



**EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA REGIÓN DEL SUROESTE ANTIOQUEÑO.  
POTENCIAL DE UN RECURSO ESENCIAL INVISIBLE**

**CONVENIO NÚMERO 040-COV2111-156**

**INFORME FINAL**



**MEDELLÍN, AGOSTO DE 2022**

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Un proyecto de:

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -CORANTIOQUIA-

Ana Ligia Mora Martínez

Directora General

Diana Patricia Jaramillo

Subdirección de Gestión Ambiental

Andrea Carolina Báez Ardila

Sebastián Mesa Marín

Supervisores



Ejecuta:

Universidad de Antioquia

Equipo de trabajo

Geóloga Teresita Betancur Vargas, Ingeniera Paola Andrea Palacio Buitrago, Ingeniera Alba Nury Gallego, Ingeniera Cristina Martínez U., Ingeniera Juliana Ossa V., Ingeniero Rodrigo Alonso Díaz Correa, Geólogo Oscar Mejía R., Comunicadora Deisy Rivera A., Comunicadora Liliana Monsalve, Ingeniero Andrés Felipe Zapata C, Ingeniera María Alejandra Vela, Técnica Luz América Giraldo E.

Agosto de 2022, Medellín

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

## **Entidades, profesionales y personas que suministraron información disponible para este estudio:**

Servicio Geológico Colombiano: Gabriel Rodríguez, Mario Cuellar, Carlos Celada, Tomás Correa. Biblioteca de la Facultad de Minas de la UNAL Medellín: Sonia María Valencia. Universidad EAFIT: María Isabel Marín, José Fernando Duque. Perforando S.A.S: Edgar Jaramillo. Tierras y suelos: Luis Fernando Quintero. SERVIMINAS: Jorge Duque.

## **Funcionarios y contratistas de las Administraciones Municipales:**



Amagá: Emilio Ramírez, Luz Edilma Maya Maya; Andes: Juliana Quintero González, Natalia Cardona, Julián Gutiérrez; Armenia: Catalina Alcaraz, Juan Manuel Osorio; Betania: Johana Gómez Benjumea, Tatiana Montoya Montoya; Caramanta: Laura Corrales Ospina, María Fernanda Ramírez, Alejandro Arango Gil; Concordia: Juliana Toro, Luis Ángel Vélez, Diego Palacio; Fredonia: Jobany José Copete Álvarez, Gabriel Echeverri, Héctor Hernán Jiménez, Iván Darío Patiño; Hispania: Diana Marcela Rendon Echeverry, Carlos Andrés Estrada, Yesica Ardila, Sergio Taborda; Jardín: Juan Manuel Garces Suarez, Javier Esteban Carvajal; Jericó: Sebastián Garcés Piedrahita, Mauricio Álvarez, Jhon Meneses; La Pintada: Diego Fernando Barrera; Pueblorrico: Armando Caldero, Alexander Palacio, Jhon Jaime Zapata; Salgar: Carlos Beltrán, Juan Augusto Muñoz, Andrés Pineda; Santa Bárbara: Wilmar Ramírez, Jhon Didier Cuervo Carvajal, Franklin Castaño; Támesis, María Elcy Ospina Mejía, Andrés Felipe Ramírez, Luis Parra; Tarso: Carlos Javier Benítez Fernández, José Agustín Velásquez, Débora Alejandra Hurtado Ríos; Titiribí: Carlos Andrés Márquez, Gilberto De Los Ríos Carvajal, Fredy Taborda; Valparaíso: Yuly Vanessa Gutiérrez Agamez, Diego Fernando Ceballos, Raúl Noreña; Venecia: Alfredo Vásquez, Gladys García, Estefanía Bermúdez, Gustavo Alberto Torres Vásquez, José Ignacio Martínez.

## **Guías de Campo:**

Dahiana Conte Pino, Deiby Paola Montoya Herrera, Fabián Mauricio Zapata Montoya, Carlos Andrés Restrepo Gallego, Gustavo Adolfo Rojas, Nelson Daría Acevedo Cuartas, Gustavo Ancizar Arango, Jhon Fredy Vargas, Israel Antonio López, Duván Alexis Córdoba, Carlos Enrique Saldarriaga Galeano, Orlando Piedrahita, Nelson Jaramillo, Mario Andrés Correa, Juan Carlos Cardona Berrio, Stiven Valencia Rojas, Gustavo Posada, Alejandro Ramírez Sánchez, Ezequiel Valencia, Claudia Patricia González, Jaime Andrés Villada Botero, Ofelia Bedoya de Obando, Orlando Cartagena, Cristian Rafael Ríaza, Cerafín de Jesús Calle Agudelo, Diana María Agudelo, Jhon Henry Cardona Quintero, Alcisar de Jesús Holguín Rúa, Iván de Jesús Tamayo, Oscar Correa Rivera, Juan Carlos Ramos Restrepo, José Adrián Romero García, Raúl de Jesús Noreña Soto, Jorge Wilson Correa Correa, Andrés Felipe Gutiérrez Álvarez, Lina Viviana Vera Gutiérrez, John Alexis Arango Castañeda, Javier Alberto Gutiérrez Pérez, Erwin Zapp Rivera, Carlos Mario Giraldo Zapata, Duván Estiven Herrera Posada, Luis Aníbal Mesa Mejía, Ever de Jesús Granados Bermúdez, Hernando de Jesús Uribe, José Simón Cortes Macause,

Mesa Ambiental del Municipio de Jericó: Fernando Jaramillo

## **Participantes de la Red de Monitoreo Social:**



 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Jaime de Jesús Jaramillo, Elmer Estiven Castrillón, Oscar Gómez, Robinson Rodríguez, Álvaro Castañeda Rondón, Jorge Bedoya, Luis Baena, Gildardo Cruz Díaz, Elkin Arcila, Carlos Rebolledo, Victoria Martínez, Orlando Cartagena, Luz Elena Flórez, Mercedes Arrubla.

### **Personas que permitieron la realización del inventario de puntos de agua**

Libardo Serna, Carlos Rivera, Adíela Holguín, Jaime Restrepo, Edilma Atehortúa, Fabian Zapata, Andrés Gutiérrez, José Salazar, José Vidal, Jaime Jaramillo, Carlos Restrepo, Andrés Laverde, Gloria Arredondo, Guillermo Ceballos, Rodrigo Escobar, Luis Varela, Santiago Mena, Jorge Montoya, Gustavo Rojas, Nelson Acevedo, Ana Jael, Cesar González, Oscar Correa, Dora Londoño, María Ruiz, Héctor Restrepo, Mercedes Mejía, María Gallego, Jairo Montoya, Jorge Higueta, Fredy Flórez, Amilvia Zapata, Elmer Castrillón, Robinson Cárdenas, José Cardona, Wilson Castaño, José Sánchez, Gustavo Arango, Jhon Zapata, Gerardo Hernández, Augusto Ossa, Ana Benítez, Joaquín Arroyave, Beatriz Graciano, Benjamín Restrepo, Jair Zapata, José Murillo, Henry Higueta, Iván Solís, Mateo Díaz, Carlos Pineda, Jorge Ríos, Oscar Gómez, Luis Vélez, José Beltrán, Jhon Vargas, Cesar Villegas, Silvana Correa, Margarita Estrada, Esneda Delgado, Carlos Ríos, Dairo Contreras, Hernán Porras, William Bermúdez, Pedro Maya, Clai Valencia, Álvaro Castañeda, Albeiro Cardona, Edison Franes, Edgar Acevedo, Julio Palacio, Javier Bedoya, Danilo Echeverry, Carlos Saldarriaga, Alberto Berrio, Ovidio Gómez, María Cortés, Gildardo Cruz, Mario Correa, Luis Baena, Jhon Sierra, Esteban Restrepo, Antonio Saldarriaga, Stefanía Serna, Julio Cañaveral, Juan Quintero, Gustavo Álvarez, Carlos Ruiz, Luz Vélez, Alejandro Ramírez, Diego Cañas, Sixto Castañeda, Fabio Úsuga, Andrés Villamontes, Alba Álvarez, Diego Zapata, Ezequiel Valencia, Fernando Roldan, Yohana Galeano, Jorge Quintero, Duban García, Jorge Quiceno, José Carvajal, Gerleidar Echeverri, Luis Gómez, Julián Arenas, Andrés Villada, Ofelia Bedoya, Alejandro Cardona, Yolanda Villa, Rubén Villada, José Gonzales, Delfalina Berrío, Juan Marín, David Cartagena, Samuel Urrego, Luis Parra, Elkin Arcila, Martín Gómez, Rocío Murillo, Luis Ceballos, Cesar Marín, Cristian Riaza, Darío Ledezma, Zapata, Leobardo Arroyave, Luz Flórez, Juan Posada, Humberto Restrepo, Henry Cardona, Carlos Rebolledo, Gilma Soto, María Granada, Eduardo Orozco, Evenide Cardona, Luis Henao, Jairo Martínez, Carlos Flores, Jairo Mazo, Carlos Gañan, Paula Porras, Oscar Correa.

Alberto Palacio, Don Argiro (Vereda Vallecitos, Jardín), Gonzalo Henao, Gustavo Arboleda, Gustavo Velásquez, Jhon Marín, Julián González, Luis Betancur, Otoniel Correa, William Gaviria, Blanca Zapata, Hernando Uribe, Eduardo Arcila, José Ríos, Jesús Montoya, Mery Moncada, Alcides Quintero, Edwin Herrera, Leobardo Ramírez, Gustavo Ospina, Carlos Giraldo, Luis Mesa, Orlando Cartagena, Sofía Zapata, Napoleón Montoya, Erwin Zapp, Duván Cardona, Daniel Restrepo, Dairo Gallego, Carlos Restrepo, Abraham Pulgarín, Oscar Arteaga, Rita Castañeda, Eduard Agudelo, Andrés Vega, Josefina Mesa, Hernando Agudelo, Carlos Ramos, Adrián Romero, Wilder Velásquez, Carlos Ramírez, Javier Gutiérrez, Ligia Salazar, Fabio Nava, Robinson Piedrahita, Gilberto Isaza, Blanca López, Ingrit Salcedo, Jorge Bedoya, Viviana Vera, Silvia Sánchez, Gonzaga Ramírez, Ana Mesa, Orlando Jaramillo, Wilson Correa, Orlando Piedrahita, Raúl Noreña, Henry Cardona, Dairo Montoya, Alexis Arango, Darío Sánchez, Juan Grisales, Manuel Taborda, Octavio Arango, Germán Cano, Jairo Mazo, Fernando Vargas, Jairo Villa, Adán Darío Zapata, Alba Gallo, Andrés Mazo, Gabriel Vélez, Jeison Salazar, Carlos Velásquez, Nina Caldera, Carlos López, Marta Taborda, Luis Castrillón, Jaime Villada

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

### **Personas que prestaron su apoyo en la exploración geofísica:**

Felipe Arias, José Luis Ortiz, Ana María Álzate, Silvia Holguín, Rubén Vanegas, Alejandro Henao, Diego Martínez, Fernando Echavarría, Sergio Vélez, Hernando Mario Restrepo, Augusto Ossa, José Mario Grisales, Federico Botero, Juan Felipe Yasser, Miguel Ángel Botero, Lina María Trujillo, John Henry Cardona, Mauricio Agudelo, Luis Alfonso Rivas, Agustín Velásquez, Mercedes Arrubla, John Jairo Roldan, Diego Piedrahita, Dora Bedoya, Luis Eduardo Ramírez, Sebastián Lozano, Leidy Valencia, Alejandro Puerta y José Roberto Puerta.

### **Personas e instituciones permitieron la instalación de Totalizadores y han acompañado la operación de la Red Isotópica:**

AASA S.A. Wilson Vega y Zuleimi López (Gerente de AASA S.A.), Gabriel Echeverri, Iván Darío Patiño, (Alcaldía de Fredonia), Elkin Quintero (presidente del acueducto de Marsella), Juan Pablo Londoño Ortiz (Parque Educativo de La Pintada), John Jairo Roldan y Mercedes Arrubla (Institución Educativa Miguel Valencia, Municipio de Jardín)

### **Personas que permitieron la toma de muestras hidrogeoquímicas**



Hernando Uribe, Luis Parra, Margarita Parra, Simón Cortez, UP La Suiza (Caramanta), Hotel la Ceiba (Valparaíso), Jairo Vélez, Carlos Rebolledo, Orlando Cartagena, Victoria Martínez, Juan Tamayo, Oscar Correa, Fabio López, Hernán Arteaga, Elkin Quintero, Pedro Nel Maya, Gildardo Cruz, Leobardo Ramírez, Gustavo Ospina, Cesar Marín, Cristian Rianza, Alba Gallo, Jairo Mazo, Juan Carlos Velásquez, Antonio Saldarriaga, Eduardo Arcila, Henry Cardona, Hernán Porras, Edgar Acevedo, Julio Palacio, Ingrid Salcedo, Robinson Piedrahita, Javier Gutiérrez, William Gaviria, Julián González, Gonzalo Henao, Luis Betancur, Gustavo Velásquez.

### **Entidades que brindaron espacios para realizar los talleres de socialización**

Sede Comfama La Pintada: Cristian Camilo Mejía Buriticá, Laura Cristina Toro Morales



Casa de la Cultura del Municipio de Fredonia

Agosto de 2022, Medellín



 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	19
1 GENERALIDADES .....	21
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	21
1.2 PROBLEMA.....	24
1.3 OBJETIVOS.....	24
2 PREMISA CONCEPTUAL .....	24
3 METODOLOGÍA .....	27
3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	29
3.2 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN EN CAMPO .....	30
3.2.1 Inventario de puntos de agua subterránea .....	30
3.2.2 Correlación hidroestratigráfica: reconocimiento geomorfológico y pruebas geofísicas .....	31
3.2.3 Redes de monitoreo .....	31
4 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	32
4.1 CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA.....	34
4.2 ESTADO Y PRESIÓN DEL RECURSO HÍDRICO .....	42
4.2.1 Oferta del recurso hídrico superficial y presiones antrópicas sobre el recurso hídrico	42
4.2.2 Riesgo al desabastecimiento de agua.....	44
4.3 BOSQUE SECO TRÓPICAL -BsT .....	46
4.4 ACTORES SOCIALES EN LA ZONA .....	48
5 GEOLOGÍA .....	49
5.1 ROCAS METAMÓRFICAS.....	50

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

5.2	ROCAS ÍGNEAS .....	51
5.3	UNIDADES SEDIMENTARIAS .....	53
5.4	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES .....	55
6	RECARGA: HIDROLOGÍA .....	57
6.1	BALANCE HÍDRICO.....	57
6.2	ZONAS DE RECARGA .....	64
7	EXPLORACIÓN SOCIO-HIDROLÓGICA .....	66
7.1	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	66
7.1.1	Usos, caudales y demanda.....	68
7.1.2	Propiedades hidráulicas.....	70
7.1.3	Propiedades fisicoquímicas de campo .....	73
7.1.4	Condiciones de los puntos de agua.....	74
7.2	GEOFÍSICA .....	76
7.2.1	Tipos de curvas geoeléctricas .....	80
7.2.2	Los perfiles geoeléctricos.....	82
7.2.3	Consideraciones hidrogeológicas.....	84
7.3	RED FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	84
7.4	ACTORES CLAVE: LAS REDES DE CONECTIVIDAD HUMANA CON EL AGUA SUBTERRÁNEA.....	86
7.4.1	Mapa de actores en la zona de estudio.....	88
7.4.2	Diálogo de saberes: Una conversación visible sobre un universo esencial invisible	90
8	CORRELACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA Y POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO.....	93
8.1	CORRELACIÓN .....	94
8.1.1	Formación Amagá.....	96

	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	
---	---	---

8.1.2	Formación Combia .....	98
8.1.3	Depósitos aluviales .....	100
8.2	POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO .....	100
8.2.1	Conjunto hidrogeológico Sinifaná .....	101
8.2.2	Conjunto hidrogeológico Poblano .....	109
8.2.3	Conjunto hidrogeológico Fredonia .....	118
8.2.4	Conjunto hidrogeológico Cartama .....	127
8.2.5	Conjunto hidrogeológico Piedras – Mulatos .....	138
8.2.6	Conjunto hidrogeológico San Juan .....	148
8.2.7	Conjunto hidrogeológico Concordia .....	156
9	VALIDACIÓN .....	162
9.1	RED SOCIAL DE MONITOREO .....	163
9.2	Red de monitoreo hidrogeoquímico .....	166
9.3	Red de monitoreo isotópico de la lluvia .....	167
10	CONSIDERACIONES FINALES .....	167
11	CITAS Y BIBLIOGRAFÍA .....	172

## FIGURAS

Figura 1. Ruta metodológica para la evaluación del potencial hidrogeológico en la zona asociada al BsT en el suroeste de Antioquia. ....	28
Figura 2. Localización de la zona de estudio. ....	33
Figura 3. Distribución poblacional por sectores, según proyección del DANE al año 2022. ....	37
Figura 4. Concentración poblacional al año 2022. ....	38
Figura 5. Necesidades Básicas Insatisfechas NBI. ....	39
Figura 6. Índice de Pobreza Multidimensional. ....	40
Figura 7. Población en condición de miseria. ....	40
Figura 8. Cobertura de servicios públicos alcantarillado y acueducto en cabeceras municipales. ....	41
Figura 9. Cobertura de servicios públicos alcantarillado y acueducto en centros poblados y rural disperso. ....	42
Figura 10. Bosque seco tropical en la zona de estudio. ....	47
Figura 11. Mapa geológico de la zona de estudio. ....	50
Figura 12. Esquema de representación del volumen de control Suelo – Planta, celda a celda en el dominio del modelo SWB y los elementos del balance de humedad en el suelo que intervienen para la estimación de la recarga potencial directa (Bastidas, 2019). ....	58
Figura 13. Distribución espacial de la lluvia anual en la zona de estudio. ....	59
Figura 14. Variabilidad espacio – temporal de la recarga potencial directa mensual promedio multianual (2013 – 2020) para la zona de estudio. ....	60
Figura 15. Variabilidad espacial interanual de la recarga potencial directa estimada usando el modelo SWB para la zona de estudio (entre 2013 – 2020). ....	61
Figura 16. Distribución espacial de la recarga potencial promedio anual en la zona de estudio, entre 2013 y 2020. ....	63
Figura 17. Distribución espacial de la recarga potencial promedio anual en la extensión del BsT, entre 2013 y 2020. ....	64



	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	
---	---	---

Figura 18. Calificación de los cinco parámetros considerados en delimitación de zonas de recarga.	65
Figura 19. Delimitación de zonas de recarga.	66
Figura 20. Localización de todos los puntos de agua inventariados en la zona de estudio.	68
Figura 21. Distribución de los caudales asociados a los manantiales por rangos.	69
Figura 22. Distribución espacial de los puntos con información de propiedades hidráulicas.	73
Figura 23. Distribución de la información disponible de conductividad eléctrica del agua subterránea	74
Figura 24 Criterios para la definición de los sitios en los que se realizarían pruebas geofísicas.	77
Figura 25. Conjunto de zonas estratégicas para la exploración geofísica.	78
Figura 26. sitios en los cuales se practicaron las pruebas geofísicas en el presente estudio.	79
Figura 27. Curvas geofísicas Tipo I en la zona de estudio.	80
Figura 28. Curvas geofísicas Tipo II en la zona de estudio.	81
Figura 29. Curvas geofísicas Tipo III en la zona de estudio.	81
Figura 30. Curvas geofísicas Tipo IV en la zona de estudio.	82
Figura 31. Localización del Perfil 1 – Venecia.	83
Figura 32. Localización del Perfil 2 – Fredonia.	83
Figura 33. Localización del Perfil 3 -Jericó.	83
Figura 34. Localización del Perfil 4 -Támesis Valparaíso.	83
Figura 35. Localización del Perfil 5 – Tarso.	84
Figura 36. Superficie piezométrica y direcciones de flujo en la zona de estudio.	86
Figura 37. Síntesis del mapa de actores para el proyecto.	90
Figura 38. Capturas de pantalla de algunas socializaciones virtuales.	91
Figura 39. Localización de columnas estratigráficas disponibles a la fecha (Fuente: Elaboración propia).	95



