso	8:00 a. m. – 01:00 p.m.	14

Objetivo. Construir un diagnóstico participativo con los actores clave, que aporte al proceso de formulación del PMA del acuífero priorizado.

Resultado. Reconocimiento de las problemáticas o amenazas sobre el sistema acuífero, y las ideas de proyecto para su prevención o mitigación.

Productos. Para el caso del taller institucional, se presentaron propuestas de escenarios deseables. En los talleres comunitarios, se construyó una línea de tiempo sobre interacciones con el acuífero en función de problemáticas y amenazas, se validó el mapa de actores, y se presentaron propuestas de escenarios deseables.



Figura 160. Convocatoria a taller institucional mediante afiches

4.1.2.1 Estructura del Taller Institucional

- Bienvenida, presentación participantes y apertura del evento.
- Presentación del contexto general del proceso de formulación del PMAA.
- Presentación de los resultados de la Fase de Diagnóstico.
- Presentación del marco normativo e institucional para la formulación e implementación de los PMAA.
- Trabajo grupal: aproximación a escenarios deseables para el sistema acuífero Cesar, desde la visión de los participantes
- Plenaria y conclusiones.
- Planteamiento de preguntas y respuestas.



Introducción. Contexto general del proceso de formulación del PMAA.



Presentación de resultados de la fase Diagnóstico.



Organización de grupos de trabajo.



Trabajo grupal en torno a problemáticas identificadas.
Gobernanza y gobernabilidad.



Trabajo grupal en torno a problemáticas identificadas.
Calidad y Riesgo.



Trabajo grupal en torno a problemáticas identificadas.
Oferta y demanda.



Trabajo grupal en torno a problemáticas identificadas.
Investigación y educación ambiental.

Figura 161. Registro fotográfico taller institucional para la construcción del Diagnóstico Participativo.
Valledupar, 26-02-2018.

4.2.1.2 Estructura del taller dirigido a actores comunitarios

Se presenta a continuación la estructura metodológica implementada durante los talleres comunitarios para la construcción del Diagnóstico Participativo (Figura 162 y 163).

Objetivo Superior: Promover y fortalecer procesos de participación incidente, a través de la cual se aporten elementos críticos para la toma de decisiones en torno al agua, propiciando el empoderamiento y reconocimiento de las comunidades.

Objetivo General: Dar a conocer los propósitos del PMAA y facilitar la participación de actores clave en su formulación, mediante la construcción del Diagnóstico Participativo.

Objetivos específicos:

1. Comprender las principales problemáticas, amenazas y conflictos del recurso hídrico subterráneo en el territorio.
2. Reconocer roles e interacciones de los actores clave con influencia en el acuífero.
3. Identificar potencialidades y escenarios deseables asociados al acuífero.

Desarrollo.

Introducción.

Presentación de los participantes, identificación de las expectativas, presentación de la agenda de trabajo y los objetivos del encuentro.

Actividad: identificación de saberes previos de la comunidad con respecto al acuífero, y fundamentación conceptual en torno al agua subterránea y al acuífero priorizado.

Objetivo Específico 1: Comprender las principales problemáticas, amenazas y conflictos del recurso hídrico subterráneo en el territorio.

Conceptos clave abordados: problema ambiental, conflicto, amenaza, transformación de conflictos, buenas prácticas.

Actividad: Lluvia de ideas y clasificación de problemas y conflictos mediante tarjetas de visualización.

Objetivo Específico 2: Reconocer roles e interacciones de los actores clave con influencia en el acuífero.

Conceptos clave abordados: actores clave, tipos de actores, tejido social, gobernanza del agua.

Actividad 2: línea de tiempo de interacciones con el acuífero.

Objetivo Específico 3: Identificar potencialidades y escenarios deseables asociados al acuífero.

Conceptos abordados: potencialidades, buenas prácticas, gobernanza del agua subterránea, escenarios de aplicación de la GIRHS (Mesa de Trabajo).

Actividad 3: Visualización con tarjetas.

Cierre del Taller: Presentación de productos elaborados a lo largo del taller y conclusiones.



28-02-2018, Chiriguaná. Taller para la construcción del Diagnóstico Participativo.



Identificación de problemas y conflictos asociados al acuífero.



Identificación de acciones. Aproximación a escenarios deseables.

Figura 162. Registro fotográfico taller construcción Diagnóstico Participativo, Chiriguaná, 28-02-2018.



01-02-2018, El Paso. Taller para la construcción del Diagnóstico Participativo.



Identificación de problemas, conflictos y escenarios deseables asociados al acuífero.

Figura 163. Registro fotográfico taller construcción Diagnóstico Participativo, El Paso. 01-03-2018

A partir de la identificación inicial de problemáticas durante las entrevistas a líderes comunitarios, se incorporó en cada uno de los talleres dicha información, de manera que se diera relevancia a las situaciones críticas que no sólo coincidían en los diferentes municipios, sino que, además, cobraban importancia de manera similar. Así mismo, se trabajó en torno a las ideas y acciones para su transformación (escenarios deseables).

Mediante la tabla 64, se presenta a continuación el resultado del ejercicio realizado en el taller institucional, en donde se plantearon acciones generadoras de cambio y escenarios deseables, a partir de los pilares de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. El detalle de las problemáticas y propuestas definidas en el taller institucional y en los posteriores talleres por municipio, se encuentra en el Anexo 5.