 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Figura 40. Interpretación hidroestratigráfica preliminar de la sección tipo del Miembro Superior de la Formación Amagá. ....	97
Figura 41. Interpretación hidroestratigráfica preliminar de la sección tipo de la Formación Combia. ....	98
Figura 42. Conjuntos hidrogeológicos definidos para la zona de estudio (Fuente: Elaboración propia).....	101
Figura 43. Delimitación del conjunto hidrogeológico Sinifaná y las unidades geológicas priorizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000). ....	102
Figura 44. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Sinifaná. ....	103
Figura 45. Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia). ....	104
Figura 46. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022). ....	105
Figura 47. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Adaptado de Bastidas et al. 2022).....	106
Figura 48. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Adaptado de Bastidas et al. 2022).....	107
Figura 49. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia). ....	108
Figura 50. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia). ....	109
Figura 51. Delimitación del conjunto hidrogeológico Poblano y las unidades geológicas priorizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000). ....	110
Figura 52. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Poblano. ....	111
Figura 53. Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Elaboración propia). ....	112



 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Figura 54. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	113
Figura 55. Espesor del acuífero Combia en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Elaboración propia).	114
Figura 56. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	115
Figura 57. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	116
Figura 58. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Elaboración propia).	117
Figura 59. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Elaboración propia).	118
Figura 60. Delimitación del conjunto hidrogeológico Fredonia y las unidades geológicas priorizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000).	119
Figura 61. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Fredonia.	120
Figura 62. Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia).	121
Figura 63. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	122
Figura 64. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Formación Combia en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	123
Figura 65. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	124
Figura 66. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia).	125



 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Figura 67. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia). .....	126
Figura 68. Principales usos del agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia). .....	127
Figura 69. Delimitación del conjunto hidrogeológico Cartama y las unidades geológicas priorizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000). .....	128
Figura 70. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Piedras – Mulatos. ....	129
Figura 71 . Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia). .....	131
Figura 72. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022). .....	132
Figura 73. Espesor estimado para la Formación Combia profundo en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia) .....	133
Figura 74. Espesor de la unidad de la Formación Combia somero en el conjunto hidrogeológico Cartama.....	134
Figura 75. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).....	135
Figura 76. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022). .....	136
Figura 77. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia). .....	137
Figura 78. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia). .....	138
Figura 79. Delimitación del conjunto hidrogeológico Piedras-Mulatos y las unidades geológicas priorizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000). .....	139
Figura 80. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Piedras – Mulatos. ....	140



	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	
---	---	---

Figura 81. Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos (Fuente: Elaboración propia). .....	141
Figura 82. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año (medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022)).....	142
Figura 83. Espesores regionales de la Formación Combia profundo en el conjunto Piedras – Mulatos (Fuente: Elaboración propia).....	143
Figura 84. Espesor del acuífero asociado a la Formación Combia somero en el conjunto hidrogeológico Piedras – Mulatos.....	144
Figura 85. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022). .....	145
Figura 86. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos (Fuente: Adaptado Bastidas et al., 2022).....	146
Figura 87. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia). .....	147
Figura 88. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Piedras-Mulatos (Fuente: Elaboración propia) .....	148
Figura 89. Delimitación del conjunto hidrogeológico San Juan y las unidades geológicas priorizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000). .....	149
Figura 90. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto San Juan. ....	150
Figura 91. Espesores estimados para la Formación Combia profundo en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Elaboración propia). ....	151
Figura 92. Espesor del acuífero Combia somero en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Elaboración propia). ....	152
Figura 93. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).....	153
Figura 94. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).....	154



	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	
---	---	---

Figura 95. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Elaboración propia).	155
Figura 96. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Elaboración propia).	156
Figura 97. Delimitación del conjunto hidrogeológico Concordia y las unidades geológicas priorizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000).	157
Figura 98. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Concordia.	158
Figura 99. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Concordia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	159
Figura 100. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre los depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Concordia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).	160
Figura 101. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Concordia (Fuente: Elaboración propia).	161
Figura 102. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Concordia (Fuente: Elaboración propia).	162
Figura 103. Puntos que conforman las redes de monitoreo hidrogeológico.	163

## TABLAS

Tabla 1. Municipios que hacen parte de la zona de estudio.....	33
Tabla 2. Caracterización sociodemográfica de la zona de estudio. DANE 2018-.....	36
Tabla 3. Población perteneciente a grupos étnicos. Gobernación de Antioquia 2019.....	38
Tabla 4. Condición de los índices de estado y presión sobre el recurso hídrico superficial en municipios pertenecientes a la zona de estudio.....	43
Tabla 5. Valores reportados de IVH, IRCA, IRABA, BPS y CSM por la Gobernación de Antioquia en municipios pertenecientes a la zona de estudio.....	45
Tabla 6. Área total por municipio de las coberturas potenciales y análisis de coberturas en el año 2014 de bosque seco tropical. Fuente: IAvH, 2014. ....	47
Tabla 7. Resumen estadístico de la recarga potencial directa (RPD) total anual, promedio espacial para la zona de estudio.....	61
Tabla 8. Síntesis del inventario de puntos de agua en la zona de estudio de la Fase II. ....	67
Tabla 9. Estado de los puntos de agua inventariados. ....	68
Tabla 10. Propiedades hidráulicas recopiladas a partir de información secundaria y pruebas ejecutadas en campo .....	71
Tabla 11. Variables de priorización de zonas de interés hidrogeológico.....	77
Tabla 12. Síntesis de los Sondeos eléctricos verticales; su localización, geología superficial correspondiente y la profundidad de exploración estimada.....	79
Tabla 13. Valores estimados de Transmisividad a partir del espesor de capas de los SEV (Fuente: GEOFISIK, 2022) .....	84
Tabla 14. Clasificación por roles e intereses de actores del proyecto.....	90
Tabla 15. Categorías y convenciones para la interpretación hidroestratigráfica (Fuente: Elaboración propia).....	95
Tabla 16. Síntesis de criterios para la modelación espacial de los espesores de la Formación Combia a escala regional.....	99
Tabla 17. Interpretación hidroestratigráfica preliminar de una sección tipo de depósitos aluviales del río Cauca de la Formación Combia. ....	100





 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Tabla 18. Conjuntos hidrogeológicos, sus cuencas y geología priorizada.....	100
Tabla 19. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible y SEV (realizados para este estudio), en el conjunto Sinifaná.....	103
Tabla 20. Síntesis de características hidroestratigráficas del Miembro Superior de la Formación Amagá según información disponible y SEVs (realizados para este estudio) en el conjunto Poblano.....	112
Tabla 21. Síntesis de características hidroestratigráficas para la Formación Amagá, según información disponible y SEVs (realizados para este estudio) en el conjunto Fredonia.....	120
Tabla 22. Síntesis de características hidroestratigráficas para la Formación Combia según información disponible y SEV (realizados para este estudio) en el conjunto Fredonia.....	122
Tabla 23. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible y SEV (realizados para este estudio) en el conjunto Cartama.....	129
Tabla 24. Síntesis sobre características hidroestratigráficas de la Formación Combia, según información disponible en el conjunto Cartama.....	133
Tabla 25. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible y SEV (realizados para este estudio) en el conjunto Piedras – Mulatos. ....	140
Tabla 26. Síntesis sobre características hidroestratigráficas de la Formación Combia, según información disponible en el conjunto Piedras – Mulatos. ....	143
Tabla 27. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible y SEV (realizados para este estudio) en el conjunto San Juan. ....	151
Tabla 28. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible para este estudio en el conjunto Concordia.....	158
Tabla 29. Actores participantes en la Red de Monitoreos Social. ....	164
Tabla 30. Síntesis de las principales características de los conjuntos hidrogeológicos de la zona de análisis.....	168

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

## FOTOGRAFÍAS

Fotografías 1. Imágenes de rocas metamórficas asociadas a la zona de estudio.....	51
Fotografías 2. Características de algunas de las rocas que afloran en la zona de estudio. ....	52
Fotografías 3. Imágenes asociadas al grupo Cañasgordas y Complejo Quebradagrande. ....	53
Fotografías 4. Imágenes asociadas a la Formación Amagá.....	54
Fotografías 5. Imágenes asociadas a los depósitos recientes. ....	55
Fotografías 6. Condiciones de puntos de agua registrados en trabajo de campo. ....	76
Fotografías 7. Talleres de socialización en Fredonia y La Pintada .....	92
Fotografías 8. Socialización en la Institución Educativa Miguel Valencia. ....	92
Fotografías 9. Socialización con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado ASSA .....	93
Fotografías 10. Instrumentación Red de Monitoreo Social en los municipios de Andes, Concordia y Jardín.....	165
Fotografías 11. Entrega de resultados en el municipio de La Pintada. ....	166

## INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de aguas subterráneas en la región antioqueña del cañón del Río Cauca entre los municipios de Caramanta y Venecia, es el resultado de una secuencia de eventos orogénicos, climáticos, biológicos y humanos que se han ido sucediendo unos a otros a través de un proceso complejo durante un periodo de más de 60 millones de años. La historia de la formación de este entramado geográfico ha implicado entre otras cosas: el levantamiento de las cordilleras Central y Occidental de los Andes de América, la conformación de la cuenca sedimentaria de Amagá, la consolidación de las geografías definidas por los procesos volcánico-sedimentarios de la Formación Combia, los eventos tectónicos que han definido e imprimido las variadas geoformas, climas y paisajes expresados en una amplia diversidad de escenarios geográficos. A todo esto, se suma que los cambios de las propiedades del clima asociados a pisos altitudinales, regímenes de lluvia y temperatura y los correspondientes procesos biológicos y de meteorización en sus diferentes manifestaciones, forman en la región una interfase viva de suelos y ecosistemas vegetales que resultan ser claves para los intercambios y transformaciones dinámicas en las propiedades de la superficie de todo este dominio Biohidrogeológico.

Lo que hoy es este territorio está marcado por esa historia de evolución que se cuenta en millones de años, por la configuración de la red de drenaje y almacenamiento de agua y por el tejido de relaciones que el hombre ha impuesto desde su asentamiento y permanencia.

El sistema Río Cauca y sus flancos intercordilleranos constituyen la expresión hidrológica y geomorfológica más sobresaliente y determinante de los procesos de escorrentía superficial y subterránea de este complejo natural. Las superficies erosivas generadas en las partes superiores de la cordilleras Central y Occidental, además de ser los lugares de poblamiento actual, tienen una función hidrológica preponderante en la recarga de acuíferos y en la conformación de los principales ríos de la región. Es de especial interés, los cursos de geometrías meandriformes de los ríos Frío y Piedras y la quebrada la Guamo que discurren por la denominada meseta de Jericó, antes de su caída por las zonas escarpadas de la formación Combia y su llegada a través de pendientes suaves de la formación Amagá en las zonas ribereñas del Río Cauca. Por la margen derecha el río Poblano, la quebrada Sinifaná y el río Amagá esculpen una geografía que, también transita por escarpados cerros de roca subvolcanica.

El papel que juegan las estructuras vegetales en la red de flujos regionales y locales de agua superficial, atmosférica y subterránea de la región es evidente y de gran magnitud e importancia. En condición natural, las escorrentías están favorecidas y controladas por la pendiente, la litología y las estructuras geológicas. En una zona de litologías duras y de estructuras de flujo preferenciales asociadas a rocas sedimentarias y procesos tectónicos, las redes de fisuras de los sistemas radiculares de las plantas juegan un papel central en los procesos de infiltración y recarga. Las raíces constituyen un verdadero sistema dinámico de transformación de la porosidad del suelo en sus horizontes superior, medio e inferior y definen un conjunto de propiedades hidráulicas que determinan no solo los caminos por dónde se producen los movimientos del agua a través de los entramados del suelo roca y del entramado vegetal, sino también los flujos de agua hacia la atmósfera y los flujos multidireccionales de agua desde la zona vadosa o no saturada hacia el sistema de arroyos, ríos, quebradas y acuíferos que movilizan y almacenan el agua de la región; los cuales a su vez definen las magnitudes

e intensidades de los procesos de recarga de los acuíferos de las vertientes y el valle del Río Cauca antioqueño.

Desde el punto de vista biogeográfico, la región de interés de este trabajo está conformada por varios tipos de Biomas de los cuales el Bosque seco Tropical -BsT\_ representa el 20%. El BsT es un bioma forestal que ocurre en tierras bajas, entre los 0 y 1.000 m de altitud, de zonas tropicales con temperaturas superiores a los 24 °C, y precipitaciones anuales entre los 1000 y 2.000 mm, y se caracteriza por presentar uno o dos periodos de sequía marcados al año -precipitaciones menores a 100 mm- de al menos 5 a 6 meses (Mooney et al, 1995, citado en Pizano y García, 2014).

El BsT está en peligro de desaparecer. La tendencia de rápida transformación ha continuado persistentemente. En la actualidad se le suman presiones sobre este ecosistema que incluyen la agricultura, la ganadería, la minería, el desarrollo urbano y el turismo (Portillo-Quintero y Sanchez-Azofeifa, 2010, citado en Pizano y García, 2014). La conservación de los remantes y la recuperación de algún porcentaje de cobertura en la zona potencial son retos nacionales. Los bosques secos se pueden regenerar a través de mecanismos como el rebrote, los bancos de semillas y la dispersión de semillas, que se pueden fomentar por medio del manejo de factores claves como la disponibilidad de agua en el suelo (Pizano y García, 2014).

En el entorno de un territorio con estas condiciones, en el que además se suman problemas por no acceso a un agua segura, se concibe este proyecto que propende por abordar un mejor conocimiento sobre el potencial de aguas subterráneas, entendido este en términos de la presencia y función que este bien natural del subsuelo puede cumplir para la sostenibilidad del BsT a la vez que brinde bienestar al ser humano.

El agua subterránea se cataloga como un recurso invisible sobre el cual se requiere establecer rutas de comprensión que lo transformen en una idea tangible; el conocimiento es indispensable para su gestión y su gestión es un asunto colectivo de carácter local que impacta a la región.

La conceptualización de lo que se entiende por potencial hidrogeológico debe ir más allá de la clásica definición de lo que es un acuífero, para incluir las necesidades que se derivan del contexto sociocultural y la sostenibilidad ecosistémica. El equilibrio planetario está amenazado y con ello la supervivencia de la especie humana.

Los métodos para la comprensión de la presencia del agua subterránea en el sistema físico constituido por la litosfera son bien conocidos, la inclusión en esos métodos del conocimiento social es asunto que apenas hace unos pocos años se empieza a reconocer.

Con la ejecución de este estudio al que hemos titulado: “El agua subterránea en la Región del Suroeste antioqueño: Potencial de un recurso esencial invisible” se pretende proponer un modelo conceptual, que destaque el potencial hidrogeológico de las unidades litológicas priorizadas y relacionadas con el Bosque Seco Tropical, en el cañón del río Cauca, entre Caramanta y Amagá. Este propósito se circunscribe en el desarrollo del convenio número 040-COV2111-156, entre CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia, el cual tiene como fin: “Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la jurisdicción de Corantioquia en unidades hidrogeológicas priorizadas”

Hacen parte de los resultados de este cometido una serie de documentos soporte que con la denominación de “Entregables” detallan la ruta y resultados particulares de las actividades que permitieron dar cumplimiento al objetivo cometido. A estos documentos se irá haciendo referencia a lo largo de este texto.

Este manuscrito consta de nueve capítulos que recogen una serie de elementos de contexto y resultados del proyecto.

En el capítulo 1 se hace una exposición de los motivos que justifican el estudio a la luz de un problema concreto, planteando unos propósitos logrables y medibles. A continuación, se presentan las premisas conceptuales que permiten entender, para el contexto de interés, el significado de lo que debe entenderse por potencial hidrogeológico, enfatizando en la necesidad de reivindicar la idea de un potencial socio-hidrogeológico. Como recorrer una ruta para cumplir este propósito se resume en un capítulo de metodología. Las características socioeconómicas, el estado y presión sobre el recurso hídrico, el reconocimiento a los actores sociales y la extensión del BsT en el suroeste de Antioquia se resumen en el capítulo 4, denominado Caracterización de la zona de estudio. Siendo la naturaleza de la corteza terrestre y la dinámica del ciclo hidrológico el medio y el motor de la presencia de agua en el subsuelo, se incluyen dos capítulos temáticos enmarcados en el entorno local para describir la geología y la hidrología en la zona de estudio. Posteriormente (capítulo 7) se plantean los componentes fundamentales de lo que, en el marco de este proyecto, se concibe como exploración socio-hidrogeológica; contenido que desemboca en los resultados concretos de este estudio, mediante los cuales se describe un primer modelo hidrogeológico conceptual. Al final se proponen unos caminos para proseguir, mediante un trabajo articulado en redes, con las labores que permitan consolidar un conocimiento con trascendencia social que incluya a todos esos actores, organizaciones, individuos y colectivos que se enuncian en el largo listado de créditos que encabezan este manuscrito y a todos aquellos que quieran unirse al diálogo.



## **1 GENERALIDADES**

### **1.1 JUSTIFICACIÓN**

Una pregunta ha acompañado este proceso de evaluación del potencial hidrogeológico en el Suroeste antioqueño: ¿Porque es importante estudiar las aguas subterráneas de la región? Las siguientes líneas tienen como propósito fundamental, reunir algunos elementos y conceptos esenciales que permitan construir una de muchas posibles respuestas a esta pregunta.

Empecemos diciendo que, a nivel global, las aguas subterráneas representan cerca del 96% del agua dulce líquida disponible en el planeta, en contraste, las aguas superficiales -representadas en ríos, quebradas, lagos, lagunas, ciénagas, caños y cañadas-, representan menos del 1% del total.

A causa de la creciente escasez de agua en muchas partes del mundo, no se puede pasar por alto el gran potencial de las aguas subterráneas y la necesidad de gestionarlas con cuidado. Las aguas subterráneas proporcionan a las sociedades, invaluable beneficios sociales, económicos y medioambientales, entre ellos la adaptación al cambio climático. (WWDR 2022).

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Actualmente, las aguas subterráneas aportan la mitad del volumen de agua extraída para el uso doméstico de la población mundial, cerca del 40% del agua para las tierras de regadío del planeta y alrededor del 70 % de las aguas extraídas en todo el mundo para la agricultura.

Las aguas subterráneas representan una cantidad significativa del caudal de los sistemas hídricos superficiales. Los sistemas hidrogeológicos, mantienen la integridad de los ecosistemas acuáticos en los periodos secos y son fundamentales en los procesos de regulación hidrológica durante los periodos de extremos máximos.

La calidad de las aguas subterráneas es generalmente buena, lo que significa que pueden utilizarse de forma segura y asequible, sin necesidad de niveles avanzados de tratamiento. Además, suelen ser la forma más rentable de proporcionar un suministro seguro de ese líquido a las comunidades rurales.

Las aguas subterráneas son claves para la conservación de la biodiversidad en virtud de la interdependencia con muchos de los principales tipos de humedales. Dado que estos ecosistemas albergan especies en peligro de extinción, los sistemas acuíferos son esenciales para su supervivencia.

La gestión de las zonas de recarga como elementos clave de la estructura ecológica principal de los territorios, requiere de un proceso previo de identificación y conocimiento.

A pesar del enorme reconocimiento de su importancia y potencial, este recurso natural estratégico no se comprende lo suficiente, se subestima y no se incorpora de manera contundente en los procesos de gestión integral del Agua.

Las aguas subterráneas y el reconocimiento de este patrimonio natural oculto no solo son importantes en el contexto global, sino también en el ordenamiento ambiental colombiano y de la región del suroeste antioqueño; así mismo existe una urgente necesidad de estudiarlo para conocerlo y poder administrarlo desde la perspectiva de la sustentabilidad, la interdependencia y la resiliencia de los socioecosistemas.

En Colombia, en el año de 1974 salió a la luz pública el Código Nacional de Los Recursos Naturales Renovables (Decreto Ley 2811/74), en el cual se define entre muchos otros asuntos, que los estratos o depósitos de las aguas subterráneas (Acuíferos), hacen parte de la riqueza nacional y tienen la categoría de bienes inalienables e imprescriptibles del estado (art. 83).