Tabla 64. Acciones generadoras de cambio y escenarios deseables

ACCIONES GENERADORAS DE CAMBIO. ESCENARIOS DESEABLES
Propuestas en Investigación: Investigar la afectación entre usuarios de las aguas subterráneas. Contar con laboratorios de análisis de agua a nivel local que puedan cumplir con los estándares de calidad y que sean asequibles económicamente. Identificar recargas (zonas, fuentes, cantidad). Identificar y cuantificar la demanda de los pequeños y medianos usuarios de las aguas subterráneas. Identificar de impactos en todas las actividades productivas.
Propuestas en Educación ambiental: Mayor asignación de presupuesto para la educación ambiental. Educación práctica, de acuerdo a las necesidades puntuales, tanto de instituciones, empresas y usuarios particulares. Hacer efectivas las multas por uso inadecuado de las aguas subterráneas. Adelantar procesos de educación ambiental en temas relacionados con la Producción Más Limpia (PML), uso y ahorro eficiente del agua, de acuerdo a la realidad local. Especializar instituciones como la Policía, en temas relacionados con la protección del agua. Cualificar el acompañamiento a nivel empresarial y particular para el aprovechamiento de las aguas subterráneas. Realizar asistencia técnica integral (abarcando los diferentes temas ambientales) a nivel municipal y regional. Fortalecer a los grupos de investigación locales, de manera que se involucren a éstos en los proyectos que se ejecutan en la región. Adelantar formación técnica a agricultores y demás usuarios de las aguas subterráneas. Generar un marco de referencia en la educación ambiental de acuerdo a las necesidades locales. Generar un programa nacional de educación ambiental y realizar seguimiento al mismo.
Propuestas en Gobernanza y Gobernabilidad: Realizar acciones en torno al uso eficiente y ahorro del agua. Capacitar a la comunidad, en terreno, en torno al uso del agua subterránea. Identificar conflictos de uso, lo cual implica conocer en detalle los acuíferos y su comportamiento. Reglamentar el acceso al recurso y garantizar la aplicación de las normas. Trabajo articulado entre entidades gubernamentales (tales como el Ministerio de Agricultura, Ministerio de Minas), para que la autoridad ambiental pueda ejercer su control. Diseños adecuados de infraestructura de saneamiento básico y adecuada administración por parte de sus propietarios. Fortalecer las organizaciones comunitarias para administrar la infraestructura de acueductos y alcantarillado. Capacitación técnica a autoridades a nivel municipal y regional. Legalizar el uso del agua subterránea. Programa de educación técnica y normativa al usuario sobre el manejo de las aguas subterráneas (incluye fortalecer la academia).

ACCIONES GENERADORAS DE CAMBIO. ESCENARIOS DESEABLES

Propuestas en Calidad y Riesgo:

Adelantar campañas educativas dirigidas a los usuarios con respecto a los impactos que ocasionan.
Lograr que la autoridad ambiental brinde el servicio de análisis de calidad del agua.
Realizar seguimiento a usuarios.
Realizar seguimiento al uso adecuado y sostenibilidad de la infraestructura.
Ejercer mayor control a las Estaciones de Servicio que hacen vertimiento al suelo.

Propuestas en oferta y demanda:

Es necesario conocer la demanda actual y futura.
Inventario de pozos y aljibes.
Realizar ejercicios de prospectiva y dinámicas económicas.
Realizar acciones de vinculación y formalización de usuarios (unificar información).
Establecer red de monitoreo.
Lograr un mayor conocimiento del acuífero: estimación de la recarga real, geometría, geofísica, sísmica, SEV, cartografía, entre otra información.

4.2.1.3 Evaluación de los talleres

Las Figuras 164, 165 y 166 presentan los resultados de las evaluaciones diligenciadas por los participantes en cada uno de los talleres.

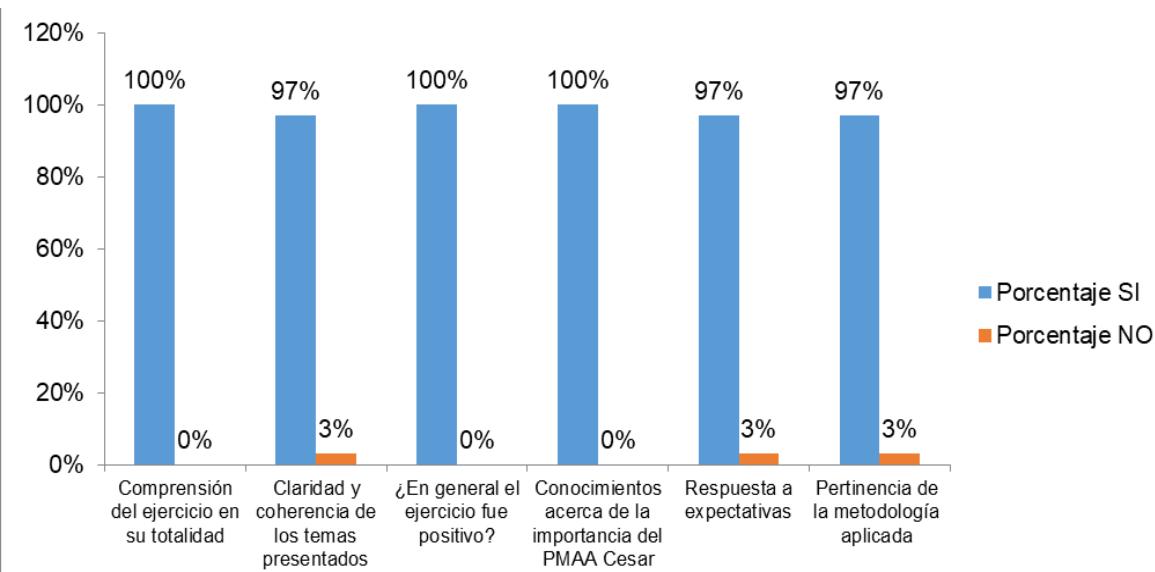


Figura 164. Resultados de la evaluación del Taller Institucional. Valledupar, 26-02-2018.

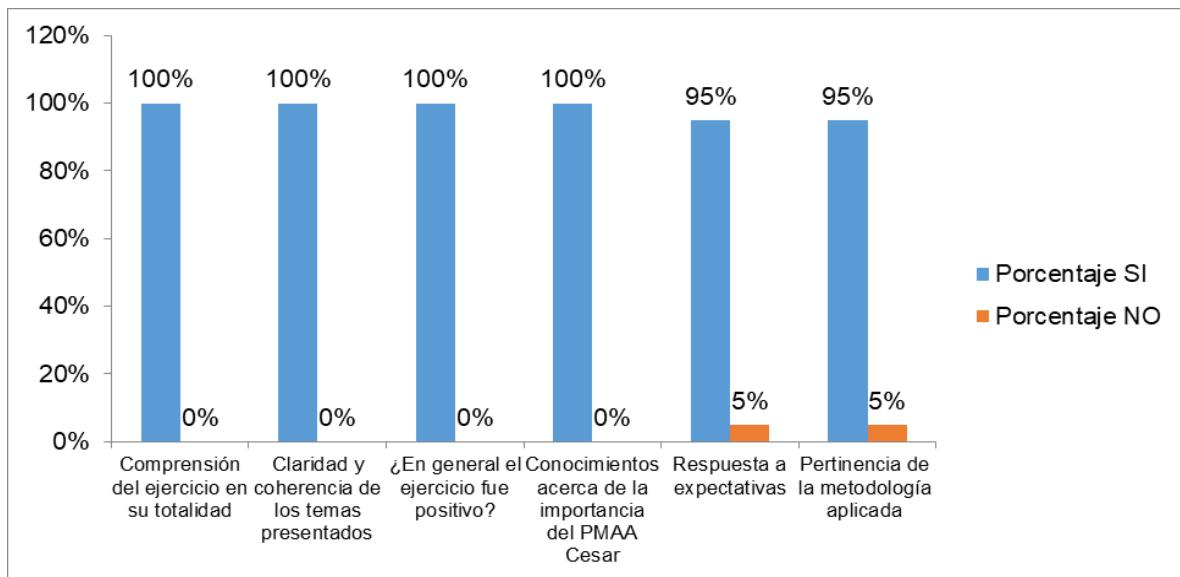


Figura 165. Resultados de la evaluación del Taller Comunitario. Chiriguaná, 28-02-2018.

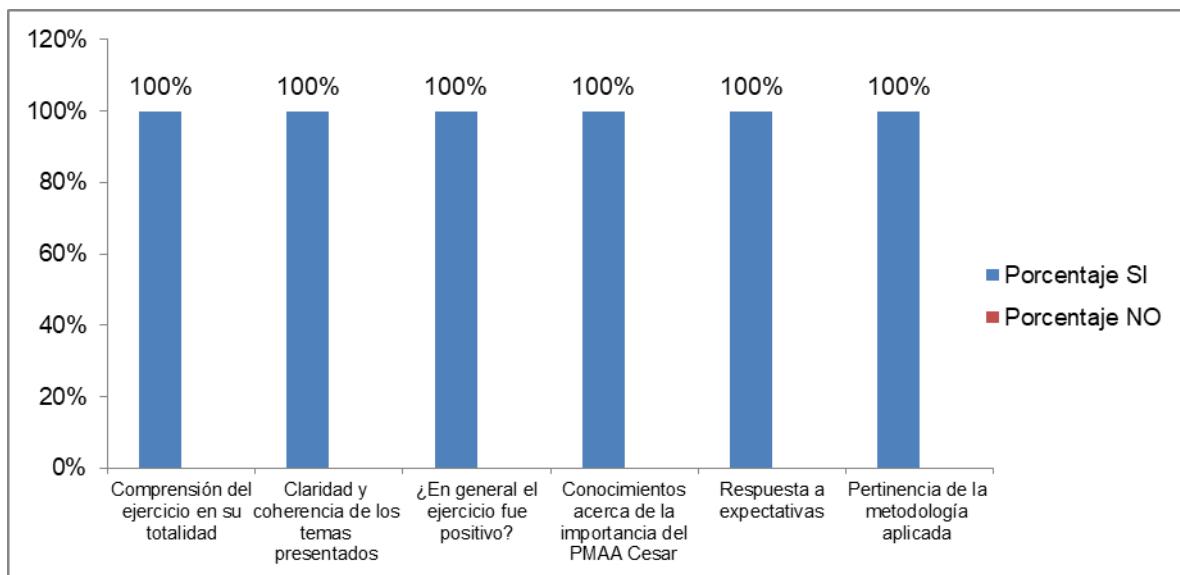


Figura 166. Resultados de la evaluación del Taller Comunitario. El Paso, 01-03-2018.

Como resultado de las diversas acciones adelantadas en la fase de Diagnóstico, a continuación, se plantean los aspectos concluyentes del acercamiento a la definición de escenarios deseables.

Los distintos actores sociales que intervienen en el uso del sistema acuífero Cesar coinciden en que urge el apoyo financiero y técnico operativo por parte de las administraciones locales, para lograr una adecuada gestión del agua desde los acueductos comunitarios. En particular, las emergencias presentadas por la avería

de bombas de extracción o cortes en el servicio de energía eléctrica, constituyen situaciones críticas que requieren de la apropiación de la comunidad hacia sus acueductos, así como del apoyo financiero y técnico de las distintas entidades según competencias institucionales.

El acompañamiento de los distintos entes y organismos estatales (instituciones nacionales y territoriales, órganos de control, entre otros), aparece como reiterativo en las voces de los distintos actores relacionados con el acuífero. Tal acompañamiento se hace necesario tanto para el manejo y la adecuación de los sistemas de abastecimiento, como para el diseño de planes a futuro, y procesos de educación y apropiación por parte de los pobladores.

La optimización de la calidad del agua y de los procesos de suministro domiciliario y de tratamiento de las aguas servidas también merecen un lugar especial en la priorización de tareas y acciones relacionadas con el acuífero tanto para las comunidades como para las administraciones. La gestión del recurso hídrico debe hacerse por parte de los distintos intervenientes de forma mancomunada.

Generar información técnica acerca de la situación actual del acuífero, y propiciar espacios de publicación y análisis de la misma, resulta fundamental para la apropiación social del conocimiento, la comprensión de las condiciones actuales del agua subterránea en el territorio, y la importancia de diseñar e implementar con urgencia proyectos para su protección.

Finalmente, los distintos entes territoriales, actores académicos, industriales y comunitarios, entre otros, con intereses o competencias en torno al acuífero, mostraron interés en conformar la Mesa de Trabajo para la planificación y seguimiento de las iniciativas que sean propuestas desde los diferentes sectores. Es labor de la autoridad ambiental, retomar esta iniciativa y generar el espacio de participación requerido para el seguimiento y actualización posterior del Plan de Manejo formulado.

5. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICAS SOBRE EL ACUÍFERO

La identificación de las problemáticas sobre el acuífero dependerá en gran parte de los aportes hechos por los diferentes actores sociales. Por lo tanto, este capítulo se complementará con la información recolectada durante los encuentros con actores sociales.

5.1 Conflictos por el uso del agua subterránea

La excesiva demanda por el uso del agua subterránea por parte del sector agropecuario y el sector minero hace que se generen conflictos por el recurso con la creciente población asentada en las zonas de mayor crecimiento socioeconómico. La actividad minera por ejemplo, trae consigo la concentración de la población alrededor de las minas, la inmigración de población no solo de otras regiones del departamento, sino de personas de otras regiones del país dado que la demanda de mano de obra en las minas no se cubre con la población local (Cancino et al., 2014). El crecimiento de la población genera mayor presión sobre el recurso agua al aumentar la demanda y dado que la población se asienta en sectores donde la infraestructura básica de acueducto y alcantarillado es deficiente y no habría sido planificada para tal demanda. En el año 2000, el Estudio Nacional del Agua elaborado por el IDEAM, ya identificaba en el departamento del Cesar un desequilibrio entre oferta y demanda del agua subterránea.