Un porcentaje importante de las fuentes de provisión de agua para las crecientes comunidades y la variada economía de la región del suroeste antioqueño, corresponden a aguas subterráneas que son aprovechadas a través de manantiales, pozos y aljibes.

Es una tarea fundamental de la administración pública: coordinar y promover el aprovechamiento racional de los recursos naturales renovables para beneficio de la comunidad y organizar el uso combinado de las aguas superficiales, subterráneas y meteóricas. (art. 314 CNRR).

En el suroeste antioqueño, a pesar de su carácter invisible, los sistemas hidrogeológicos y los recursos hídricos subterráneos que albergan constituyen un elemento esencial para el funcionamiento de las cuencas hidrográficas de la región. El código de Recursos

Naturales establece que, cuando los límites de las aguas subterráneas de una cuenca no coincidan con la línea divisoria de aguas, estos límites deberán ser extendidos subterráneamente hasta incluir los límites de los acuíferos subterráneos.

De acuerdo a lo establecido en la Política Hídrica Nacional (MADS, 2010), el principal instrumento de planificación de los recursos hídricos subterráneos se materializa en Planes de manejo de Acuíferos. Para poder contar con estos planes, se requiere de un insumo base que aporte a la comprensión del funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos, de ello depende la posibilidad de conocer la oferta, la demanda, la calidad de las aguas subterráneas y su real potencial.

Un aspecto fundamental para destacar en el marco de este estudio es que el bosque seco tropical, un ecosistema escaso, vulnerable y con buena representación espacial en la zona ribereña del Río Cauca en el suroeste antioqueño, se ubica sobre un sistema acuífero que constituye una de las más importantes reservas de agua en la región.

Es fundamental tratar de trascender la comprensión del sistema físico, por ello los trabajos de educación, comunicación ambiental y Gobernanza del agua subterránea, deben partir del re-conocimiento del potencial hidrogeológico y de la comprensión del funcionamiento integrado de los sistemas superficiales, atmosféricos y subterráneos. El cuidado del agua subterránea exige armonizar las actividades socioeconómicas en un territorio que tiene componentes estructurantes hacia arriba y hacia abajo de la superficie.

El denominado ordenamiento territorial, no puede desconocer las geografías subterráneas. Muchos de los procesos de expresión en superficie, ocurren y se explican por procesos hidrogeológicos. Reconocer la importancia de los componentes y procesos del subsuelo, es fundamental para la Gestión Integrada de los recursos naturales del suelo y el subsuelo y para la toma de decisiones basada en evidencia.

Hay otros elementos a que no pueden perderse de vista, entre ellos la urgente y cada vez más importante necesidad de desarrollar procesos de Gestión Integral del riesgo, exige el reconocimiento de las aguas subterráneas y de los sistemas hidrogeológicos en general. La comprensión e inclusión de los componentes de la geografía subterránea ayudan a mejorar los instrumentos de planificación territorial.

Desde un contexto de cambio Climático como el que estamos viviendo, es prioritario considerar las aguas subterráneas como una fuente de provisión estratégica. El uso sostenible de este recurso requiere conocimiento básico y el desarrollo de Planes de manejo de Acuíferos.

Este año de 2022, ha sido declarado por la Organización de las Naciones Unidas -ONU, cómo el año internacional de las aguas subterráneas y se hace un llamado para hacer visible este recurso invisible. En el Informe de la ONU sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022, se insiste con énfasis, que las aguas subterráneas proporcionan enormes beneficios sociales, económicos y medioambientales; constituyen un elemento clave para atender la crisis del agua y son un recurso estratégico frente a la adaptación al cambio climático (Dakar, Senegal, IX Foro Mundial del Agua).

Solo se puede gestionar aquello a lo que se re-conoce su existencia y Potencial.

## 1.2 PROBLEMA

El BsT, uno de los ecosistemas más amenazados en Colombia, está a punto de desaparecer en el cañón del río Cauca en Antioquia; en el suroeste del departamento su expresión se ha reducido al máximo y las presiones que existen sobre ese territorio -asociadas al desarrollo de obras de infraestructura, crecimiento poblacional y visiones de desarrollo económico- no son prometedoras en términos de su conservación; su permanencia depende de que no se destine su zona de potencial a otros usos y de que se garantice que el subsuelo continúe suministrando las condiciones de humedad que requiere para cumplir sus funciones metabólicas. El entorno que configura la zona de influencia del bosque seco, definido hidrológicamente desde las vertientes que encauzan hacia él agua mediante flujos superficiales y subterráneos, está habitado por pobladores que se abastecen de fuentes hídricas y puntos de agua, para suplir sus necesidades. Sin embargo, no se ha incorporado el territorio hídrico subterráneo su relación con las aguas superficiales y su potencial, en los procesos e instrumentos de planeación regional. El conocimiento es indispensable para lograr esa incorporación.

## 1.3 OBJETIVOS

Bajo el contexto aquí expuesto, se adelantó este estudio, con el objetivo general de proponer un modelo conceptual, que destaque el potencial hidrogeológico de las unidades litológicas priorizadas y relacionadas con el Bosque Seco Tropical, en el cañón del río Cauca, entre Caramanta y Amagá.

La concepción de este objetivo lleva implícita la necesidad de obtener unos resultados que nutran el conocimiento que se requiere para soportar una adecuada gestión del territorio y del recurso hídrico.

En primer lugar, se sintetiza el significado que se le dará al concepto de potencial hidrogeológico. Como referentes del contexto de la zona de estudio se tendrán en cuenta, además de los elementos del medio físico natural, las relaciones derivadas de la acción humana en el territorio que se manifiestan en la población, sus condiciones de vida y la presión sobre el recurso hídrico. Bajo la directriz de las rutas para la exploración hidrogeológica, partiendo de la definición y síntesis de las características geológicas e hidrológicas, se consolida mediante el inventario de puntos de agua, el acompañamiento participativo de actores sociales, la realización de pruebas geofísicas e hidráulicas un modelo de correlación hidroestratigráfica que deriva en un modelo hidrogeológico conceptual.

## 2 PREMISA CONCEPTUAL

Bajo una concepción sistémica el ciclo hidrológico (movimiento ininterrumpido del agua en todos sus estados desde todos sus orígenes hasta todos sus destinos) conecta los distintos reservorios de la hidrósfera mediante procesos de flujo. El agua que desde la atmósfera fluye como precipitación puede seguir varias rutas: fluir como escorrentía superficial directa o quedar retenida temporalmente en la superficie, desde donde puede ser evaporada o infiltrarse hacia el suelo; el flujo gravítico desde el suelo hacia la litósfera se da cuando la zona no saturada alcance la capacidad de campo. Es en ese compartimiento litosférico y por efecto de la recarga que se configura el ámbito de las aguas subterráneas.

En el contexto espacial y socioeconómico en el que se desarrolla este proyecto, y en el que se busca determinar el potencial hidrogeológico, asociado a la región de bosque seco, en el suroeste de Antioquia se hace necesario proponer una aproximación conceptual sobre lo que entendemos por potencial y plantear algunas consideraciones para el abordaje y la comprensión de este concepto.

El potencial suele referir, en el imaginario, la idea de promesa o esperanza: la posibilidad de llegar a ser; y luego de lograrlo se traduce en la oportunidad para alcanzar una mayor capacidad o poder. Desde el punto de vista etimológico, el potencial se refiere a lo concerniente, relativo, perteneciente y alusivo a la potencia. La potencia se refiere al poder, a la energía, la fuerza; a la capacidad de realizar trabajo, una función o una acción, o de producir un efecto determinado. Se define como la propiedad de poseer o encerrar una potencia. El potencial se refiere a una cualidad relacionada con una cosa que tiene la eficacia, eficiencia o virtud de otras y puede equivaler a ellas. El potencial también alude a un periodo que expresa posibilidad. Así pues, el Potencial tiene múltiples significados, uno de ellos se relaciona con la capacidad o poder de acción; otro, se asocia con la posibilidad de ser. Se puede tener un gran potencial magnético en un mundo de plástico, pero allí no es posible desarrollar ese potencial. El potencial de evapotranspiración de agua en un desierto cálido es altísimo, pero la evapotranspiración real es muy baja en relación con el potencial.

El término hidrogeología invita a abordar la formalidad del conocimiento dentro de las ciencias aplicadas, hace referencia a la interacción entre las rocas y el agua logrando una compenetración íntima que permite hablar de ellos como un sistema. Una unidad hidrogeológica es una formación geológica, parte de una formación geológica o un conjunto de ellas que se caracterizan por tener propiedades hidráulicas semejantes; entre estas, especialmente, la permeabilidad.

En primera instancia puede entonces entenderse el potencial hidrogeológico como la capacidad de las rocas del subsuelo para recibir, almacenar y transmitir agua de manera natural o inducida. Pero a la vez, se puede tener un gran potencial hidrogeológico en un mundo que no ve el agua subterránea, en un mundo que no la usa directamente, en un mundo que no sabe que existe y que no sabe de su importancia para el funcionamiento de los socioecosistemas de los cuales depende. Podemos ignorar que un bosque es resistente a las sequías asociadas con largas temporadas cálidas y sin lluvia, porque desconocemos que se provee de agua desde un acuífero al que está íntimamente conectado a través de su sistema de raíces.

Es importante señalar que la viabilidad económica de extraer agua de una formación geológica está mediada por la necesidad o demanda del recurso, en ese sentido no se pueden establecer límites netos, en términos de condiciones hidráulicas para calificar una formación como acuífero o no. La hidrogeología clásica reconoce el carácter de acuífero a formaciones con conductividades hasta del orden de 10-4 m/día, siendo las más favorables las que superan la dimensión de 1 m/día (Custodio y Llamas, 1996).

Sin embargo, creemos que aquí hay un paradigma por romper, el potencial de un recurso, de un bien; depende no solo del potencial en sí mismo, sino que depende también de las necesidades que se tenga de ese bien o recurso; de su importancia. Es decir, el potencial es relativo. Si una comunidad requiere un litro de agua subterránea cada segundo y se abastece a través de un aljibe que los conecta a un acuífero que puede proveer hasta 10 litros por segundo, entonces existe un gran potencial de

abastecimiento de agua subterránea. Por el contrario, si con el mismo aljibe -que es la única fuente de abastecimiento- se debe atender una comunidad que requiere 100 litros por segundo, entonces el potencial es bajo, pero su importancia es muy alta. De aquí puede inferirse el carácter relativo del potencial y se puede entender que un recurso que tiene un Potencial bajo no es menos importante que uno que al que se le califica como alto. Este es un aspecto relevante porque a pesar de que el Potencial y la importancia de un bien o recurso no significan lo mismo; unidos tienen enorme valor y utilidad para la toma de decisiones responsables basadas en información y conocimiento.

La determinación del potencial hidrogeológico, a partir de criterios geológicos, parte de la idea clásica según la cual la naturaleza y distribución de acuíferos y acuitardos en un sistema geológico están controlados por la litología, estratigrafía y estructuras de los depósitos y las formaciones geológicas (Freze y Chezy, 1979). No obstante, hay que tener en cuenta que existen otras características asociadas al medio físico, factores climáticos y efectos derivados de las condiciones socioeconómicas de cada región. La litología determina el tipo de roca, su edad, el grado de consolidación, la naturaleza de los cementantes, las estructuras y su disposición, la tectónica; todos estos factores inciden en la geomorfología, los drenajes, la madurez de las cuencas. Las variables y procesos hidroclimáticos que más inciden en la posibilidad de presencia de agua en las rocas son la precipitación, la temperatura, la evaporación, la recarga. Según la naturaleza geológica y las condiciones climáticas se derivarán condiciones de suelos y ambiente que definen las condiciones ecosistémicas. Finalmente, la presencia y la actividad humana constituyen un factor determinante en la definición de lo que podría llegar a ser una unidad hidrogeológica, no solo en términos de la demanda de agua sino en la alteración al medio natural que puede posibilitar o inhibir el desarrollo de ese potencial.

Es común que cuando hablamos de manantiales, nacimientos o alumbramientos de agua, pensemos en quebradas, ríos y cañadas; no es común que pensemos que esas aguas que brotan desde el suelo son aguas subterráneas, ni que una gran variedad de humedales de enorme importancia, están asociados a los sistemas acuíferos. La mayoría de los sistemas hídricos superficiales, no solo se originan, sino que además se alimentan de aguas subterráneas. Lo que explica que durante las épocas secas -sin lluvia o poca lluvia-, los ríos, quebradas y ciénagas, sigan teniendo agua en sus cauces, es la existencia del agua subterránea. Lo que se denomina como caudales base de los sistemas hídricos superficiales, corresponde al aporte del agua subsuperficial y subterránea, que se vuelve esencial y valioso para la continuidad de la vida en esos sistemas y de la vida misma de los ríos, quebradas, ciénagas, caños y cañadas.

El potencial hidrogeológico trasciende el potencial del agua subterránea para la provisión de agua a las personas y comunidades. Un potencial que tienen los sistemas acuíferos se relaciona con el riesgo de desastres. Los sistemas acuíferos tienen el potencial de almacenar agua; esa capacidad adquiere gran importancia en los periodos de sequía y altas precipitaciones. Cuando hay sequía, -entendida como ausencia o escasez de lluvias durante un período prolongado de tiempo-, se produce sequedad en los campos y escasez de agua superficial. Durante estos periodos, el potencial del agua subterránea adquiere mayor importancia, porque en muchos casos y regiones, es la única posibilidad de abastecimiento y la mejor posibilidad para reducir los riesgos asociados a la escasez de agua. Por el contrario, en tiempos de precipitaciones intensas, los ríos y quebradas se desbordan y las inundaciones ponen en riesgo las comunidades, sus cosechas, casas y las infraestructuras. Mantener las capacidades de

recarga de los sistemas acuíferos y gestionarlos de manera integral y consciente, pueden constituir una acción clave para la reducción de riesgos de inundación o movimientos en masa.

El potencial es fundamental en los procesos de planeación territorial. Puede ser que un recurso como el agua subterránea no sea requerido ni usado por una comunidad. Pero puede ocurrir que ese recurso sea fundamental en el futuro. El cambio climático, el crecimiento poblacional, la transformación de los territorios, los usos del suelo pueden comprometer el potencial hidrogeológico e inhabilitar su potencial uso. Dado que el potencial depende no solo de la magnitud de las reservas, de la recarga, de la transmisividad, sino que depende también de la calidad; gestionar el potencial hidrogeológico implica también planificar las prácticas humanas que ponen en riesgo la calidad del agua y su posible uso. La aplicación sistemática al suelo de un agroquímico o el uso de una técnica agrícola que compacta el suelo, la minería que extrae recursos naturales a través de socavones o a cielo abierto removiendo capas permeables o alterando el sistema de flujo de agua, el crecimiento urbano y el desarrollo de infraestructuras que cubren el suelo inhibiendo la recarga, son todas prácticas -entre otras- que puede afectar seriamente el potencial hidrogeológico y comprometer el futuro de los socioecosistemas. Gestionar el potencial aprovechamiento de las aguas subterráneas pasa necesariamente por el ordenamiento territorial. Los sistemas de acueducto y alcantarillado; los procesos de gestión de residuos sólidos y líquidos deben tener en cuenta el potencial hidrogeológico e incluirlo de manera seria en sus planes correspondientes.

Es preciso pasar del potencial hidrogeológico al potencial socio-hidrogeológico. Esta afirmación significa múltiples cosas. Una de ellas nos indica una realidad básica relacionada con una antigua premisa: “No se puede cuidar aquello que se desconoce”.

El potencial hidrogeológico hace alusión a la cantidad de agua subterránea disponible, a la capacidad del medio poroso para almacenarla, a la capacidad de los acuíferos para dejarla fluir.

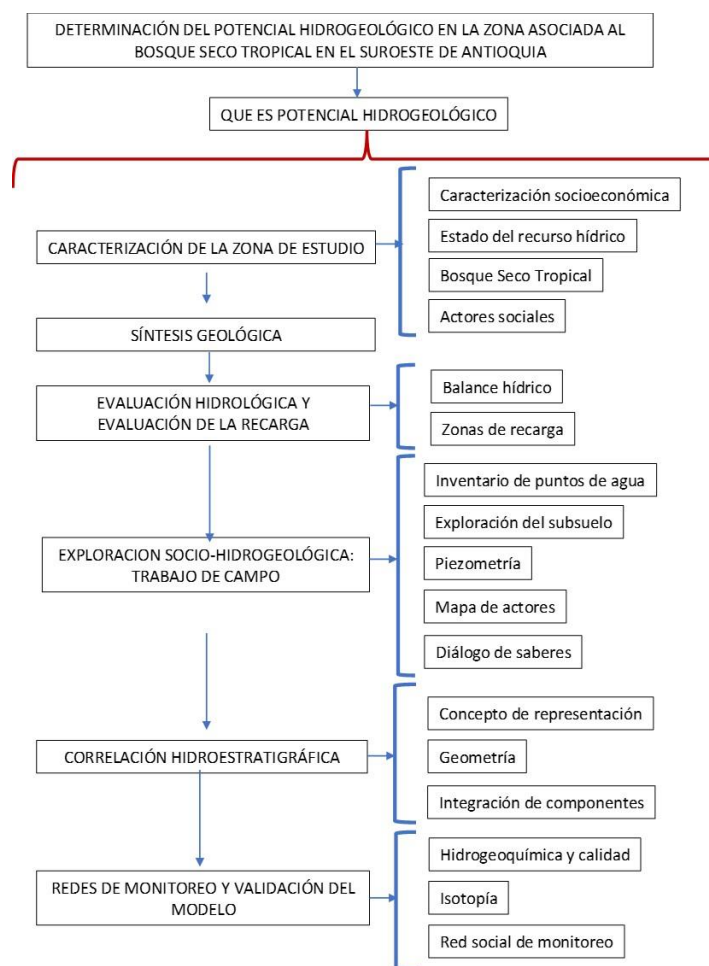
El Potencial socio-hidrogeológico se entiende como la capacidad que tienen las personas, la comunidad, la sociedad de comprender, reconocer y aprovechar con criterios de sostenibilidad, las aguas subterráneas de una región. El potencial hidrogeológico es relativo a las características de cada caso de estudio y depende, entonces, de las reservas de agua subterránea, de la recarga, la transmisividad, la calidad, la necesidad del conocimiento y la apropiación de él.

### 3 METODOLOGÍA

De habitar el territorio y de tejer relaciones con el entorno, incluyendo en este a los vecinos, pero también a las geografías distantes que en un escenario de globalización ya se tocan, genera necesidades no solo para satisfacer los requerimientos vitales sino también para construir un bienestar (sujeto este a múltiples significados) y reconocer los derechos de esos otros sujeto que tantas veces se tarda en categorizar como tal y es la naturaleza: los ríos, el suelo, el aire, todas las formas de vida.

La ruta metodológica (Figura 1) para construir modelos hidrogeológicos conceptuales se ha definido ya desde las ciencias de la hidrología y la geología; ellas han sido retomadas, adaptadas y ajustadas cada vez que se emprende un nuevo proyecto o se asume una nueva fase para profundizar en el conocimiento. Lo que pocas veces se ha

escrito y rara vez se reconoce es que el soporte de este conocimiento se cimienta a punta de recorrer caminos guiados por los moradores de la geografía que tienen, casi que, adherido a su ADN, otro conocimiento soportado en la observación y la vivencia diaria, en la cotidianidad y lo práctico, en la convivencia y la búsqueda de soluciones a sus problemas y satisfacción de sus necesidades, en la intervención sobre la naturaleza. También aquí cobra importancia el sentido de la sociohidrogeología, o el significado de la ciencia ciudadana que, conceptualmente, se viene posicionando en los últimos años.



**Figura 1. Ruta metodológica para la evaluación del potencial hidrogeológico en la zona asociada al Bst en el suroeste de Antioquia.**

En este orden de ideas y pretendiendo, también, dar un orden, en lo posible secuencial, a la exposición de la metodología seguida para la ejecución de este proyecto se plantea que la primera actividad a realizar ha sido la de elaborar un contexto geográfico y/o socioeconómico de la zona de estudio. Este incluye la descripción de los rasgos físicos del territorio y las características de la población y sus condiciones de vida, se expone también la situación del recurso hídrico, las condiciones de presencia de los biomas definidos como más estratégicos (en este caso el Bosque Seco) y se reconocen los personajes que puedan constituirse en actores claves para la síntesis del conocimiento en aras a procurar cumplir con los objetivos del proyecto.

El reconocimiento de la geología, con fines hidrogeológicos, tiene el propósito de identificar entre los tipos de roca, según su origen y evolución las características de porosidad y permeabilidad que le imprimirían un carácter hidrogeológico, bien sea como acuífero, como acuitardo o acuicludo o como unidad impermeable que constituya un basamento o una frontera para el sistema. unidades hidrogeológicas.

Del análisis hidrológico, soportado en información hidroclimatológica, se calcula la recarga potencial directa, su magnitud marcará los límites para definir la extracción sostenible del recurso hídrico subterráneo.

El, normalmente, denominado trabajo de campo combina todas las actividades del inventario de puntos de agua, la ejecución de la recolección de información del subsuelo, bien sea mediante métodos geofísicos o practicando perforaciones, la medición de los niveles (o profundidad) a los que se observa el agua subterránea, la identificación de las relaciones con, o entorno a, el agua por parte de los actores sociales y el diálogo para intercambiar saberes.

La disposición y posterior interpretación de la relación espacial y en profundidad de los datos reunidos -actividad que se ejecuta mediante el intercambio de percepciones y experiencias, apoyados en las posibilidades que brindan las herramientas de modelación espacial- constituye la ruta para obtener los modelos de correlación hidroestratigráfica y acoplar a ellos las propiedades de flujo del agua subterránea, que incluyen también caudales o valores de conductividad hidráulica y estimación de magnitudes volumétricas y tasas de utilización por el hombre.

En su recorrido, desde el origen en la lluvia que luego puede ser recarga, a través de su camino entre poros y hasta brotar nuevamente en un manantial o ser extraída mediante un pozo, el agua subterránea va siendo marcada por unas huellas que permiten luego interpretar su historia; en este punto cobran significación e importancia la toma de muestras para el análisis de las propiedades químicas e isotópicas y la conformación de redes permanentes de monitoreo.

El resultado de un proyecto termina siendo así una fase, desde la primera y, hacia los impactos y perspectivas que se trazan con ellos.

Para proporcionar mayor claridad acerca de la forma en que se ha procedido para allegar la información que se analiza para concretar los resultados previstos, se presentan aquí algunas consideraciones acerca de lo que ha sido los procesos de recopilación de información disponible y el levantamiento en campo.

### **3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE**

Los primeros pasos ya han sido dados por otros, por muchos; la geografía del suroeste de Antioquia bajo la óptica de intereses por el conocimiento de la geología y los recursos naturales ha sido recorrida desde hace décadas, incluso siglos. Como en todo proyecto la identificación y recolección de lo que se haya sistematizado y exista como información disponible es una labor ardua.

Para sintetizar una visión acerca del potencial de las aguas subterráneas en la zona de influencia del BsT en el suroeste de Antioquia se revisaron más de 150 documentos, ellos comprendieron: i) informes técnicos reunidos en boletines geológicos e hidrogeológicos o reportes de comisiones del Servicio Geológico; ii) tesis de grado de

geología o ingeniería geológica e investigaciones de maestría o doctorado en las universidades: Nacional de Colombia –Sede Medellín-, EAFIT y Escuela de Ingeniería de Antioquia; iii) informes técnicos para solicitudes de sustracciones de áreas protegidas, estudios de impacto ambiental, solicitud de licencias y expedientes dispuestos en el Sistema de Recurso Hídrico eSIRENA de CORANTIOQUIA; iv) artículos publicados en revistas indexadas; v) algunos informes de archivo, que no tenían restricción de confidencialidad, de empresas consultoras como SERVIMINAS y Perforando. Un listado de estas fuentes de información se presenta al final de este informe.

### 3.2 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN EN CAMPO

A la luz de los objetivos de este estudio, adicionalmente a la recopilación de la información disponible, se efectuaron labores de acercamiento y recolección de información en campo, orientadas a cumplir con: la realización del inventario de puntos de agua subterránea, allegar criterios geológicos y geomorfológicos para ajustar la correlación estratigráfica, definir de los sitios para efectuar las pruebas geofísicas y conformar y poner en operación las redes de monitoreo.

Los recorridos en campo fueron claves, ya que ellos hicieron evidente la presencia, el reconocimiento social y el uso que la población hace del agua subterránea en este territorio, en donde de manera formal e institucional poco, o casi nada, se conoce al respecto. Esta circunstancia consolida y prueba la validez del presente proyecto y pone de manifiesto la necesidad de trascender hacia exploraciones más detalladas y formulación de Planes de Manejo Ambiental.

#### 3.2.1 Inventario de puntos de agua subterránea

El inventario de puntos de agua es una actividad orientada a la recolección de información en manantiales, pozos, aljibes, zanjas y galerías de agua; sitios en los que el agua subterránea se hace manifiesta y accesible a la observación. Algunos de esos datos pueden recopilarse a partir de informes disponibles en oficinas de entidades ambientales o administraciones municipales, pero la ruta más efectiva para consolidarlo es el recorrido en campo a través de vías y hacia veredas y comunidades que para cada municipio se identifican mediante trabajo previo en oficina.

Luego de establecer los mecanismos para emprender esta labor en el suroeste de Antioquia se establecieron los contactos (visitas, llamadas telefónicas y correos electrónicos) con actores claves de la región, estos fueron: funcionarios de las administraciones municipales, guías de campo, líderes y lideresas ambientales, presidentes de Juntas de Acción Comunal y Acueductos. Con ellos se realizaron jornadas de socialización del proyecto, se definieron rutas, se coordinaron fechas y opciones de acompañamiento.

En cada punto de agua se registró la información requerida en el Formulario Único Nacional para Aguas Subterráneas -FUNIAS del IDEAM-. En este se registran la información del usuario y del predio en el que se encuentra el punto de agua, su georreferenciación, las características y modo de acceso y uso del recurso, las condiciones de calidad del mismo según propiedades que se perciben con los sentidos: color, olor, sabor y algunas propiedades físicas medibles con equipos portátiles: conductividad eléctrica, temperatura, pH y Oxígeno disuelto.

Para efectos del inventario se realizaron más de 80 recorridos de campo y se visitaron más de 300 predios en los que se tenía referencias de la presencia de manifestaciones de aguas subterráneas

### **3.2.2 Correlación hidroestratigráfica: reconocimiento geomorfológico y pruebas geofísicas**

La correlación hidroestratigráfica es un método de análisis, que busca establecer correspondencia y continuidad de las formaciones geológicas, a partir de información puntual. Esa correspondencia se define a partir de rasgos composicionales, texturales y de posición.

Teniendo en cuenta la expresión en superficie de las unidades de roca está determinada por su naturaleza, los rasgos geomorfológicos constituyen un elemento clave para definir límites sobre un mapa geológico. Entre seis y ocho recorridos de campo por vías en las que era posible visualizar el paisaje en ambas vertientes del río Cauca, se llevaron a cabo para este proyecto.



La extensión y naturaleza de las distintas formaciones geológicas en profundidad se obtiene a partir de registro de perforaciones o mediante la práctica de pruebas indirectas, mediante las cuales se aplican las propiedades ondulatorias de la materia, como respuesta a diferentes estímulos para interpretar el comportamiento de las ondas al propagarse en el medio sólido. Para este estudio se contempló la realización de 46 pruebas geoeléctricas. Inicialmente se hace necesario realizar un reconocimiento de los sitios adecuados y con posibilidad de acceso para la toma de registros geofísicos y posteriormente se establece la agenda para llevarlas a cabo. Se identificaron más de 60 puntos adecuados para este propósito, se visitaron más de 40 para obtener autorizaciones de ingreso a predios particulares y se ejecutaron las 46 pruebas programadas; la exploración geofísica concluyó en el mes de abril de 2022.

### **3.2.3 Redes de monitoreo**

Además de la reivindicación o del rol que los actores sociales del territorio tienen en el proceso de recopilación de información para la exploración hidrogeológica, se reconoce la importancia de establecer un mecanismo para dar continuidad a la socialización e intercambio de información y conocimiento que nutra el devenir de las acciones que se tomen a partir de los resultados de la investigación; bajo esta óptica se conciben el diseño y puesta en marcha de una red de monitoreo social.

La red se conforma por voluntarios quienes, apropiados del sentir responsable de la naturaleza de las aguas subterráneas quieran efectuar un seguimiento periódico y permanente a un punto de agua registrando su comportamiento y variaciones. Esta red se consolida a partir de las labores del inventario y debe ser objeto de un acompañamiento hasta ganar su integración y autonomía.

Mediante comunicación con los nodos de la red se indaga sobre su interés en mantener participando del monitoreo, se recogen las mediciones realizadas y se motiva la permanencia con el proceso. Hasta el momento de cierre de este proyecto se había ganado integración y compromiso de continuidad en 10 puntos; en ellos se ha efectuado un proceso de instrumentación con el cual se motiva a los participantes a continuar siendo vigías del agua subterránea, a través de herramientas sencillas, pero esenciales.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

También el seguimiento mediante toma de muestras de agua es clave en este ejercicio de generación y validación del conocimiento hidrogeológico; así se pone en marcha una red de monitoreo hidrogeoquímico y de calidad y una red de monitoreo isotópico.

#### 4 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de influencia asociada al BsT en el suroeste de Antioquia, que considera flujos hidrológicos y las unidades hidrogeológicas priorizadas por su potencial acuífero, tiene una extensión de 1.926 km<sup>2</sup> y posee alturas que varían desde 500 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta 3.927 msnm (Figura 2).

El río Cauca es la principal arteria fluvial, ingresa desde el sur separando las cordilleras Central, al este, y Occidental, al oeste; sus principales tributarios por la margen izquierda son el río Cartama, el río Piedras, el río Mulatos y el río San Juan; y por la margen derecha vierten sus aguas el río Poblano, la quebrada Sinifaná y el río Amagá.

Teniendo en cuenta las características litoestructurales de las formaciones geológicas con porosidad y permeabilidad primaria, este estudio focaliza su atención en las áreas emplazadas sobre tres unidades hidrogeológicas priorizadas que son: i) Miembro Superior de la Formación Amagá, ii) Formación Combia y iii) depósitos aluviales del río Cauca y sus tributarios, desde Caramanta hasta Concordia.

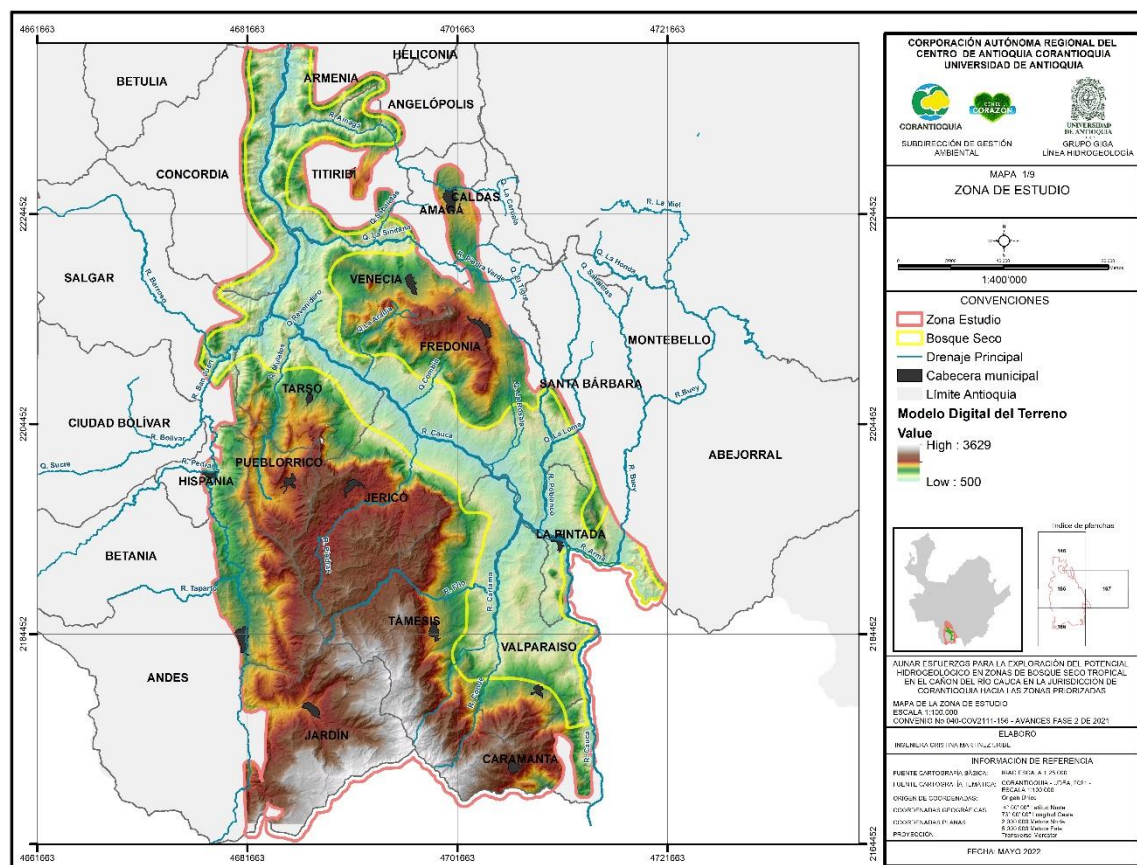


Figura 2. Localización de la zona de estudio.

Sobre ambas vertientes del río Cauca, en el fondo de su valle, se localiza el ecosistema del Bosque Seco que, de acuerdo con la hipótesis que soporta este estudio, basa su sostenibilidad en la ocurrencia de los sistemas de flujo subterráneo que tienen en él su zona de descarga y generarían ascensos que mantiene la humedad que el suelo de este bioma requiere. La zona de estudio está demarcada al sur y al sureste por el departamento de Caldas, al occidente por el río San Juan y la frontera del bosque seco y al nororiente por la superficie relacionada a la Formación Amagá y a la Formación Combia; todo esto dentro de los municipios: Amagá, Andes, Betania, Caramanta, Concordia, Fredonia, Hispania, Jardín, Jericó, La Pintada, Pueblorrico, Tamesis, Tarso, Titiribí, Valparaíso y Venecia. En la Tabla 1 se describe que porcentaje del área de cada municipio está incluida dentro de la zona de estudio.

Tabla 1. Municipios que hacen parte de la zona de estudio.

Municipio	Subregión	Casco urbano	Área total Mpio [ha]	Área Mpio en zona de estudio [ha]	% Área en ze vs. a total
Armenia	OCCIDENTE	NO	11,042	3.372	30,5%
Betania	SUROESTE	NO	17,937	847	4,7%
Salgar		NO	28,743	2.800	9,7%
Santa bárbara		NO	19,607	3.843	19,6%
Andes		SÍ	39,837	9.951	25,0%
Concordia		NO	24,789	7.556	30,5%

Municipio	Subregión	Casco urbano	Área total Mpio [ha]	Área Mpio en zona de estudio [ha]	% Área en ze vs. a total
Amagá		SÍ	8,412	3.186	37,9%
Hispania		SÍ	5,752	3.150	54,8%
Titiribí		SÍ	14,033	8.969	63,9%
Fredonia		SÍ	25,804	21.697	84,1%
Pueblorrico		SÍ	7,543	6.472	85,8%
Caramanta		SÍ	9,203	7.962	86,5%
Jardín		SÍ	19,965	18.184	91,1%
Venecia		SÍ	13963	13.436	96,2%
La Pintada		SÍ	5,428	5.419	99,8%
Valparaíso		SÍ	12,598	12.591	99,9%
Tarso		SÍ	12,046	12.047	100,0%
Jericó		SÍ	20,497	20.500	100,0%
Támesis		SÍ	25,216	25.220	100,0%

El conocimiento de las características socioeconómicas y la evaluación del estado y presión sobre el recurso hídrico de una región es fundamental en el marco de todo proyecto relacionado con el estado de un bien natural, ya que este permite relacionar sus potencialidades y prioridades estratégicas, identificar las posibilidades de gestionar de forma sostenible la naturaleza y resolver necesidades fundamentales y vitales como lo es, en este caso, el acceso y las posibilidades de contar con fuentes aptas para el abastecimiento de agua a través del posible potencial hidrogeológico. Es también fundamental reconocer cuales son los actores sociales que habitan el territorio; y para este caso particular reconocer la presencia de una zona potencial para albergar el BsT.

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA

Considerando además del porcentaje de área municipal que hace parte de la zona de estudio, se tendrán en cuenta para realizar la caracterización socioeconómica, la intersección con el polígono de Bosque Seco y con las unidades geológicas priorizadas. Por este, no se ahondará en información respecto a los municipios de Andes, Armenia, Betania, Concordia y Santa Bárbara.

En el entorno departamental, el Suroeste desempeña un rol importante como territorio que oferta un conjunto de bienes y servicios ambientales, y es eje articulador de los flujos generados por el corredor urbano industrial Cali – Medellín; punto de contacto para las conexiones nacionales al Pacífico y Atlántico (Caribe). Esta subregión representa uno de los territorios que más influyó en la formación y evolución del pueblo y sociedad antioqueña: sus condiciones naturales de vertientes semihúmedas, suelos ricos de origen volcánico y clima medio, se constituyeron en el ambiente biofísico que permitió el cultivo extensivo del café (Gobernación de Antioquia, 2015).

En la provincia del Cartama, en donde se reúnen 11 municipios (Caramanta, Valparaíso, La Pintada, Santa Bárbara, Montebello, Fredonia, Venecia, Tarso, Pueblorrico, Jericó y Támesis.), las principales actividades económicas son la agricultura - con cultivos principalmente de café, plátano y hortalizas- y la ganadería extensiva. En la zona de San Juan sobresale la agricultura con una expansión tecnificada del cultivo del café en asocio con el plátano, además de una ganadería extensiva y plantaciones forestales.

En la zona de Sinifaná, la minería del carbón es la actividad económica de mayor importancia, seguida del cultivo de café y cítricos, plantaciones forestales, la ganadería y la avicultura. (FAO & ADR, 2019). En general, el café es el cultivo de mayor representatividad en la subregión seguido por la ganadería. Es de resaltar, que en relación con la minería es la única subregión del departamento que tiene registros de producción de carbón, específicamente en los municipios de Amagá, Fredonia y Titiribí (FAO & ADR, 2019). En los últimos años, el Suroeste ha fortalecido su capacidad turística, actualmente se ubica como la tercera subregión en número de alojamientos del departamento (con un total de 255, aporta un 3,6%) (Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, 2019).

Este territorio también se ha visto permeado por la presencia de diferentes empresas que han dispuesto grandes proporciones de tierra utilizadas sobre todo para monocultivos como el aguacate y cítricos. También, sus habitantes han tenido algunos cambios en sus dinámicas con respecto al proyecto de la construcción de las 4G (o vías de cuarta generación) que buscan conectar a varias zonas del país que han tenido un atraso histórico en temas de movilidad.

Incorporando criterios sociales, geográficos y administrativos se busca describir y mostrar las características y diferencias que se encuentran en la zona de estudio, tanto en sus áreas rurales como cabeceras municipales. En la Tabla 2 se presentan los datos detallados de población y algunos índices -los más relevantes- que reflejan las condiciones de vida de la población.

En 2018 según información del DANE (Tabla 2), el 49,3% de la población de la subregión, se encontraba en las cabeceras urbanas, aproximadamente el 8,9% en centros poblados y el 41,8% en el sector rural.