En el año 2010, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y La Universidad de los Andes realizaron un estudio en la zona de extracción minera del carbón y pudieron establecer por medio de encuestas a hogares, agricultores, ganaderos y trabajadores de las minas, la percepción de las personas respecto al recurso hídrico. Los resultados arrojan que la percepción de la comunidad asentada en la zona es que en los últimos años tanto la cantidad como la calidad de las fuentes de agua superficiales y subterráneas ha venido en descenso.

5.2 Riesgos de contaminación y agotamiento de las aguas subterráneas

El vertimiento continuado de aguas servidas y desechos industriales sobre el suelo y el riesgo potencial de contaminación al acuífero que esto representa, hace que el recurso se contamine y no pueda ser usado para consumo humano. Sumado a lo anterior el aumento en la demanda por el recurso por la agroindustria, la minería y el crecimiento no planificado de la población hace que se genere un desbalance entre la oferta y la demanda hídrica.

Como ya se mencionó antes la minería modifica el curso de corrientes superficiales estacionales y no estacionales afectando a los acuíferos en una zona que posee tres meses de sequía al año (CGN, 2014). Adicionalmente, los efectos del cambio climático han hecho que las fuentes de agua superficiales sean escasas en el departamento especialmente en la época de verano, afectando de manera significativa la disponibilidad del recurso para diferentes actividades como el abastecimiento de la población y la agricultura.

Adicionalmente, la remoción de la cobertura vegetal y del suelo ha intensificado el problema de desertificación. El departamento del Cesar es uno de los más afectados por desertificación de suelos y tierras y aproximadamente un 69% de sus suelos padece de desertificación. Según un estudio realizado por El IDEAM en el año 2007, los valores más altos de desertificación se presentan en los alrededores de la actividad minera especialmente en el municipio de la Jagua de Ibirico. Así mismo, los suelos asociados al cultivo de la palma africana y otros cultivos permanentes se encuentran con afectación "muy alta" de desertificación (Figura 167).

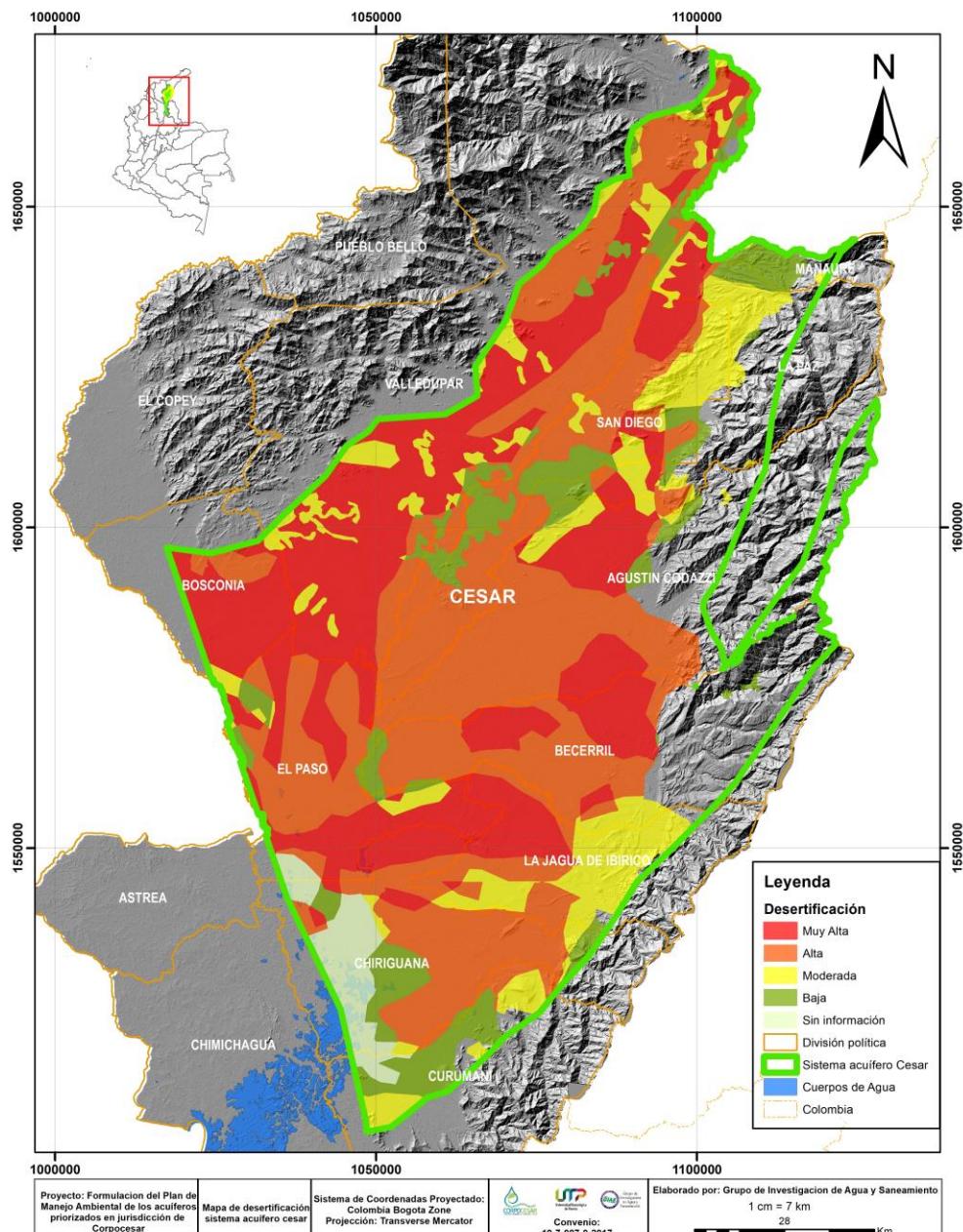


Figura 167. Mapa de desertificación en el sistema acuífero Cesar.

6. BIBLIOGRAFÍA

Advisory Committee on Water Information (ACWI). 2009. A National Framework for Ground-Water Monitoring in the United States. Subcommitee on groundwater of the Advisory Committee on Water Information, USA

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) e Hidrogeología, Geología, Ambiental LTDA. 2006. Estudio geoquímico de superficie cuencas Cesar-Ranchería y Sinú-San Jacinto. Contrato 81 de diciembre 26 de 2005. 3 Volúmenes. pp. 92.