Tabla 2. Caracterización sociodemográfica de la zona de estudio. DANE 2018-

Municipio	Área (km²)	Población censo 2018			Población proyectada a 2022			Densidad municipio (Hab/km²)	Proporción de personas en NBI (%)			Proporción de personas en miseria (%)			ÍNDICE de pobreza multidimensional (%)			Índice de calidad de vida			Cobertura servicio de acueducto (%) - Censo 2018			Cobertura servicio de agua potable (%) - Censo 2018			Cobertura servicio de alcantarillado (%) - Censo 2018		
		casco urb	Rural	Total	casco urb	Rural	Total		casco urb	Rural	Total	casco urb	Rural	Total	casco urb	Rural	Total	casco urb	Rural	Total	casco urb	Rural	Total	casco urb	Rural	Total	casco urb	Rural	Total
Amagá	84,1	14.184	16.043	30.227	16.452	15.807	32.259	377,6	7,8	11,4	9,7	0,6	1,3	0,9	8,0	11,8	10,0	70,2	69,2	69,7	99,0	92,4	95,6	99,0	0,0	48,4	98,3	87,5	92,7
Caramanta	92,1	2.190	2.553	4.743	2.385	2.408	4793	51,3	6,9	10,6	8,9	0,0	0,5	0,3	1,4	14,3	8,0	65,2	53,3	59,2	99,7	61,5	80,2	99,7	0,0	49,2	96,9	45,6	70,6
Fredonia	258,1	8.031	16.377	24.408	9.287	16.239	25.526	97,4	9,2	12,2	11,0	1,2	0,9	1,0	3,9	15,5	11,5	70,5	67,2	68,4	97,5	72,3	82,6	97,5	13,8	42,7	96,2	27,7	55,8
Hispania	57,5	3.416	2.053	5.469	3.837	1.928	5765	98,7	8,7	18,8	12,1	1,2	2,1	1,5	5,4	37,5	15,3	66,7	56,2	63,5	99,0	21,8	76,6	99,0	0,0	69,1	98,3	1,8	70,3
Jardín	201,2	7.659	6.859	14.518	8.613	6.680	15.293	74,9	5,4	14,3	9,6	0,5	2,3	1,4	10,3	14,4	12,1	70,00	63,43	67,21	99,7	56,1	81,2	99,7	0,0	57,5	98,9	3,4	58,3
Jericó	205,0	7.619	6.021	13.640	8.448	5.685	14.133	67,9	7,4	11,3	8,9	0,3	1,4	0,7	4,7	20,4	10,7	66,4	60,8	64,2	99,2	63,4	86,8	99,2	6,4	63,6	98,8	13,9	69,4
La Pintada	54,3	7.060	1.054	8.114	7.889	837	8.726	158,2	11,6	15,6	12,1	1,6	2,5	1,7	16,6	28,8	18,0	64,6	64,4	64,6	98,3	72,6	95,5	98,3	0,0	87,2	77,7	17,8	71,0
Pueblorrico	75,4	4.450	4.214	8.664	4.995	4.012	9.007	117,6	13,0	18,9	15,8	1,7	2,7	2,2	5,9	38,2	19,8	65,8	55,4	61,4	95,8	16,3	62,1	95,8	0,0	54,4	90,7	2,5	53,4
Támesis	252,2	7.256	9.025	16.281	8.203	8.503	16.706	65,2	8,8	15,3	12,3	0,8	2,0	1,4	8,1	24,1	16,5	65,4	62,5	63,9	97,0	68,7	82,4	97,0	66,5	81,0	94,7	28,7	60,6
Tarso	120,5	3.324	2.860	6.184	3.734	2.691	6.425	52,5	12,9	20,3	16,1	0,7	2,6	1,5	9,7	23,6	15,6	64,8	59,4	62,5	99,1	12,3	63,4	99,1	4,4	58,1	98,8	7,2	61,1
Titiribí	140,3	4.591	6.184	10.775	5.354	5.699	11.053	77,6	10,3	12,0	11,2	1,0	0,3	0,6	6,6	7,8	7,2	68,5	66,1	67,2	99,4	78,2	88,7	99,4	0,0	46,4	98,6	69,6	84,0
Valparaíso	126,2	3.639	2.859	6.498	4.025	2.649	6.674	52,1	5,6	13,4	8,8	0,6	0,9	0,7	4,7	19,0	10,1	65,7	60,6	63,8	97,9	77,9	90,1	97,9	0,0	59,8	96,6	35,2	72,7
Venecia	139,7	5.089	6.513	11.602	5.808	6.272	12.080	85,2	6,6	11,8	9,4	0,2	0,9	0,5	10,6	12,0	11,4	68,4	65,7	67,0	99,5	84,3	91,6	99,5	80,0	89,2	94,3	68,9	81,0

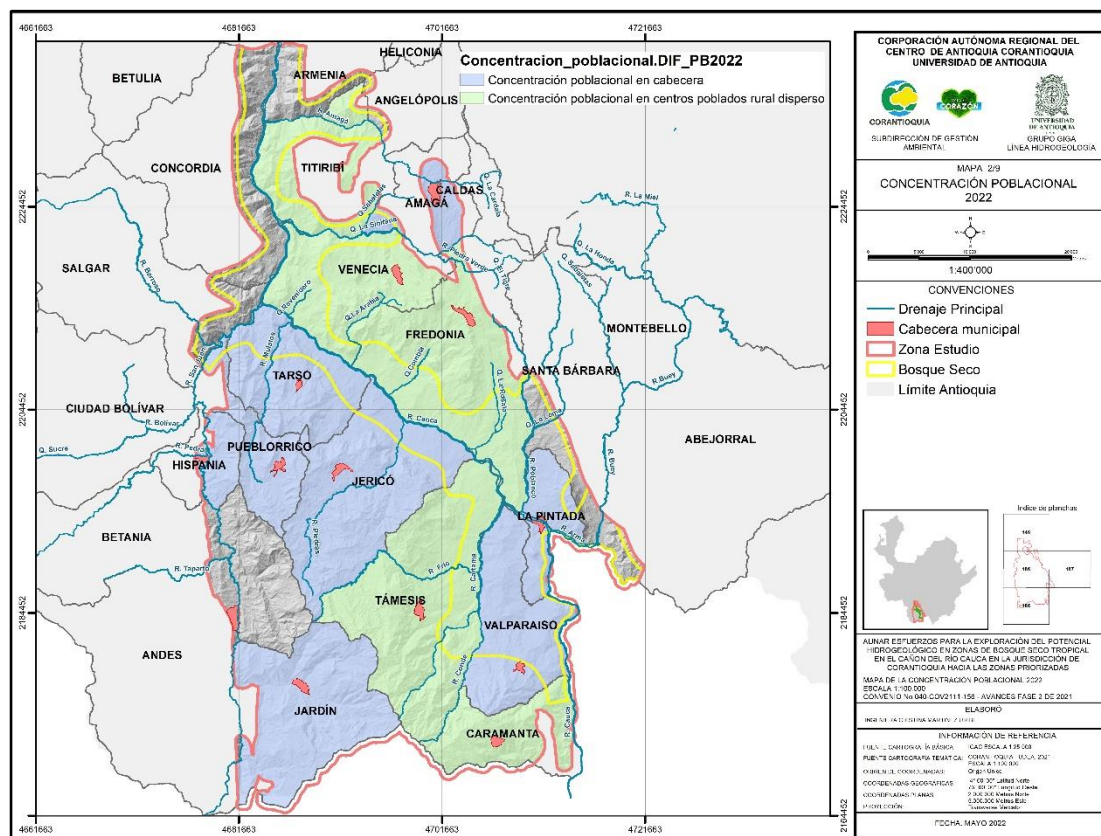
Según los datos y proyecciones del Censo Nacional de Población y Vivienda realizado por el DANE en el año 2018, en la zona de estudio vivían cerca de 161.123 habitantes, por otro lado, según la proyección realizada para el año 2022 vivirían 168.440 habitantes (Tabla 2).

En la Figura 3 se observa la distribución poblacional total de cada municipio de interés, en donde se presenta un contraste de aquella que habita en las cabeceras municipales y la que vive en centros poblados o rural disperso. Los municipios con mayor población proyectada en la cabecera municipal a 2022 en relación a la población al año 2018 son Amagá (31.768) y Fredonia (25.138), con un crecimiento de 2.268 y 1.256, respectivamente. Esto puede relacionar con el cambio de las dinámicas rurales, la tenencia de tierras concentrada en pocas personas, precios elevados en los insumos agrícolas, conflictos internos y externos y desastres naturales que obligan desplazamientos forzados.



**Figura 3. Distribución poblacional por sectores, según proyección del DANE al año 2022.**

Como complemento a esta información, se presenta en la Figura 4, en color verde claro los municipios en los que se concentra una mayor población en zonas rurales, respecto a la población que se encuentra en cabecera municipal, y, por el contrario, en color azul claro aquellos en los que se concentra una mayor población en cabecera, respecto a zonas rurales.



**Figura 4. Concentración poblacional al año 2022.**

En relación con la población perteneciente a grupos étnicos, al año 2018, ascendía a 2.143 personas y se localizaban principalmente en los municipios de Jardín, Valparaíso, Pueblorrico y Tamesis (Gobernación de Antioquia, 2019) (Tabla 3).

**Tabla 3. Población perteneciente a grupos étnicos. Gobernación de Antioquia 2019.**

Municipios	Población indígena	Población gitano / rrom	Población raizal del ARCHIPIÉLAGO de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	Población Palenquero(a) de San Basilio	POBLACIÓN Negro(a), Mulato(a), Afrodescendiente, Afrocolombiano(a)	Población ningún grupo étnico
Amagá	9	2	0	3	125	26.474
Caramanta	1	0	0	0	15	4.233
Fredonia	15	0	1	1	157	18.512
Hispania	11	0	0	0	39	4.881
Jardín	1.475	0	0	0	67	11.878
Jericó	2	0	0	0	24	10.959
La Pintada	9	0	0	0	87	7.837
Pueblorrico	167	0	0	0	29	6.972
Tamesis	156	0	0	2	76	14.476
Tarso	0	0	1	0	17	5.592
Titiribí	2	0	0	0	28	8.110
Valparaíso	288	0	0	0	15	5.099
Venecia	8	0	0	0	43	10.127

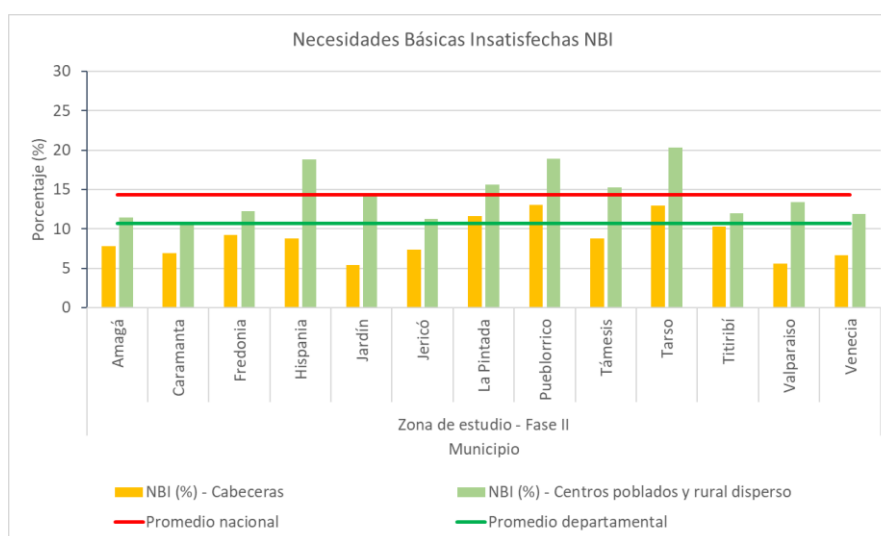
La calidad de vida en los municipios de interés puede evaluarse mediante indicadores que dan cuenta la situación de la población: Necesidades Básicas Insatisfechas NBI, el índice de pobreza multidimensional y la proporción de personas que viven bajo condiciones de pobreza y/o miseria. Estos tres indicadores se presentan mediante

porcentajes de población que padece cada circunstancia; mientras mayor sea ese número más desfavorable es la calidad de vida en el municipio. El indicador NBI busca determinar si las necesidades básicas de la población se encuentran cubiertas, mediante información acerca de viviendas y servicios inadecuados, hacinamiento, factores económicos y acceso a la educación. El índice de pobreza multidimensional identifica el número de carencias que experimenta un hogar, en los ámbitos de salud, educación y nivel de vida. El valor de proporción de personas en condición de miseria caracteriza la pobreza mediante la cantidad de necesidades básicas insatisfechas, en donde se presentan condiciones de pobreza cuando existe al menos una de las cinco y miseria cuando están presentes dos o más.

Según datos de la encuesta realizada por el DANE en el año 2018, los valores promedio nacional y departamental de Antioquia serían: 14,3% y 10,7% respectivamente para el NBI, 19,6% y 17,1% en el índice de Pobreza Multidimensional y 3,7% y 2,5% la proporción de personas en condición de miseria.

En las siguientes gráficas se presenta el valor de estos índices para cada municipio. Se muestra el valor del indicador haciendo distinción entre la cabecera municipal (color amarillo) y zonas rurales (color verde).

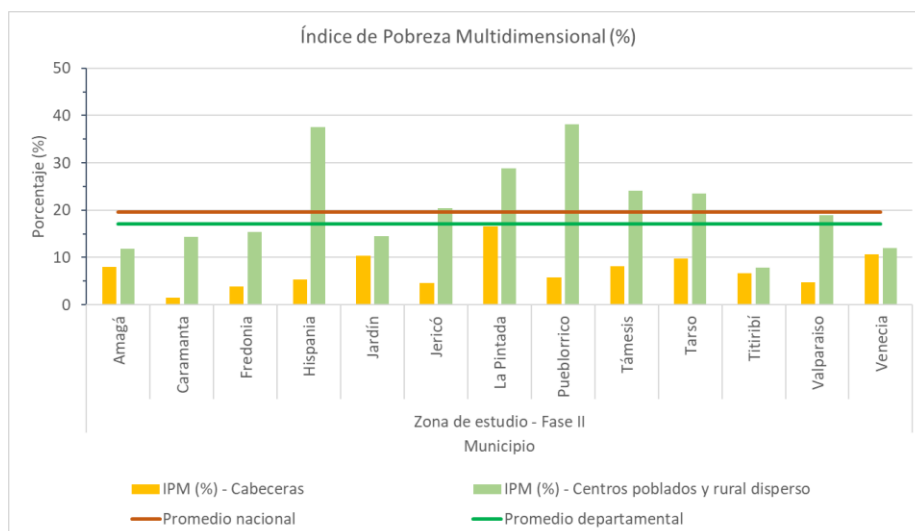
En la Figura 5 se aprecia la brecha entre los valores que caracterizan el casco urbano a las condiciones bajo las cuales se encuentra la población que reside en zonas rurales. Se encuentra que según el valor de NBI en la ruralidad, el municipio de Pueblorrico sobrepasa el promedio nacional, seguido de Tarso y La Pintada, es decir, que son los municipios peores posicionados frente a cómo las necesidades básicas de la población se encuentran cubiertas. Caso diferente sucede en las cabeceras de estos mismos municipios que, aunque sigue siendo alto, solo sobrepasan el promedio departamental encabezado por el municipio de Tarso con un valor máximo del 21%.



**Figura 5. Necesidades Básicas Insatisfechas NBI.**

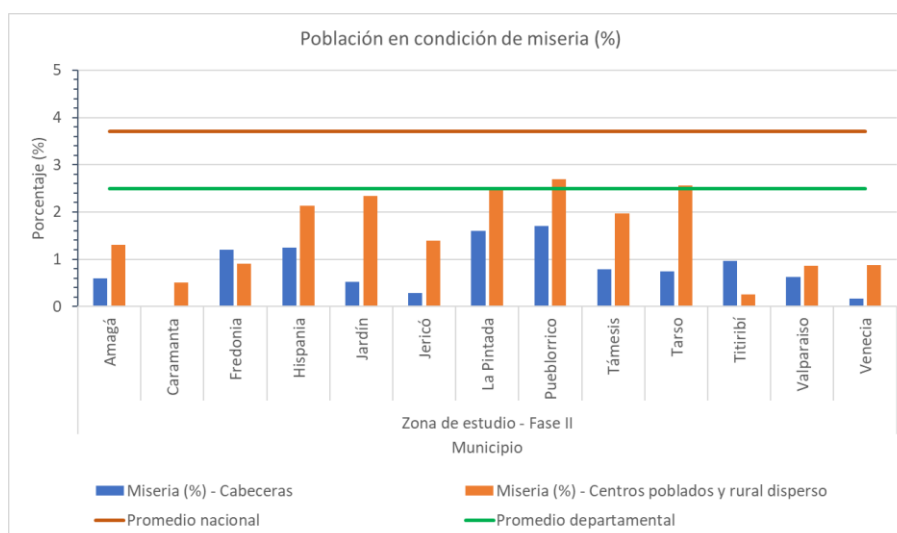
Respecto al Índice de Pobreza Multidimensional (Figura 6), se encuentran cinco municipios que en su ruralidad sobrepasan el promedio departamental y nacional como son Pueblorrico, Hispania, La Pintada, Tarso y Támesis. Mientras tanto, los porcentajes en la cabecera son proporcionalmente minoritarios. Es decir, se aprecia una gran brecha

entre los valores que caracterizan las zonas rurales a aquellos que corresponden a las cabeceras municipales, por lo que los centros poblados y rurales dispersos se encuentran en un estado de vulnerabilidad más evidente.



**Figura 6. Índice de Pobreza Multidimensional.**

En general, en las cabeceras municipales la población en condición de miseria (Figura 7) no excede el promedio departamental, situación diferente para las zonas rurales en los municipios Pueblorrico, Tarso, La Pintada y Jardín que están cerca o sobrepasan el promedio departamental. Es preciso resaltar que en la ruralidad los valores que toman estos indicadores pueden hasta duplicar el valor que caracteriza el promedio en las cabeceras municipales.

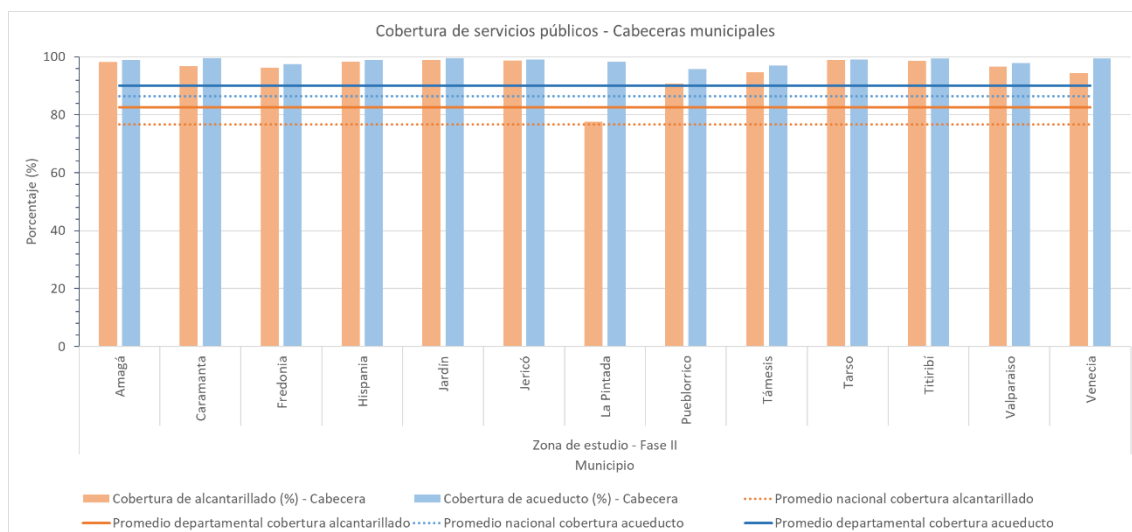


**Figura 7. Población en condición de miseria.**

Otro factor relevante dentro de la caracterización de la zona de estudio, y de especial importancia para este estudio, está relacionado con el estado de cumplimiento del derecho constitucional al acceso a agua y otros servicios públicos por parte de la población.