Alcaldía Municipal de La Jagua de Ibiríco. 2012. Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015 "Oportunidades para todos". pp. 239.

Alemany, V., Arnau, I. Patiño, G. y Solano, M. 2000. Acoplamiento de la hidráulica de pozos y la teoría de bombas para la determinación de caudales en régimen permanente. *Revista ingeniería de agua*. Vol. 7, N°2. pp. 129-138.

Aller, L., Bennett, T., Hackett, G., Petty, R., Lehr, J. Sedoris, H. and Nielsen, D. 1991. Handbook of suggested practices for design and installation of groundwater monitoring wells. Environmental monitoring systems laboratory, US Environmental protection agency. Las Vegas, Nevada. pp. 209.

Anaya Valenzuela, L. F. y Diaz Rojas, A. S. 2016. Análisis de la Fragmentación de coberturas naturales producida por la minería a cielo abierto en el municipio de La Jagua de Ibiríco, Cesar. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Ambiental bajo la modalidad de Investigación. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Ambiental. Bogotá D.C. pp. 54.

Aparicio, F. 1982. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa, México.

Arias, A. y Morales, C. J. 1999. Mapa geológico generalizado del Departamento del Cesar, memoria explicativa y mapa a escala 1: 250.000. Bogotá D.C.: INGEOMINAS.

Aristizábal Hernández, L. 2016. Morfometría de los abanicos aluviales del río Chiriaimo - San José de Oriente, Rio Guatapurí – Valledupar y río Jerez – Dibulla y su relación con la tectónica: Tres ambientes tectónicos en la zona norte de Colombia. Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Geólogo, Escuela de Ciencias, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT. Medellín-Colombia. pp. 164.

Armenta Jiménez, J. A. y Gallardo Amaya, R. J. 2016. Caracterización del agua subterránea en el valle superior del río Cesar. *Ingenio UPSCO*. Vol. 11, Julio-Diciembre 2016. p-ISSN 2011-642X e-ISSN 2389-864X – Edición Especial, pp. 37- 51 (14).

Ayala-Calvo, R. C. 2009. Análisis tectonoestratigráfico y de procedencia en la subcuenca de Cesar: Relación con los Sistemas Petroleros. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias de la Tierra. Universidad Simón Bolívar, Decanato de Estudios de Postgrado, Maestría en Ciencias de la Tierra. Sartenejas. pp. 227.

Ayala Calvo, R.C.; Bayona Chaparro, G.A.; Ojeda-Marulanda, C.; Cardona, A.; Valencia, V.; Padrón, C.E.; Yoris, F.; Mesa-Salamanca, J. y García, A. 2009. Estratigrafía y procedencia de las unidades comprendidas entre el Campaniano y el Paleógeno en la subcuenca de Cesar: aportes a la evolución tectónica del área. *Geología Colombiana*, 34, 17 Figs. Bogotá. pp. 3-33.

Ayers, R.S. y Westcot, D.W.. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Manual 29, rev.1, FAO Ed., pp. 174.

Balek, J. 1998. Groundwater recharge concepts. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series: 3-9.

Baquero M. 2012. Análisis de lineamientos en la cuenca Cesar-Ranchería y áreas adyacentes. *Geología Colombiana*, Edición X Semana técnica de geología e ingeniería geológica. 37 (1). Bogotá, Colombia. pp. 29.

Betancur, T. 2008. Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: Bajo Cauca Antioqueño. Tesis doctoral de la Universidad de Antioquia, Medellín.

Boada Cuevas, M. y Chavarro Montero, S. J. 2006. Evaluación hidrogeológica y ambiental del potencial del agua subterránea en la cabecera y área de influencia rural en Bosconia, Cesar. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario. Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá D.C., Colombia. pp. 179.

Bradbury, K. R., Dripps, W., Hankley, C., Anderson, M., Potter, K. 2000. Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates. Department of Natural Resources. University of Wisconsin. Madison, Wisconsin.

Cáceres, H., Camacho, R y Reyes, J. 1980. Guide book to the geology of the Ranchería Basin. *Bol. Soc. Geol. Geof. Pet. Bogotá*.

Cancino, A., Meneses, G., Villate, A., Santander, J., Blanco, C. 2014. Una mirada al panorama socioeconómico, ambiental y fiscal de la minería del carbón en el Cesar. Revista Civilizar de Empresa y Economía, Vol. 5 (9).

Cardeño Villegas, K.; Rojas Martínez, E. E.; Manco Jaraba, D. C. y Cárdenas López, R. R. 2015. Identificación de las mineralizaciones de cobre aflorantes en el corregimiento de San José de Oriente, La Paz, Cesar. *Ingeniare*, Universidad Libre-Barranquilla, Año 10, No. 18, ISSN: 1909-2458. pp. 115-125.

Castillo, A., Osorio, Y. y Vence, L. 2009. Evaluación de la calidad microbiológica y físicoquímica de las aguas subterráneas ubicadas en los municipios de La Paz y San Diego, Cesar. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de microbiólogo, Universidad Popular del Cesar.

Castro, L.; Carvajal, Y. 2010. Análisis de tendencia y homogeneidad de series hidroclimatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9: 15-25.

Chow, V. T. 1991. Hidrología Aplicada. Ed. Mc Graw Hill. Bogotá. Colombia.

Contraloría General de la República (CGR), 2014. Minería en Colombia. Daños ecológicos y socioeconómicos y consideraciones sobre un modelo minero alternativo. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, D.C. Vol. 3. pp. 493.

Contraloría General del Departamento del Cesar, 2014. Informe del Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente 2014-2015. Colombia. pp. 44.

Contraloría General del Departamento del Cesar, 2015. Informe del Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente 2015. Colombia. pp. 43.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar). 2015. Diagnóstico de los residuos y/o desechos especiales y peligrosos RESPEL en el área de jurisdicción de Corpocesar. Valledupar. pp. 93.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) e IDEAM. 2009. Evaluación del potencial del agua subterránea en los municipios de Curumaní, Pailitas, Tamalameque, Pelaya, La Gloria, Gamarra, Aguachica, Río de Oro, San Martín y San Alberto, Departamento del Cesar. Convenio 097-2003-06-2007.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) e IDEAM. 2006. Aprovechamiento y protección integral del agua subterránea en las ecorregiones de los valles de los ríos Cesar y Magdalena, departamento del Cesar. Convenio interadministrativo 132-2013.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) e Ingeominas. 1995. Evaluación del agua subterránea en el departamento del Cesar. Convenio interadministrativo entre Corpocesar e Ingeominas.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) y Universidad del Atlántico, 2014. Plan de ordenamiento del recurso hídrico del río Cesar. Contrato interadministrativo No. 19-7-0002-0-2013. pp.415.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) y Universidad del Atlántico, 2011. Caracterización e impactos ambientales por vertimientos en los tramos de la cuenca media y baja del Río Cesar. Valledupar. pp.128.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) y Universidad del Magdalena. 2011. Formulación del modelo hidrogeológico e hidrológico conceptual y numérico en el área donde se ubican los proyectos de explotación de carbón, tanto actuales como futuros, en la parte central del valle del río Cesar, en jurisdicción de los municipios de Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, Chiriquaná y El Paso, en el departamento del Cesar. Contrato interadministrativo No. 19-6-0061-0-2010.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) y Universidad del Magdalena. 2010a. Formulación del plan de ordenamiento y manejo ambiental de la subcuenca hidrográfica del río Casacará, municipios de Agustín Codazzi y Becerril. Contrato interadministrativo No. 19-6-0061-0-2010. pp. 661.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) y Universidad del Magdalena. 2010b. Formulación del plan de ordenamiento y manejo ambiental de la subcuenca hidrográfica del río Manaure, municipio de Manaure. Contrato interadministrativo No. 19-6-0061-0-2010. pp. 610.

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) y Universidad del Magdalena. 2010c. Formulación del modelo hidrogeológico e hidrológico, conceptual y numérico, en el área donde se ubican proyectos de explotación de carbón, tanto actuales como futuros, en la parte central del valle del río cesar, en jurisdicción de los municipios de Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibiríco, Curumaní, Chiriguaná y El Paso, en el departamento del Cesar. Contrato interadministrativo No. No. 19-6-0061-0-2010. pp. 973.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). 2007. Plan de manejo para la protección de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca.

Custodio, E., Llamas, M. R. 2001. Hidrología Subterránea. Tomo I. Ediciones Omega.

Custodio, G. 1997. Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En: Custodio, E.; Llamas, M.R.; Samper, J. (ed). La evaluación de la recarga de los acuíferos en la planificación hidrológica. Asociación Internacional de hidrogeólogos. Grupo español. Las palmas de Granas Canaria. pp.19-39.

Custodio, E. y Llamas, R. 1976. Hidrología subterránea. 1-1157. 2T. Ed. Omega. ISBN 84-282-0446-2. Barcelona.

Departamento del Cesar, Corpocesar e Ideam. 2007. Evaluación del potencial del agua subterránea para riego de los sistemas acuíferos cono aluvial y llanura aluvial de Valledupar, Departamento del Cesar. Convenio 047 del 2004. pp.181.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2017. Cuentas departamentales.

Díaz Muegue, L. C.; Arranz González, J. C. y Peñuela Mesa, G. 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de suelos en zona carbonífera del Cesar, Colombia. *Inverciencia*, Vol. 38 Nº 1. pp. 42-47.

Drummond LTD. 2007. Actualización del modelo numérico hidrogeológico en el área del proyecto El Descanso, Rincón Hondo y Similoa, Departamento del Cesar. Informe técnico final 1243-07-2007 elaborado por Hidrogeocol LTDA. Bogotá, D.C.

Etayo-Serna, F. et al. 1983. Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Ins, Nal. Inv. Gol-Min. *Publ. Geol. Esp*, Nº 14. Bogotá. pp. 235.

European Environment Agency (EEA). 1999. Groundwater quality and quantity in Europe. Copenhagen, June 1999.

Foster S., Tuinhof A., Kemper K., Garduño H. y Nanni M. 2006. Caracterización de sistemas de agua subterránea, conceptos clave e ideas erróneas frecuentes. Serie de notas informativas. Nota 2. Sustainable groundwater management: Concepts and Tools. World Bank, GW-MATE. pp. 1-6. Disponible online: <http://www.yemenwater.org/wp-content/uploads/2013/04/BN2.pdf>

Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M. y Paris, M. 2001. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. World Bank, GW-MATE. Washington. pp.101.

Geoestudios LTDA. e INGEOMINAS. 2006. Cartografía geológica cuenca Cesar-Ranchería. Contrato No. 084 de 2005. Bogotá D.C. Colombia. pp. 95.

González, M., Umaña, R., Arias, A., Cortes, Y., Moreno, M., Salazar, O., y Jiménez, M. 2007. Prospectividad de la Cuenca Cesar-Ranchería. Informe realizado para la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) por el Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones según contrato interadministrativo 027 de 2007: Inventario, interpretación y evaluación integral de la información geológica geofísica y geoquímica adquirida por la ANH en la cuenca Cesar Ranchería y el área especial Cesar. pp. 336.

Gómez, D. 1995. Diagnóstico de la calidad y riesgo de contaminación del agua aprovechada de pozos y aljibes en la cuenca baja del río Risaralda entre los departamentos de Risaralda y Caldas. Proyecto CARDER – CANADA, Planificación Territorial de los ríos Risaralda y Consota. Pereira, Colombia.

Gutiérrez, N. 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.

Herrera-Zamarrón, G. del S., Simuta Champo, R. y A. Bravo Jácome. 2007. Modelo de flujo del agua subterránea y diseño de red de monitoreo para el acuífero del Valle de Querétaro. 4to Congreso Internacional, 2do Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. México. pp. 9.

Herrera-Zamarrón, G. del S. 2009. Modelación Matemática y computacional aplicada al diseño óptimo de redes de monitoreo del agua subterránea. Presentación. Instituto de Geofísica de la Universidad Autónoma de México. pp 56.

Hincapié Montes, J. J. 2015. Aportes a la caracterización geológica y geotécnica del material que compone los depósitos de estéril en la mina La Jagua. Trabajo presentado para optar el título de Geólogo en la modalidad de pasantía. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Geología. Manizales-Caldas. pp. 88.

Instituto de Investigación Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS). 1995. Estudio hidrogeológico y ambiental del departamento del Cesar. Convenio Corpocesar – Ingeominas.

Instituto de Investigación Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS). 1997. Mapa Geológico del Departamento del Cesar.