Según las cifras oficiales, en relación con el servicio de acueducto existe una cobertura nacional de 86,4% y una cobertura departamental de 90,1% (97,8% en las cabeceras municipales y 60,6% en centros poblados y zonas rurales). El Índice de Cobertura Viviendas con Agua Potable (CVAP) corresponde al porcentaje de viviendas que cuentan con el servicio de agua potable, el cual se categoriza de la siguiente manera: 0 - 50% Muy Bajo; 50,1-75%; Bajo; 75,1-90 % Medio; 90 - 100% Alto (Planilla Agua Potable Antioquia 2021, Secretaria Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia). Para el alcantarillado se registran una cobertura nacional de 76,6% y una cobertura departamental de 82,6% (93,1% en las cabeceras municipales y 27,9% en centros poblados y zonas rurales).

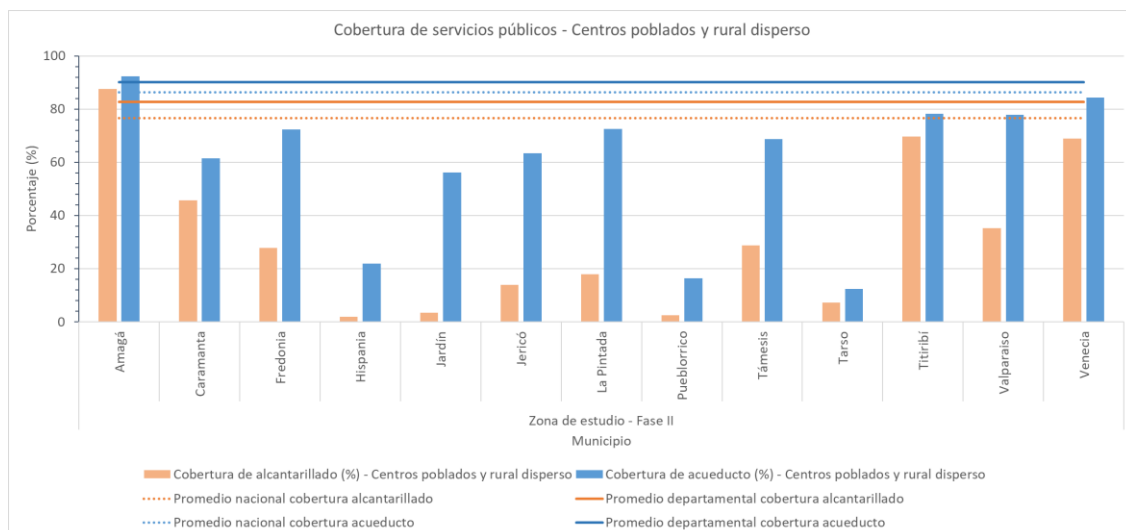
En la Tabla 2 se registran, por municipio, los rangos de cobertura de los servicios de acueducto, alcantarillado y acceso a agua potable en zonas urbana y rural de los municipios de interés. Los municipios con menor cobertura de acueducto (Figura 8), sin o limitado acceso al recurso hídrico en cabeceras municipales, son La Pintada, Pueblorrico, Támesis y Venecia. En la cobertura de alcantarillado, que, si bien superan el promedio nacional y departamental, se presenta más vulnerabilidad en La Pintada con 77,7%, Pueblorrico con 90,7%, Venecia con 94,3% y Támesis con un 94,4%.



**Figura 8. Cobertura de servicios públicos alcantarillado y acueducto en cabeceras municipales.**

En los centros poblados y para la población rural dispersa (Figura 9) las condiciones de cobertura de los servicios públicos alcantarillado y acueducto es, francamente, precaria. Los municipios más vulnerables por su falta de acceso al servicio de alcantarillado en corregimientos y veredas son Hispania con el 1,8%, Pueblorrico con el 2,5%. Jardín con el 3,4% y Tarso con el 7,2%. Por su parte, en la cobertura de acueducto se encuentran unas diferencias muy marcadas entre un municipio y otro como es el caso de Amagá que tiene un porcentaje de cobertura de un 92,4% con respecto a Tarso con un 12,3%.

Un punto importante para mencionar es que en los municipios donde hay acueducto no necesariamente se garantiza el acceso a agua potable. Como se observa en la Figura 9, el umbral o el servicio de acueducto en las zonas rurales está muy por debajo del promedio nacional y departamental, muy diferente a cómo se presenta la situación en cabecera propuesta en la Figura 8.



**Figura 9. Cobertura de servicios públicos alcantarillado y acueducto en centros poblados y rural disperso.**

Respecto al alcantarillado, hay municipios que no llegan a un 10% de cobertura, por lo que gran parte de la zona de estudio presenta un déficit en este aspecto.

## 4.2 ESTADO Y PRESIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

Teniendo en cuenta el panorama presentado en términos de cobertura en servicios públicos en lo que respecta en acueducto y alcantarillado, la información presentada denota una presión muy fuerte hacia el recurso hídrico que también se hace evidente durante los recorridos de campo dados en la ejecución de este proyecto y que pueden estar asociados al uso de agua subterránea; a la tenencia de manantiales, a los conflictos por el uso del agua y del suelo, de la preocupación de la población por su cuidado y su gestión frente a diferentes realidades ambientales dadas en el territorio.

Con el fin de analizar mejor esta realidad, se mencionan a continuación diversos índices que permiten conocer el estado del recurso hídrico superficial, desde la oferta y presiones antrópicas a factores que puedan desencadenar desabastecimiento de agua en las poblaciones.

### 4.2.1 Oferta del recurso hídrico superficial y presiones antrópicas sobre el recurso hídrico

Para la descripción del estado del recurso hídrico superficial se utilizan los indicadores desarrollados en el Estudio Nacional del Agua (ENA) 2018, publicado por el IDEAM en 2019, donde la oferta natural se define a partir de los Índices de Regulación Hídrica (IRH) y Aridez (IA). El primero tiene como objetivo estimar la capacidad de la cuenca de mantener los regímenes de caudales y mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación (MADS, 2014). El Índice de Aridez estima la suficiencia o insuficiencia de precipitación para sostenimiento de ecosistemas. Se define como una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los

ecosistemas de una región. Identifica áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial (MADS, 2014).

Las presiones que se ejercen sobre el recurso hídrico superficial a través de las diferentes intervenciones antrópicas se determinan a través de los índices de Uso de Agua Superficial (IUA) y Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL). El IUA estima la relación porcentual entre la demanda de agua con respecto a la oferta hídrica disponible. El IACAL evalúa la afectación al cuerpo de agua por las presiones de actividades socioeconómicas. En la Tabla 4 se presentan los valores reportados para los diferentes índices mencionados en la zona de estudio.

**Tabla 4. Condición de los índices de estado y presión sobre el recurso hídrico superficial en municipios pertenecientes a la zona de estudio.**

Municipio	Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)	Índice de Áridez (IA)	Índice de uso del agua (IUA)		Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL)	
			Condición hidrológica normal	Condición hidrológica seca	Normal	Seco
Amagá	Alta	Altos excedentes de agua	Bajo	Alto	Alta	Alta
Caramanta	Alta	Altos excedentes de agua	Muy alto	Muy alto	Moderada	Moderada
Fredonia	Moderada	Altos excedentes de agua	Bajo	Moderado	Media alta	Media alta
Hispania	Alta	Altos excedentes de agua	Alto	Muy alto	Alta	Muy alta
Jardín	Alta	Altos excedentes de agua	Alto	Muy alto	Alta	Muy alta
Jericó	Alta	Altos excedentes de agua	Muy alto	Muy alto	Moderada	Moderada
La Pintada	Alta	Altos excedentes de agua	Muy alto	Muy alto	Moderada	Moderada
Pueblorrico	Alta	Altos excedentes de agua	Muy alto	Muy alto	Moderada	Moderada
Támesis	Alta	Altos excedentes de agua	Muy alto	Muy alto	Moderada	Moderada
Tarso	Alta	Altos excedentes de agua	Muy alto	Muy alto	Moderada	Moderada
Titiribí	Moderada	Altos excedentes de agua	Bajo	Moderado	Media alta	Media alta
Valparaíso	Alta	Altos excedentes de agua	Muy alto	Muy alto	Moderada	Moderada
Venecia	Moderada	Altos excedentes de agua	Bajo	Moderado	Media alta	Media alta

< 0,5 Muy baja	> 0,5 Altamente deficitario de agua	> 50,0 Muy alto	4,5-5,0 Muy alta
0,5-0,65 Baja	0,5-0,59 Deficitario de agua	20,01-50,0 Alto	3,5-4,5 Alta
0,65-0,75 Moderada	0,40-0,49 Moderado a deficitario de agua	10,01-20,0 Moderado	2,5-3,5 Media alta
0,75-0,85 Alta	0,30-0,39 Moderado	1,0-10,0 Bajo	1,5-2,5 Moderada
> 0,85 Muy alta	0,20-0,29 Moderado a excedentes de agua	<= 0,1 Muy bajo	1,0-1,5 Baja
	0,15-0,19 Excedentes de agua		
	< 0,15 Altos excedentes de agua		

Fuente: ENA, 2018, Síntesis (Betancur, 2021)

Respecto a la oferta de recurso hídrico superficial, según los resultados presentados en la Tabla 4, el IA para el Suroeste muestra que hay un alto excedente de agua. El IRH varía de alto a moderado, siendo alto en la mayor parte de los municipios de interés que conforman la subregión, exceptuando los municipios de Fredonia, Titiribí y Venecia. En

síntesis, según el ENA 2018, en los municipios que se encuentran en la zona de estudio, su sistema hídrico presenta una alta capacidad de mantener los regímenes de caudales.

En la síntesis realizada por Betancur, 2021 se encuentra que, según el IUA estimado en el ENA 2018, la presión antrópica sobre oferta hídrica superficial en el Suroeste varía de baja a muy alto en el año medio o condiciones hidrológicas normales, siendo baja en los municipios de Amagá, Fredonia, Titiribí y Venecia. Para el año seco, el IUA se incrementa pasando de bajo a moderado, y de alto a muy alto. Según el Estudio Regional del Agua realizado por Corantioquia en 2016, las subzonas hidrográficas nivel 1, donde se localizan las cuencas abastecedoras de los acueductos de las cabeceras municipales de los municipios de: Caramanta, Jericó, La Pintada, Pueblorrico, Támesis, Tarso y Valparaíso presentan un IUA muy alto para los dos periodos hidrológicos evaluados, seco y medio, indicando una fuerte presión sobre la oferta hídrica debido a la alta demanda sobre la misma.




El IACAL obtenido en el ENA 2018, para el periodo hidrológico medio, en la subregión del Suroeste presenta niveles de alteración moderados a altos. Estos valores se incrementan para el año seco en los municipios de Hispania y Jardín, pasando al siguiente nivel de muy alto, mientras que en el municipio de Amagá se mantiene alta. Se aprecia que para ningún municipio el valor obtenido es bajo. Esto indica que existe, en términos generales, una presión de moderada a muy alta sobre la calidad del recurso hídrico superficial debido a las actividades socioeconómicas, siendo los municipios de Amagá, Fredonia, Hispania, Jardín, Titiribí y Venecia los que presentan una mayor presión.

#### **4.2.2 Riesgo al desabastecimiento de agua**

El riesgo al desabastecimiento por oferta y calidad del recurso hídrico se mide mediante los siguientes índices: i) Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) que se define como el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener la oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas como periodos largos de estiaje o eventos como El Niño (MADS, 2014); ii) Índice Riesgo Calidad del Agua Potable (IRCA), que representa el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano; iii) Índice de Riesgo Municipal por Abastecimiento de Agua para Consumo Humano (IRABA) que es la ponderación de los factores de tratamiento y continuidad del servicio de los sistemas de acueducto, y distribución del agua en el área de jurisdicción del municipio correspondiente, que pueden afectar indirectamente la calidad del agua para consumo humano y, por ende, la salud humana.

La gobernación de Antioquia registra, en términos de calidad, el Índice de Buenas Prácticas Sanitarias (BPS) y el Índice de Certificación Sanitaria Municipal en Agua Potable (CSM); el BPS acredita el cumplimiento de los principios básicos y prácticas operativas generales de higiene para el suministro y distribución del agua para consumo humano, su categorización es de: 0-10 % sin riesgo; 11 - 24 % bajo; 25 - 40 % medio; 41 - 70 % alto; 71-100 % muy alto. El CSM acredita el cumplimiento de las normas y criterios de la calidad del agua para consumo humano, soportado en el concepto sanitario de las personas prestadoras del servicio público de acueducto dentro de los límites del municipio. Su categorización es: 0 - 10 % favorable; 10,1 - 40 % favorable con requerimientos; 40,1 -100 % desfavorable.

En la Tabla 5 se presentan los valores para los índices mencionados.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	  <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

**Tabla 5. Valores reportados de IVH, IRCA, IRABA, BPS y CSM por la Gobernación de Antioquia en municipios pertenecientes a la zona de estudio.**

Municipio	Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH)		Índice Riesgo Calidad del Agua Potable (IRCA)		Índice Riesgo Calidad de Abastecimiento Municipal (IRABA)		Índice de Buenas Prácticas Sanitarias (BPS)		Certificación Sanitaria Municipal en Agua Potable (CSM)	
	Condición hidrológica media	Condición hidrológica seca	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
Amagá	Baja	Media	1,6	31,4	32,2	27,3	16,0	41,8	12,1	33,7
Caramanta	Media	Media	0,0	88,2	26,0	71,1	5,0	89,4	6,7	85,1
Fredonia	Baja	Media	0,0	47,2	23,4	51,1	1,0	56,4	5,0	50,8
Hispania	Media	Media	0,3	89,5	28,0	63,5	24,0	65,4	12,9	77,1
Jardín	Media	Media	0,7	25,4	15,5	49,0	0,0	42,7	3,5	35,3
Jericó	Media	Media	4,0	68,5	23,8	64,9	6,0	62,5	8,6	66,0
La Pintada	Media	Media	1,6	SD	21,7	SD	21,7	SD	11,7	SD
Pueblorrico	Media	Media	1,6	97,4	28,6	82,9	12,0	88,4	10,1	91,8
Támesis	Media	Media	2,3	51,1	32,6	55,6	37,7	55,9	19,0	53,5
Tarso	Media	Media	0,0	36,7	18,2	44,9	10,0	37,4	6,6	38,6
Titiribí	Baja	Media	0,0	88,3	20,6	64,2	2,6	72,1	4,9	78,6
Valparaíso	Media	Media	0,9	94,7	24,4	67,4	5,0	80,1	6,8	84,9
Venecia	Baja	Media	3,0	16,9	20,0	31,7	0,0	36,8	5,5	25,8

Muy alta	80,1-100 Inviabile sanitariamente	70,1-100 Muy alto	71-100 Muy alto	40,1-100 Desfavorable
Alta	35,1-80 Alto	40,1-70 Alto	41-70 Alto	10,1-40 Favorable con requerimientos
Media	14,5-35 Medio	25,1-40 Medio	25-40 Medio	0-10 Favorable
Baja	5,1-14 Bajo	10,1-25 Bajo	11-24 Bajo	
Muy baja	0-5 Sin riesgo	0-10 Sin riesgo	0-10 Sin riesgo	

Fuente: Planilla Agua Potable Antioquia 2021. Secretaria Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. (Betancur, 2021).

Los resultados del IVH muestra, en términos generales, una fragilidad del sistema hídrico para mantener la oferta de agua de grado medio, tanto en condiciones hidrológicas media y seca.

Según los resultados obtenidos para Índice Riesgo Calidad del Agua Potable (IRCA), que presenta la Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia en la Planilla Agua Potable Antioquia del año 2021 (Tabla 5), los municipios de: Caramanta, Hispania, Pueblorrico, Titiribí y Valparaíso son inviables sanitariamente por la calidad de las aguas que abastecen a su población rural; Fredonia, Jericó, Támesis y Tarso presentan un riesgo alto, y el resto de municipios presentan un riesgo medio. Por su parte, las cabeceras municipales no presentan riesgo.

Similarmente, en el sector rural de los municipios, el Índice Riesgo de Abastecimiento Municipal (IRABA) es mayor, principalmente en Caramanta y Pueblorrico, en donde también se presentan los mayores valores correspondientes al índice IRCA. Para las cabeceras municipales el riesgo varía de bajo a medio.

De la Tabla 5 se puede concluir que se ha avanzado en asegurar el acceso a agua potable de la población asentada en zonas urbanas. Por otra parte, el regular estado y funcionamiento de varios de los componentes de los sistemas de acueductos rurales, que presentan los municipios de Caramanta, Pueblorrico, Titiribí y Valparaíso, ponen en riesgo el abastecimiento de agua su población. En el análisis de los valores correspondientes a los índices BPS y CSM se aprecia que en estas zonas existe una carencia marcada respecto a la infraestructura básica para garantizar el acceso al recurso hídrico.

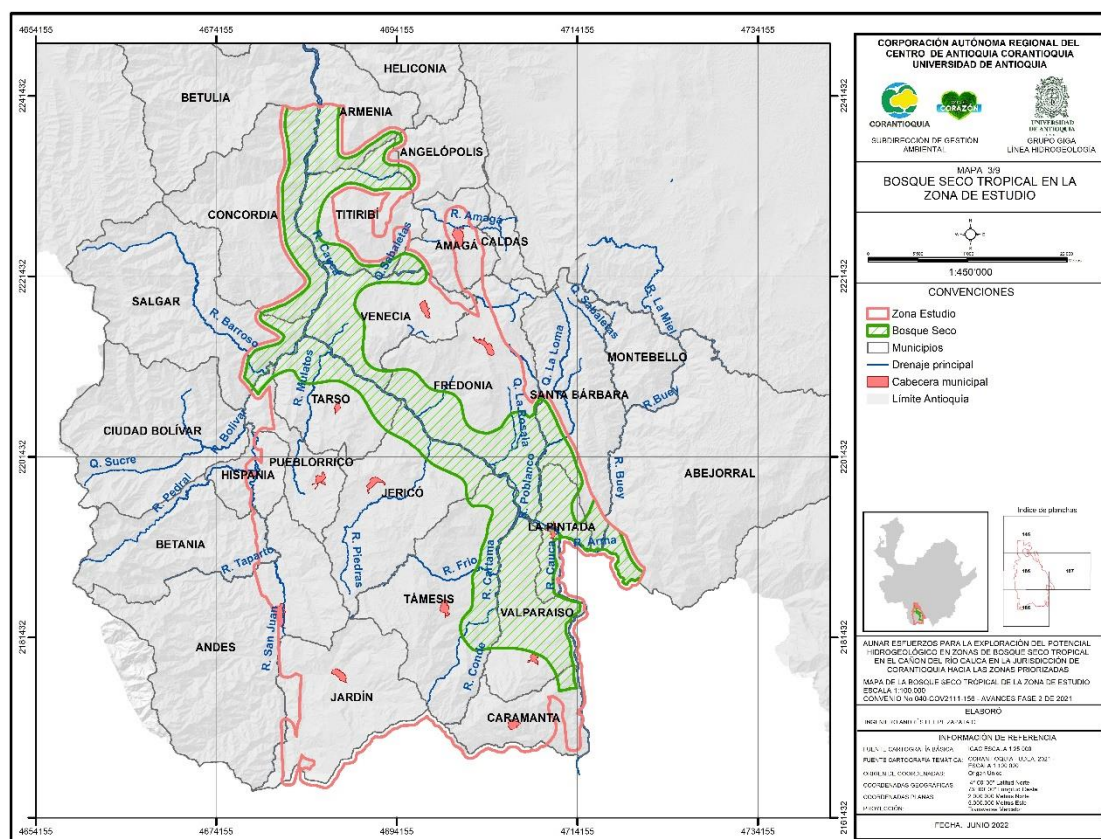
Para concluir, teniendo en cuenta la caracterización socioeconómica, el estado y la presión sobre el recurso hídrico superficial se puede establecer que los municipios Caramanta, Hispania, Pueblorrico, Tarso y Valparaíso, son aquellos que presentan mayores afectaciones socioeconómicas, esto sumado a carencias en la prestación de servicios públicos básicos, con una diferencia marcada hacia los sectores rurales. En estos municipios también se conjugan factores derivados de actividades económicas que se traducen en presión sobre el recurso hídrico, en donde su oferta no cumple en muchos casos con los índices de calidad mínimos para consumo humano. Por otro lado, los municipios de Fredonia, Jardín, Jericó, La Pintada y Támesis presentan los más altos índices de uso del agua, por economías fuertemente ligadas a la agricultura o el turismo, actividades altamente demandantes de recurso hídrico. Evidenciado en recorridos de campo, en el municipio de Venecia se aprecia una situación similar, en donde la demanda de agua se ha ido acrecentando debido a la aparición de nuevas parcelaciones que requieren el suministro del recurso.

#### 4.3 BOSQUE SECO TRÓPICAL -BST

Partiendo de la delimitación del BsT realizada por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humbolt (2014), se puede establecer para la zona de estudio la relación de las coberturas potenciales y las que persistían en 2014, tal como se indica en la Tabla 6 y en la Figura 10. Es importante determinar de estas áreas que porcentaje corresponde a Bosque Seco y cuanto a estado sucesional. Según estas cifras el municipio con mayor cobertura era Venecia, con más de 2.000 Ha; seguido de Tarso, Titiribí, Armenia y Concordia con más de 1.000 HA en cada uno; Pueblo Rico y Amagá contaban ya entonces con menos de 500 HA y en Caramanta había desaparecido.

**Tabla 6. Área total por municipio de las coberturas potenciales y análisis de coberturas en el año 2014 de bosque seco tropical. Fuente: IAvH, 2014.**

Municipio	Área por municipio de las coberturas potenciales (Ha)	Áreas por municipio al año 2014 (Ha)
Venecia	5.696,33	2.176,10
Tarso	4.642,18	1.577,50
Titiribí	3.951,59	1.422,94
Armenia	5.046,71	1.369,14
Concordia	5.784,37	1.216,50
Valparaíso	7.981,37	949,77
Jericó	4.756,43	946,54
Fredonia	9.578,64	922,95
La Pintada	4.771,88	873,82
Támesis	5.322,61	689,55
Santa Bárbara	4.005,54	620,72
Pueblo Rico	746,70	455,50
Amaga	516,08	117,90
Caramanta	798,65	No Registra



**Figura 10. Bosque seco tropical en la zona de estudio.**

La problemática que deriva en este enorme impacto está mediada por diversos conflictos asociados al uso del suelo; ello se traduce en un alto riesgo de desertificación. Las principales circunstancias que marcan esta vulnerabilidad son: la construcción y operación del corredor del sistema nacional de conectividad vial denominado Pacífico I, II y III paralelo al cauce por dónde discurre el Río Cauca en sentido noroeste se encuentra; presiones económicas, comerciales e inmobiliarias que elevan cada vez más los precios del suelo, pero que no por eso disminuyen las rápidas e intensivas transformaciones urbanas y ambientales. Adicionalmente, y luego de surtir los

recorridos de campo acompañados y guiados por actores sociales de la zona de estudio, se encuentra en su relato y vivencia del territorio condiciones importantes que asentúan la amenaza sobre este ecosistema: la incursión de proyectos mineros a gran escala, el monocultivo agrícola, la presión al recurso hídrico y al patrimonio ambiental por el turismo intensivo y las alteraciones en el orden público.

El agua es uno de los principales factores que determinan la restauración ecológica de los BsT, de esta forma su escasez limita el crecimiento, la productividad y el ciclaje de materia orgánica (Fajardo, 2013, citado en Pizano y García, 2014). Por eso uno de los principales objetivos en la restauración de estos ecosistemas es hacer esfuerzos para contrarrestar el déficit hídrico principalmente en los periodos de estiaje, para ello es necesario comprender la dinámica de los flujos regionales del agua subterránea, ya que ellos pueden determinar el sostenimiento de las condiciones de humedad en las zonas de tránsito o descarga.



#### 4.4 ACTORES SOCIALES EN LA ZONA

A partir del recorrido por las condiciones socioeconómicas y ambientales de la zona de estudio, relatadas en los numerales anteriores, se encuentra un componente fundamental y es el relacionamiento en campo con actores clave, visto como un ejercicio destacado a lo largo de este proyecto. La interacción con la población, directamente en el territorio, que usa de una u otra forma el agua y que accede a ella a partir de algún punto de agua subterránea, es determinante a la hora de analizar cómo las realidades sociales, económicas, ambientales y de condiciones de vida, tienen que ver con su percepción o idea del agua y, a partir de esto, conocer la disposición que hacen de ella para sostener lo esencial: la vida.

Frente al panorama de escases y de contaminación de aguas superficiales, los ojos están puestos sobre el conocimiento, uso y protección del agua subterránea como un bien natural, estratégico para satisfacer las necesidades emergentes en estas realidades territoriales. Así, quienes necesitan y deben cuidar los acuíferos son principalmente: propietarios de fincas cafeteras, agrícolas o pecuarias que dentro de sus actividades productivas hacen uso del agua de sus nacimientos, pozos o aljibes para sus procesos productivos; comunidades de veredas o centros poblados, cuyo uso del agua subterránea a partir de manantiales o aljibes funciona para abastecimiento público y uso doméstico y que son operadas por Juntas Administradoras de Acueductos con Juntas de Acción Comunal. En ese orden de ideas, aparecen también las empresas de servicios públicos, las cuales resultan actores importantes en el cuidado y conocimiento de los acuíferos.

En lo que respecta a los procesos de gestión y defensa del agua como elemento estructurador del paisaje, los ecosistemas y la vida en todas sus formas, los actores llamados a establecer mecanismos de conocimiento y estrategias de sostenibilidad son las autoridades locales, y las autoridades ambientales, quienes, en clave de participación con la sociedad civil, buscan adelantar en todo caso, estrategias que propendan por la conservación y conocimiento del potencial hídrico de su localidad.

También, han sido las comunidades organizadas, líderes y líderes ambientales quienes han convocado, al margen de la institucionalidad y apelando a procesos de gobernanza, a la defensa y cuidado del agua como sustento básico de la vida en sus comunidades y defenderla ante las amenazas y la vulnerabilidad de actividades

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

económicas extractivistas. Así, representan también actores importantes en el entramado poblacional que usa y cuida el agua subterránea.

## 5 GEOLOGÍA

Los materiales que subyacen el suelo y que representan los niveles superiores de la litósfera constituyen el posible reservorio de agua subterránea, según sus condiciones de porosidad y permeabilidad, primaria o adquirida a través de su evolución. Si bien para este estudio se han priorizado las formaciones sedimentarias, y volcano-sedimentarias del terciario y el Cuaternario, ellas reposan sobre unidades más antiguas, que comprenden rocas Metamórficas, ígneas y sedimentarias. A continuación, se presenta una breve descripción de la geología de este entorno.

A lo largo de las vertientes oriental y occidental del río Cauca desde el sur de Antioquia y hasta el límite entre Titiribí y Concordia afloran unidades de roca metamórficas, ígneas y sedimentarias, cuyas edades se han asignado desde el Paleozoico hasta el Reciente (Figura 11). Aquí se presenta una breve descripción de ese contexto geológico, una reseña más amplia puede consultarse en el capítulo 1 del documento soporte del Alcance 2 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA.

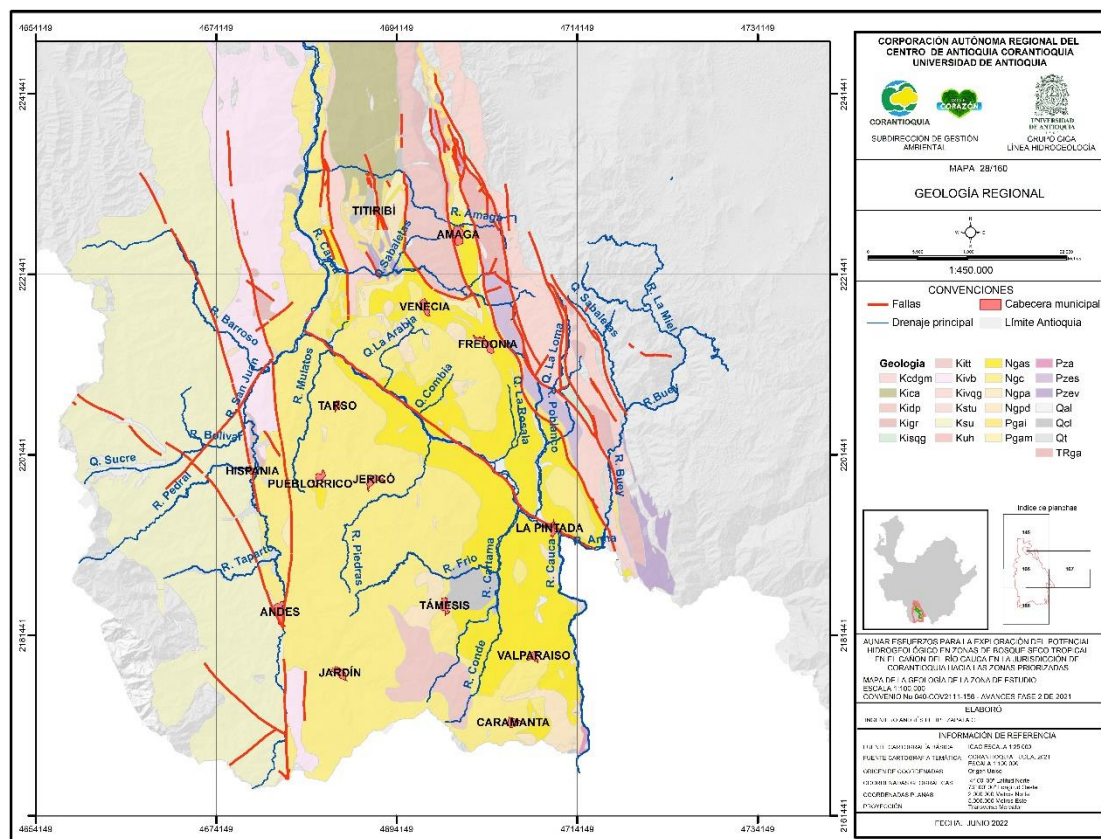


Figura 11. Mapa geológico de la zona de estudio.

## 5.1 ROCAS METAMÓRFICAS

Las rocas metamórficas de la zona de estudio se localizan básicamente en el costado oeste y la parte axial de la Cordillera Central. Las de edad Paleozoico pertenecen al Complejo Cajamarca (Pzes, Pzev) y en parte del Grupo Ayurá-Montebello (Pza); se reconoce también un intrusivo gnéisicos sintectónico (Pzin) en el Alto de Minas. De edad Cretáceo y, localizadas al occidente del Complejo Quebradagrande aflora la unidad litodémica diferente, denominada Complejo Arquía (Kica) (González, 2001).

El Complejo Cajamarca, limitado por estructuras tectónicas, está constituido por bloques elongados en sentido sureste-noroeste; estos se presentan al oriente y nororiente de la zona de estudio, en Santa Bárbara, Fredonia, Amagá, Angelópolis y Titiribí. Las Fallas Piedecuesta y Amagá demarcan de manera clara la posición de esta unidad. El Complejo Cajamarca consta de rocas metasedimentarias cuarzosas y esquistos silíceos y básicos, ricos en Al, con algunos cuerpos calcáreos con evidencias isotópicas de varios eventos metamórficos. Las anfibolitas se consideran parte del Grupo Ayurá Montebello; los principales cuerpos se localizan al occidente de la Falla Romeral. Las metamorfitas de media presión, denominadas Complejo Arquía, tienen una extensión de 23,2 km<sup>2</sup>, en la zona de estudio, en el municipio de Titiribí. Se encuentra limitada tectónicamente por las unidades más antiguas y cubierta discordantemente por sedimentitas de la Formación Amagá y secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Combia. El complejo está constituido por esquistos anfibólicos, esquistos

sericíticos y anfibolitas con escasez de cuerpos ultramáficos. En las Fotografías 1 se presentan algunos rasgos asociados a las rocas metamórficas en la zona de estudio.



**Fotografías 1. Imágenes de rocas metamórficas asociadas a la zona de estudio.**

## 5.2 ROCAS ÍGNEAS

La actividad ígnea en la Cordillera Central de Antioquia se extendió desde el Triásico con la intrusión de stocks adamelíticos en el flanco occidental de la Cordillera Central; se reconocen entre estos el Stock de Amagá (Trga) y otros cuerpos al este de la Falla Romeral, en Santa Bárbara (Trah).










El plutonismo básico afecta tanto la parte axial como ambos flancos de la Cordillera Central, durante el Cretácico Inferior, de estos hacen parte la diorita de Pueblito (Kidp) y la diorita de Heliconia (Ksdh). La primera es un cuerpo de forma tabular, controlado por las fallas Amagá y La Cascajosa, con una extensión de 68,0 km<sup>2</sup>, aflora en los municipios de Amagá, Titiribí y Angelópolis. La diorita de Heliconia está conformada por un pequeño cuerpo intrusivo, en el municipio de Angelópolis, ocupa una extensión de 2,22 km<sup>2</sup> asociado al Sistema Romeral.

Rocas volcánicas de afinidad oceánica se encuentran tanto en la Cordillera Central como en la Occidental; hacen parte de estas las vulcanitas del Complejo Quebradagrande (Kivqg), compuesta principalmente por espilitas, basaltos y diabasas (vía Albania – Bolombolo), y la unidad basal del Grupo Cañas Gordas: Formación Barroso o Vulcanitas del Barroso (Kivb); esta última constituye la unidad litológica más antigua en la Cordillera Occidental, separada geológicamente de la Central por el Sistema de Fallas Romeral; su extensión, en la zona de estudio es de 156,26 km<sup>2</sup>, presentándose cuerpos alargados en Santa Bárbara, Angelópolis y Titiribí. Cuerpos de ultramafitas serpentinizadas (Kiu) y gabros (Kigr) asociados a las rocas volcánicas, podrían representar fragmentos de ofiolitas emplazados tectónicamente durante el Cretácico tardío; en la zona de estudio los ultramáficos cubren un área de solo 6,1 km<sup>2</sup>, mientras el gabro del Romeral alcanza una extensión de 35,5 km<sup>2</sup>, entre Angelópolis, Amagá y Santa Bárbara.

El Stock de la Ursula (Kcdu) es una roca de tipo tonalita que aflora en la carretera Versalles-Santa Bárbara en 2,97 km<sup>2</sup>, es maciza y fanerítica de grano medio, la roca esta intensamente meteorizada. Las relaciones de campo indican que el Stock de Támesis (Kitt) es anterior a las formaciones Amagá y Combia, pero no hay ninguna otra relación que indique los tipos de contacto con rocas más antiguas. Su extensión es de 57,04 km<sup>2</sup>; se localiza al suroccidente de Támesis y se extiende hacia Jardín.

Sobre los sedimentos de la Formación Amagá, en discordancia, se depositaron los flujos y piroclastitas de la Formación Combia (Ngc), con la cual se inició un ciclo de intensa actividad volcánica que se extiende hasta el Reciente. La extensión es de 986,03 km<sup>2</sup> y se compone esencialmente de derrames basálticos y andesíticos, aglomerados, brechas volcánicas, tobas, conglomerados con matriz y areniscas tobáceas.

El Batolito de Farallones (Ngtf) es un cuerpo intrusivo de forma elongada emplazado en el eje de la Cordillera Occidental entre los límites de Antioquia y Chocó. En la zona de estudio afloran 29,7 km<sup>2</sup>. Las rocas Hipoabisales Porfídicas, de composición variable entre andesita (Ngpa) y dacita (Ngpd), constituyen geoformas sobresalientes entre Titiribí- Angelópolis, al norte; Jericó, Támesis, La Pintada-Valparaíso- Caramanta al sur; están relacionadas a mineralizaciones de Au-Ag de importancia. Suman una extensión de 87,9 Km<sup>2</sup>. En las Fotografías 2 se muestran algunas de las características de las rocas que afloran en la zona de estudio.

 <p>Zona de Cizalla en la Diorita de Pueblito, afloramiento de agua en ella.</p>	 <p>Roca Ultramáfica asociada al gabro de Romeral en la vía a Armenia</p>	 <p>Efectos dinámicos sobre el Gabro de Romeral (vía Armenia)</p>
 <p>Roca Porfídica del Cerro Corcovado, se notan los fenocristales de feldespato. (Fuente: A. N. Gallego)</p>	 <p>Basalto Porfiritico Formación Quebradagrande, vía Armenia Pueblito</p>	 <p>Dique de diabasa en la Formación Quebradagrande, vía a Sopetrán</p>
 <p>Volcánico Barroso</p>	 <p>Derrame de lava, meteorización esferoidal. Vía Marsella – Puente Iglesias</p>	 <p>Tobas de la Formación Combia. Río Mulatos</p>

**Fotografías 2. Características de algunas de las rocas que afloran en la zona de estudio.**

### 5.3 UNIDADES SEDIMENTARIAS

Tanto en la Cordillera Central, como en la Occidental se registra la presencia de rocas sedimentarias de edad Cretáceo, estas corresponden al Grupo Quebradagrande (kisgg) y el Grupo Cañasgordas (Formación Penderisco, Miembro Urrao: Ksu). En conjunto, el Complejo Quebradagrande, puede considerarse constituido por sedimentitas epiclásticas con estratificación fina, color gris a gris verdoso y negro, según el contenido de materia orgánica. Constituyendo una franja delgada hacia el este, limitada por fallas en sentido sureste-noroeste, tienen una extensión de 19,16 km<sup>2</sup> que aflora en la carretera Santa Bárbara – Fredonia. Las rocas del Grupo Cañasgordas alcanzan una extensión de 1052,47 km<sup>2</sup>, litológicamente predominan limolitas, arcillolitas con bancos intercalados de grauvacas y localmente bancos potentes de conglomerado. En las Fotografías 3 se presentan imágenes de estas unidades.



**Fotografías 3. Imágenes asociadas al grupo Cañasgordas y Complejo Quebradagrande.**

La sedimentación en la cuenca del río Cauca, en Antioquia, durante el Cenozoico estuvo controlada por el tectonismo en la zona; su origen estuvo relacionado con la formación de un graben o semigraben como consecuencia de movimientos de tracción a lo largo del Sistema de Fallas Romeral, en el cual se depositaron los sedimentos de la Formación Amagá. El termino Formación Amagá se ha venido utilizando en la literatura geológica para referirse al conjunto sedimentario continental descrito por Grosse (1926) como Terciario Carbonífero de Antioquia y posteriormente por Van der Hammen (1958) como Formación Antioquia. Esta formación en la zona de estudio cubre un área de 546,70 km<sup>2</sup> en una cuenca continua desde Amagá hasta el sur de Valparaíso. Básicamente está constituida por sedimentos continentales y lacustres depositados en cuencas de tracción de tamaño variable y ahora conservados en sinclinales y sinclinales de zonas tectónicas de plegamiento. Esta unidad reposa discordantemente sobre los Esquistos Verdes de Sabaletas y la Diorita de Pueblito; muestra contactos fallados con estas mismas unidades, con el Stock de Amagá y con rocas volcánicas básicas de la Formación Barroso; es instruida por stocks andesíticos del Mioceno-Plioceno y es cubierta en discordancia irregular hacia la cuenca del Cauca, por la secuencia volcano-sedimentaria de la Formación Combia.

De acuerdo con las características litológicas, presencia de mantos o bancos de carbón y posición estratigráfica, la Formación Amagá fue dividida en tres miembros: uno inferior (Pgai) esencialmente clástico, con una extensión en el área de estudio de 41,83 km<sup>2</sup>; el medio (Ngam) caracterizado por la presencia de mantos explotables de carbón, aflora principalmente en la cuenca de Amagá-Titiribí- Angelópolis con una extensión de 38,85 km<sup>2</sup>; y el superior (Ngas) sin mantos de carbón y niveles de conglomerados, aflora en una extensión de 464,91 km<sup>2</sup>, expresado en una franja alargada que se amplía hacia el Río Cauca y se extiende desde Fredonia a La Pintada y Valparaíso-Supía. Estudios posteriores han reclasificado la secuencia de la Formación Amagá, variando su disposición y distribución en dos miembros. En las Fotografías 4 se presentan algunas imágenes asociadas a la Formación Amagá.