Instituto de Investigación Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS). 1999. Mapa geológico generalizado del Departamento del Cesar, memoria explicativa.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). 2002. Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (Verision 2.0). Mapa de Estado del Recurso. Escala 1:500.000.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). 2003a. Mapa geológico generalizado del Departamento del Cesar escala 1:250000, memoria explicativa.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). 2003b. Mapa geológico del Departamento del Cesar.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). 2003c. Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia a Escala 1:500.000. Memoria Técnica de la Plancha 5-04 Version Final). Bogota. Pp. 106.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). 2010. Cartografía geológica y muestreo geoquímico de la parte norte de la serranía del Perijá, planchas 21, 22, 27, 28, 34 y 35. Contrato 369 de 2009. Bogotá. pp.204.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). 2011. Mapa de Permeabilidades de Colombia, Plancha 5-04 a escala 1:500.000. Departamentos de Sucre, Córdoba, Bolívar, Norte de Santander, Cesar, Magdalena y Atlántico.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). 2011. Mapa Permeabilidades de Colombia. Plancha 5-04, a escala 1:500.000. Memoria Técnica Plancha 5-04. Bogotá. pp.64.

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). 2017. Catálogo de estaciones a nivel nacional. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2014a. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C. pp. 496.

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). 2014b. Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través Análisis de Componentes Principales

(ACP). Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático, Subdirección de Meteorología. Bogotá, D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2013a. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Comité de Comunicaciones y Publicaciones IDEAM. Bogotá D.C. pp. 46.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2013b. Aguas Subterráneas en Colombia: Una visión general. Bogotá, D.C. pp. 283.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2012. Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur (ENSO). Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2007. Plan de acción regional (PAR) para la lucha contra la desertificación y la sequía en el departamento del Cesar, con énfasis en la región del río Cesar. Bogotá D.C. pp. 92.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2004. Guía técnica científica para la ordenación y manejo de cuencas. Decreto 1729 de 2002. Bogotá D.C. pp. 80.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2002. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y aguas subterráneas. Bogotá, D.C., Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 1997. Estudio general de suelos del departamento del César. Bogotá, Colombia. pp. 337.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1985. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Disponible online: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf

Jiménez, H. 1992. Hidrología Básica I. Ed. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Lasso, J. 2016. Análisis de la capacidad de adaptación a los efectos de Variabilidad Climática asociados a la oferta hídrica en poblaciones rurales aplicando análisis de tendencias hidroclimáticas y del riesgo climático. Caso de estudio: veredas El Chuscal, La Mancha y Tres esquinas. MSc tesis. Universidad tecnológica de Pereira. Colombia.

LERNER, D.N.; Techniques. En: Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, 1990. p. 99-229.

Moleiro, L., Torres, J., Rocamora, E., Guerra, M. y Rodríguez, K. 2002. Optimización de la red de monitoreo del régimen de las aguas subterráneas en la cuenca sur de Matanzas, Cuba. I. dominio espacial. *Revista de Ingeniería hidráulica y ambiental*, Vol. XXIII, N° 2. pp. 10-22.

Loaiza, W.; Carvajal, Y.; Baquero, O. 2014. Sequías y adaptación: principios para su evaluación en sistemas productivos agrícolas del Valle del Cauca. Programa editorial Universidad del Valle. Colombia. pp.152.

Manco Jaraba, D. C.; Rojas Martínez, E. E. y Gómez, B. A. 2014. Estudio petrográfico del yacimiento de caliza presente en el municipio de La Paz, departamento del Cesar. *Prospect*, Vol. 12, N° 2. pp. 82-89.

Márquez Vence, L.; González Rivera, M.; Bayler Osorio, Y. y Sarabia Castillo, A. B. 2012. Caracterización microbiológica y fisicoquímica de aguas subterráneas de los municipios de La Paz y San Diego, Cesar, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, Vol. 3 N° 2, julio-diciembre 2012. ISSN 2145-6097, pp 27-35 (9).

Mestre Salazar, C. A.; Muñoz Henao, O. A. y Valencia Aristizábal, S. 1990. Exploración, geotecnia y control de calidad en la mina La Victoria, La Jagua de Ibiríco - Departamento del Cesar, Carbones de los Andes LTDA. Trabajo presentado para optar el título de Geólogo y Minas. Universidad de Caldas. Facultad de Geología y Minas, Manizales-Caldas. pp. 142.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). 2015. Decreto número 1076 del 26 de mayo del 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). 2014. Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C., Colombia.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2010. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá D.C.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2006. Resolución 872 de 2006. Por la cual se establece la metodología para el cálculo del índice de escases para aguas subterráneas. Bogotá, D.C.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2004. Resolución 865 de 2004. Metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales. Bogotá D.C.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Universidad de los Andes, 2010. Valoración económica ambiental en la zona carbonífera del Cesar que comprende los municipios de Becerril, Agustín Codazzi, Chiriguaná, El Paso y La Jagua de Ibiríco. Bogotá D.C. pp. 464.

Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2007. Resolución número 2115 del 22 de junio del 2007, por medio de la cual se señalan las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Ministerio de Minas y Energía, 2012. Censo Minero Departamental 2010-2011. Bogotá D.C.

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC). 2018. Promedio precipitación y temperatura media. Disponible online: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Promedios-Precipitaci-n-y-Temperatura-media-Promed/nsxu-h2dh/data>

Molerio León, Leslie F y J.C. Torres Rodríguez. 2002. Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo del régimen de las aguas subterráneas. Ing. Hidráulica y Ambiental. 3. 24-38.

Monsalve, G. 1995. Hidrología en la ingeniería. Editorial Escuela de Colombiana de Ingeniería. Colombia.

Montealegre, J.E. 2007. Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos de El Niño y La Niña en Colombia. Instituto Colombiano de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales -IDEAM-. Colombia.

Murphy, S. 2007. General information on alkalinity. BASIN, City of Boulder - USGS water quality monitoring. Disponible online: <http://bcn.boulder.co.us/basin/data/NUTRIENTS/info/Alk.html>.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2016. El Niño / Southern Oscillation (ENSO): Historical El Niño / La Niña episodes (1950 - present). Disponible online: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.

Ojeda Marulanda, C. y Sánchez Quiñonez, C. A. 2013. Petrografía, petrología y análisis de procedencia de unidades paleógenas en las cuencas Cesar - Ranchería y Catatumbo. *Boletín de Geología* Vol. 35, N° 1, enero-junio de 2013. pp. 67-80.

Olarte García, N. A. y Polo Hernández, K. K. 2005. Delimitación de las zonas de protección para las aguas subterráneas en las cuencas de los ríos Majiraimo y Fernambuco, en el municipio de Codazzi, Cesar. Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá D.C. pp. 161.

Ordoñez Hoyos, A. E. y Serna Castaño, J. P. 2015. Análisis superficial y multitemporal de imágenes Lansat 7 ETM+ y Lansat 8 OLI TIRS en el proyecto carbonífero La Luna entre los años 2001 y 2015. Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar Al título de Especialista en Información Geográfica. Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica. Manizales, Caldas. pp. 88.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2006a. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Guía técnica Numero 56 riego y drenaje. Roma.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2006b. Las repercusiones del ganado en el medio ambiente. Revista Enfoques. Disponible online: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0612sp1.htm>

Ortega Montero, C. R.; Rojas Martínez, E. E. y Manco Jaraba, D. C. 2014. Mineralización de cobre en el sector de San Diego, Serranía del Perijá. *Geología Colombiana*, Vol. 37. Bogotá, Colombia. pp. 51-62.

Ortega Montero, C. R.; Rojas Martínez, E. E. y Manco Jaraba, D. C. 2012. Depósitos estrato confinados de cobre en el municipio de San Diego, departamento Cesar, Serranía del Perijá. *Prospect*. Vol. 10, No. 1, Enero - Junio de 2012, pp. 28-36.

Pabón, J. 2009. Variabilidad Climática y Cambio Climático en la sában de Bogotá. Seminario Internacional Bogotá y Cundinamarca: Avances y perspectivas en la integración regional. Colombia.

Páez, G. 2008. Experiencia en la determinación de vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en el valle geográfico del río Cauca-Colombia. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Colombia.

Prodeco. 2007. Actualización estudio de impacto ambiental mina Calenturitas. Elaborado por Integral, Ingenieros consultores. pp. 3.39.

Prodeco. 2008a. Alternativas de desviación del río Calenturitas tramo 3. Elaborado por Integral, Ingenieros consultores. pp.13.

Prodeco. 2008b. Actualización del modelo hidrogeológico matemático para el área de influencia del proyecto de explotación minera Calenturitas. Elaborado por Servicios Geológicos Integrados LTDA. pp. 60.

Prodeco. 2008c. Estudio de suelos del proyecto de explotación minera Calenturitas. Elaborado por GMAS LTDA. Laboratorio de geología, geofísica y geoquímica. pp. 81.

Prodeco. 2010. Caracterizacion Geotecnica de los Tramos 1 y 2. Relocalizacion del Río Calenturitas. Elaborado por Servicios Geotécnicos. pp. 50.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en Colombia, 2014. Cesar: Análisis de conflictividades y construcción de paz. Colombia.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en Colombia, 2010. Cesar: Análisis de la conflictividad. Área de paz, desarrollo y reconciliación, Colombia.

Quintero, D. y Herrera, I. 2009. Microbiología de las aguas subterráneas en la región sur del municipio de Valledupar, Cesar. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de microbiólogo, Universidad Popular del Cesar.

Rivas Vives, O. J. 2006. Actualización y reestructuración de la información para mejorar el modelo geológico en la mina Carbones de La Jagua S.A. Cesar, Colombia. Trabajo presentado para optar el título de Geólogo en la modalidad de pasantía. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Geología. Manizales-Caldas. pp. 65.

Robles et al. 2013. Calidad bacteriológica y fisicoquímica del agua del acuífero Tepalcingo-Sxochiapan, Morelos, México. Artículo Revista “Avances en Ciencias e Ingeniería”. Universidad Nacional Autónoma de México.

Rojas, E., Fortich, M., & Pavajeau, H. 2014. Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia. *Ingenium*, Vol. 8 (21). pp. 35-42.

Romero J. A. 2002. Calidad del Agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ruiz Castillo, S. M. 2011. Modelamiento de la falla La Victoria en el sector de Cerro de Piedra, proyecto La Jagua, municipio de la Jagua de Ibirico-Cesar. Trabajo presentado para optar el título de Geólogo en la modalidad de pasantía. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Geología. Manizales-Caldas. pp. 85.

RUSHTON, K. Numerial and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series, 1988. p. 223-237.

Scanlon, B.; Healy, R.; Cook, P. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10. pp. 18–39.

SCS (Soil Conservation Service). 1968. Soil Survey, Pulaski and Alexander Counties, Illinois. U.S. Department of Agriculture –USDA-, Washington, DC.

Severiche et al. 2013. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas. Colombia. Disponible en: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/index.htm>

Trezza, R. 2006. Cropwat para Windows. Roma, Italia.

Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H. y Nanni, M. 2006. Requerimientos de monitoreo del agua subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua. Grupo base del GW-MATE, Banco Mundial. Nota informativa número 9. Washington D.C.

Ujueta, G. y Llinás, R. 1990. Reconocimiento Geológico de la parte más septentrional de la sierra de Perijá. *Geología Colombiana*, Vol. 17, 2 figs., 5 micrografía., Bogotá. pp.197-209.

Uliana, M. Matthew (2000). Hydrogeology Lecture Notes. Edition 2.3. pp. 139.

United States Department of Agriculture (USDA). 1954. Quality of Irrigation Water. In: Agriculture handbook 60: Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. United States Salinity Laboratory. pp. 69-82.

Universidad Nacional de Colombia (UNAL). 2009. Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica e Isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de Turbo. Medellín.

Vargas, N. 2006. Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1). pp. 47-61.

Velasco, A. y Minota, Y. 2012. Evaluación por contaminación en suelos aledaños a los cementerios Jardines del Recuerdo e Inmaculada. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Vol. 22 (1). Bogotá. pp. 165 – 175. Disponible online: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91125275011>.

Vélez O., María Victoria; Rhenals G., Remberto L. 2008. Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe de Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, N° 24. pp. 37-54.

Werner, J. (1996). Introducción a la hidrogeología. Linares, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra.

WSP Parsons Brinckerhoff. 2017. Consultoría para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual regional para la zona de influencia de los proyectos mineros del Cesar. Informe final modelo hidrogeológico conceptual. pp.112.

Zaporozec, A., Conrad, J., Hirata, R., Johansson, P., Nonner, J., Romijn, E. and Weaver, J. 2002. Groundwater contamination inventory, a methodological guide. IHP-VI, Series on groundwater N° 2, UNESCO. pp. 160.