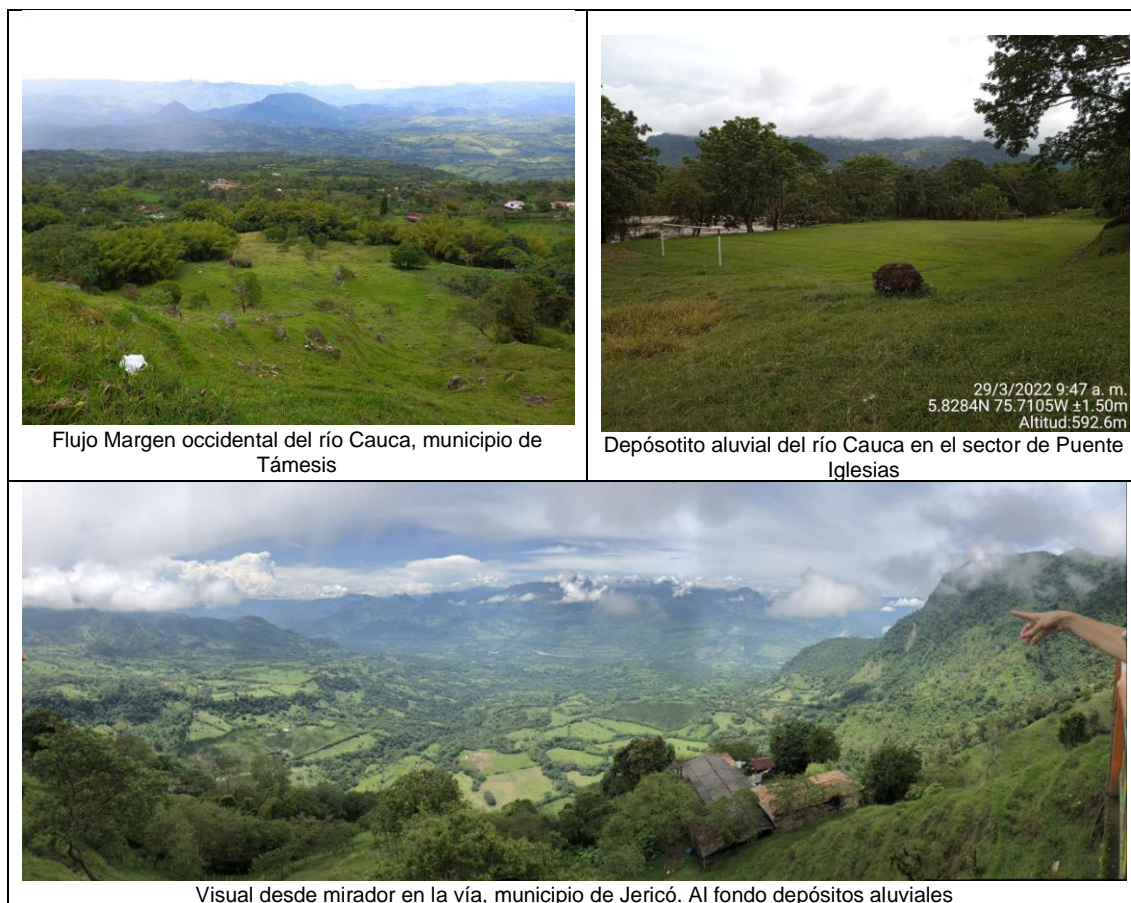


**Fotografías 4. Imágenes asociadas a la Formación Amagá.**

Los sedimentos de la Formación Amagá son suprayacidos por estratos más modernos en dos facies diferentes: un conjunto de estratos esencialmente volcánicos

denominados «Estratos de Combia» por Grosse (1926) y otro esencialmente de conglomerados.

Los depósitos cuaternarios son principalmente aluviales (Qal, Qat y Qt) que aumentan su extensión hacia las zonas planas y pueden alcanzar grandes espesores en el curso inferior medio del río Cauca y algunos de sus afluentes; su superficie es de 58,34 km<sup>2</sup> de extensión. También se han identificado depósitos de flujos y coluviales, (Qcl), se reconocen especialmente en Támesis, hacia Angelópolis y Titiribí, ver Fotografías 5.





**Fotografías 5. Imágenes asociadas a los depósitos recientes.**

#### 5.4 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

El Departamento de Antioquia hace parte del norte de Colombia, que conjuntamente con el noroccidente de Venezuela y la parte oriental de Panamá están situados cerca de la unión triple del Darién de las placas de Nazca, Caribe y Suramérica. Esta unión se caracteriza por una tectónica compleja, donde los mecanismos primarios son la subducción y el fallamiento transcurrente.

La estructura cortical en esta región está determinada por la interacción de un sistema complejo de fallas regionales resultado de una tectónica compleja, que produce fallamiento recurrente y plegamiento a lo largo de estructuras antiguas, durante episodios múltiples de deformación. Las deformaciones en el Neógeno y el Cuaternario se superponen frecuentemente. Varias zonas de falla con desplazamiento cuaternario

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

están localizadas a lo largo de zonas de cizalladura antiguas que constituyeron zonas de subducción.

En la zona de estudio son, en sentido noreste-suroeste: Sistema de San Jerónimo, Sistema Romeral, Falla de Minas, Falla Piedecuesta, Falla Amagá, Falla La Cascajosa, Fallas de Sabanalarga, Falla Arma, Falla Mistrató, Falla Remolino-Penderisco, Falla La Mansa.

Las fallas principales pueden haber cambiado de estilo durante la evolución del noroccidente colombiano, pero las evidencias en muchas de ellas indican, que al menos en un tiempo actuaron como fallas de rumbo con desplazamientos horizontales de gran magnitud.

## 6 RECARGA: HIDROLOGÍA

La presencia de agua en las formaciones geológicas de la corteza terrestre es causada por el proceso de recarga que ocurre desde diferentes fuentes y a través de distintas áreas. La recarga directa que procede de la precipitación se suele evaluar mediante balances hídricos; la delimitación de zonas de recarga, según las cuales se pueden incorporar flujos regionales, se realiza mediante la aplicación de propuestas metodológicas que involucran la evaluación de diferentes características intrínsecas del sistema. En el anexo 2.3 del documento soporte del Alcance 2 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, se pueden consultar los detalles concernientes al balance hídrico y la delimitación de zonas de recarga.

### 6.1 BALANCE HÍDRICO

Existen diversas técnicas para estimar la recarga, las cuales se clasifican según Lerner et al., (1990) en métodos de medición directa (lisímetros), balance hídrico, trazadores químicos e isotópicos y relaciones empíricas, de los cuales el método de mayor uso es el basado en balances hídricos de humedad en el suelo (Xie et al., 2018), la recarga que se estima por este método se considera recarga potencial, dado que se basa en datos hidrológicos de superficie y en una aproximación a la zona no saturada, sin incluir directamente información hidrogeológica (niveles freáticos).

El principio del balance de humedad en el suelo se basa en aplicar la ley de conservación de masa, tomando los primeros estratos del suelo (sistema suelo – planta) como el volumen de control y esquematizando todos los flujos naturales que intervienen en el proceso de generación de la recarga (Figura 12). Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2021) y Bastidas et al., (2022) utilizaron un modelo distribuido de balance de humedad el suelo Soil Water Balance – SWB (Westenbroek et al., 2010) para estimar la recarga potencial en la zona de influencia del BsT del cañón del río Cauca en Antioquia. Este modelo es determinístico, distribuido, cuasi tridimensional y opera a escala diaria, su variabilidad espacial viene dada por un arreglo matricial en el que se configuran las propiedades del suelo, coberturas terrestres, topografía (direcciones de flujo) y condiciones climáticas.

En el modelo SWB, se estima la recarga potencial por precipitación como el remanente del balance hídrico en el volumen de control definido, donde la zona vadosa es conceptualizada como un conjunto de tanques en la horizontal celda a celda con espesor variable, dependiendo de la profundidad de las raíces. Para la resolución de la ecuación de balance se utiliza una versión modificada del método de Thornthwaite & Mather para determinar la humedad en el suelo y la evapotranspiración real en cada paso de tiempo y en cada celda del dominio del modelo (Bastidas, 2019). La ecuación de balance de humedad en el suelo utilizada en el modelo SWB es la siguiente:

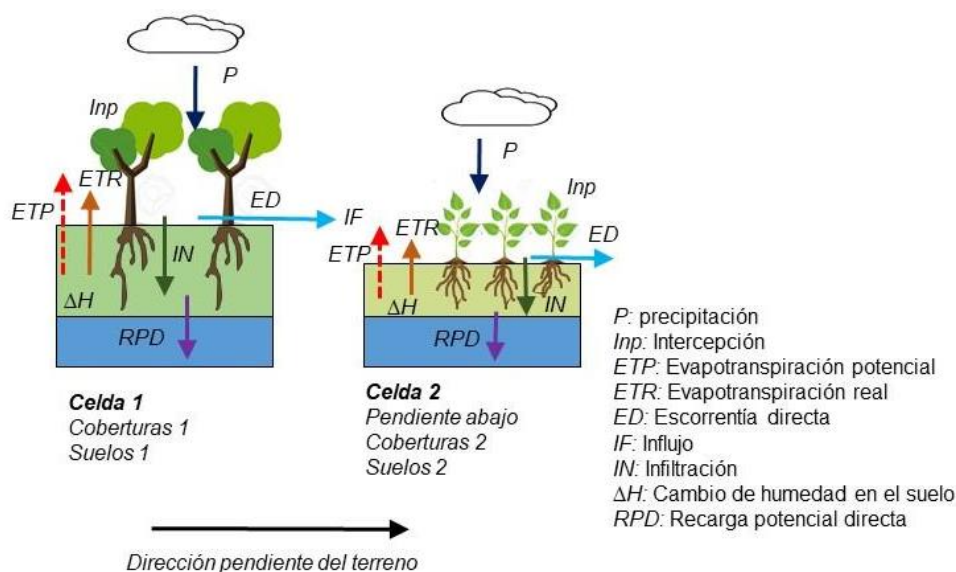
$$RPD = Entradas - salidas - variación en el almacenamiento$$

Ecuación 1

$$RPD = (P + IF) - (Inp + ETR + ED) - \Delta H$$

Ecuación 2

Dónde, RPD: Recarga potencial directa, P: Precipitación, IF: influjo desde otras celdas, Inp: intercepción en el follaje, ETR: Evapotranspiración real, ED: Escorrentía superficial directa,  $\Delta H$ : Variación de humedad en el suelo.

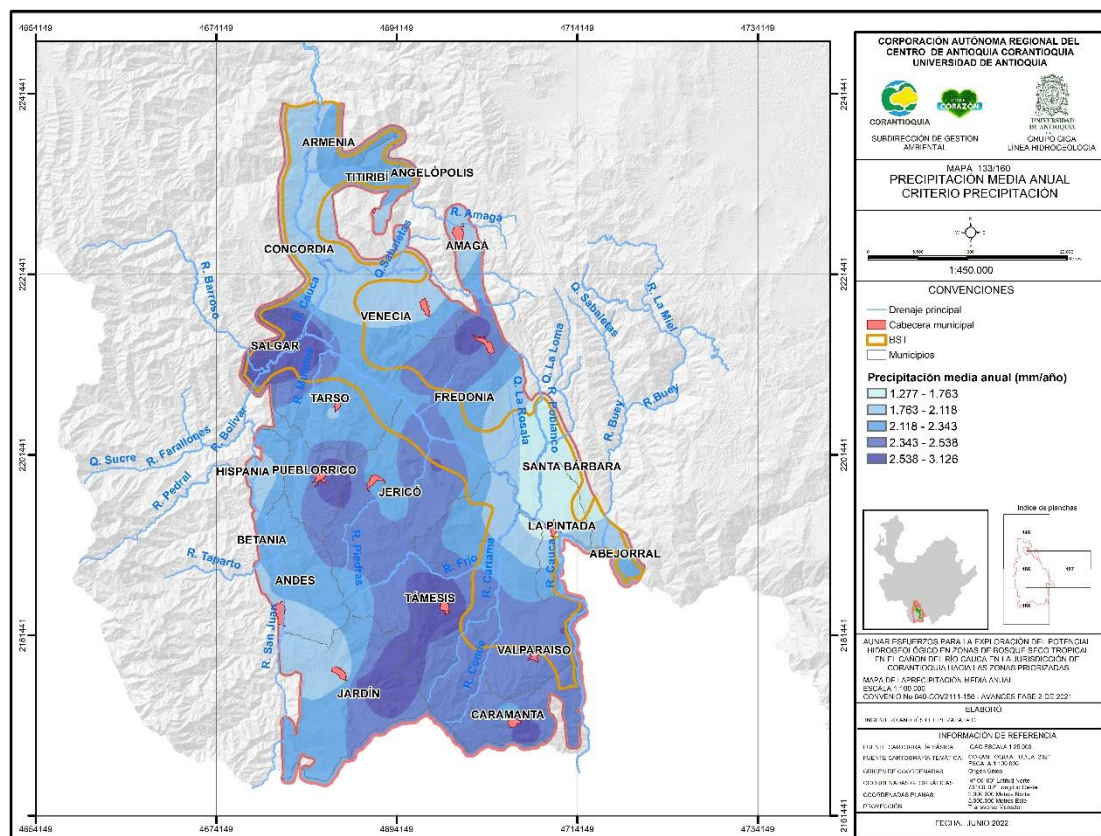


**Figura 12. Esquema de representación del volumen de control Suelo – Planta, celda a celda en el dominio del modelo SWB y los elementos del balance de humedad en el suelo que intervienen para la estimación de la recarga potencial directa (Bastidas, 2019).**

Al contarse ya con la evaluación de la recarga para toda la zona de influencia del BsT en el cañón del río Cauca, se retoman, para este estudio, los resultados correspondientes al polígono que demarca la zona de estudio.

El periodo de simulación del modelo SWB fue definido considerando la información disponible para la construcción de las variables de entrada, en especial la hidrometeorológica, y la disponibilidad de periodos continuos que permitieran capturar la variabilidad estacional e interanual de las variables hidrometeorológicas (año seco, normal y húmedo). En la zona de estudio se encontró una relación importante de fenómeno macro climático ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) y las variables hidrometeorológicas, principalmente de la precipitación, por tanto, el periodo de simulación seleccionado también guarda relación con la ocurrencia de las fases frías y cálidas del ENSO. Teniendo en cuenta esto fue definido el periodo junio-2013 a mayo-2014 como un año normal (fase neutra del ENSO), el periodo junio-2015 a mayo-2016 como un año seco (El Niño muy fuerte) y el periodo junio-2017 a mayo-2018 como un año húmedo (La Niña débil).

En la Figura 13 se muestra la distribución espacial continua de la precipitación promedio anual en la zona de estudio. En la figura se puede observar que las mayores precipitaciones, con valores entre 2.400 y 3.145 mm/año, se presentan en la vertiente derecha del río Cauca evidenciándose sólo a la margen izquierda una zona en el municipio de Fredonia con precipitaciones entre 2.400 y 2.800 mm/año. Las menores magnitudes de precipitación se concentran en el municipio de La Pintada y parte de Santa Bárbara, con valores entre 1.277 y 1.800 mm.

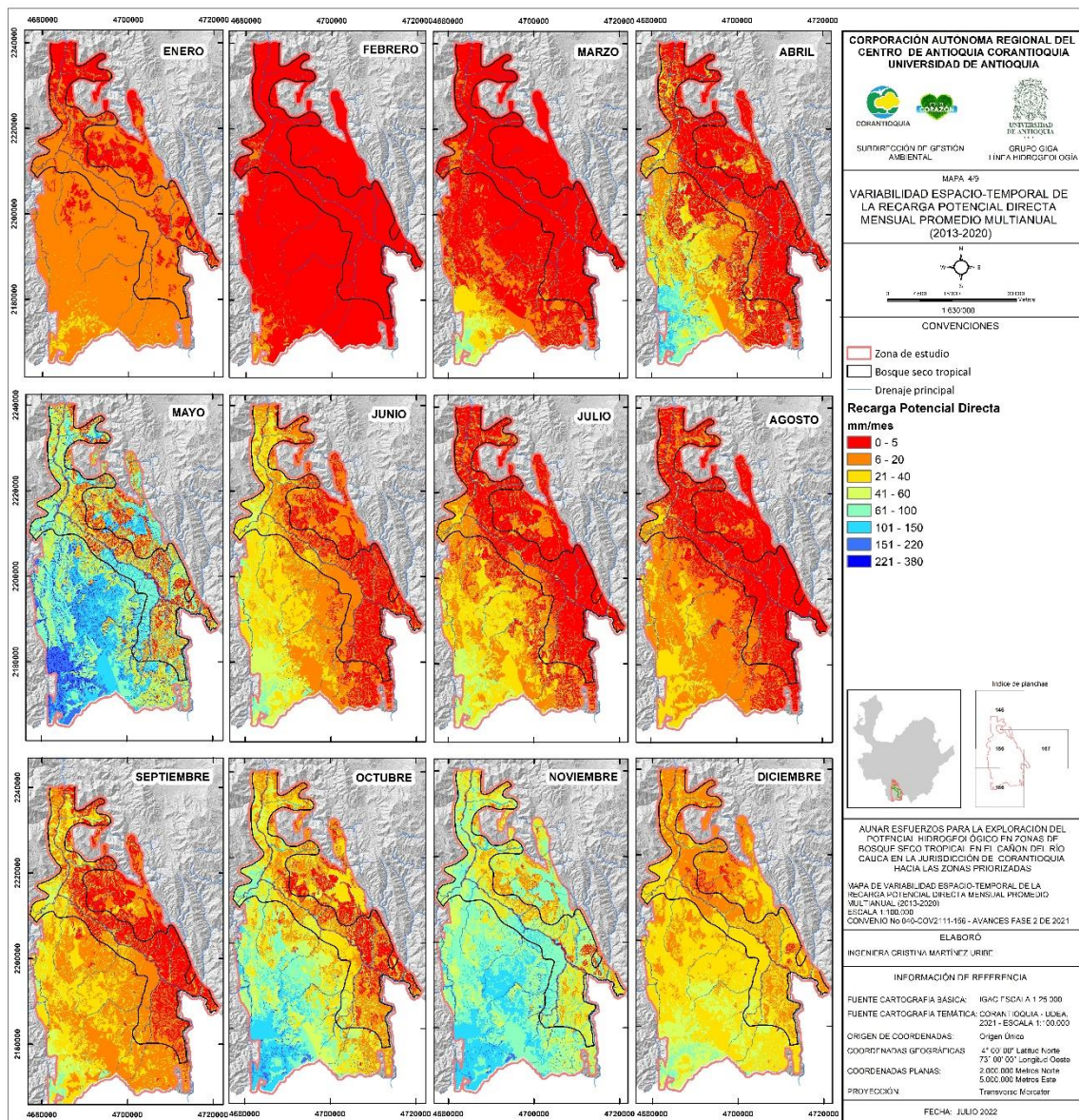


**Figura 13. Distribución espacial de la lluvia anual en la zona de estudio.**

En la Figura 14 se muestra la distribución espacial de la RPD estimada para el promedio de cada mes en el periodo de análisis de 2013-2020, representando así un ciclo promedio anual distribuido espacialmente.

El comportamiento de la RPD mensual muestra durante los meses de febrero y marzo las menores tasas de recarga (<5 mm/mes), llegando a ser cero en la mayor parte del territorio durante el mes de febrero. Hacia la vertiente derecha del río Cauca se evidencian menores tasas de recarga mensual en comparación con la vertiente izquierda del río, mostrando un mayor número de meses con tasa de recarga inferior a 5 mm/mes, y tasas de recarga que no superan los 40 mm/mes, a excepción del mes de mayo y noviembre que muestran tasas de recarga de hasta 150 mm/mes y 100 mm/mes respectivamente.

Las mayores tasas de recarga mensual se presentan durante los meses de mayo y noviembre, con valores máximos en el mes de mayo, especialmente hacia la vertiente izquierda del río Cauca. En los meses siguientes, entre junio y septiembre y durante el mes de diciembre se presenta una reducción de la recarga, con predominio de tasas de recarga entre 0 y 40 mm/mes.



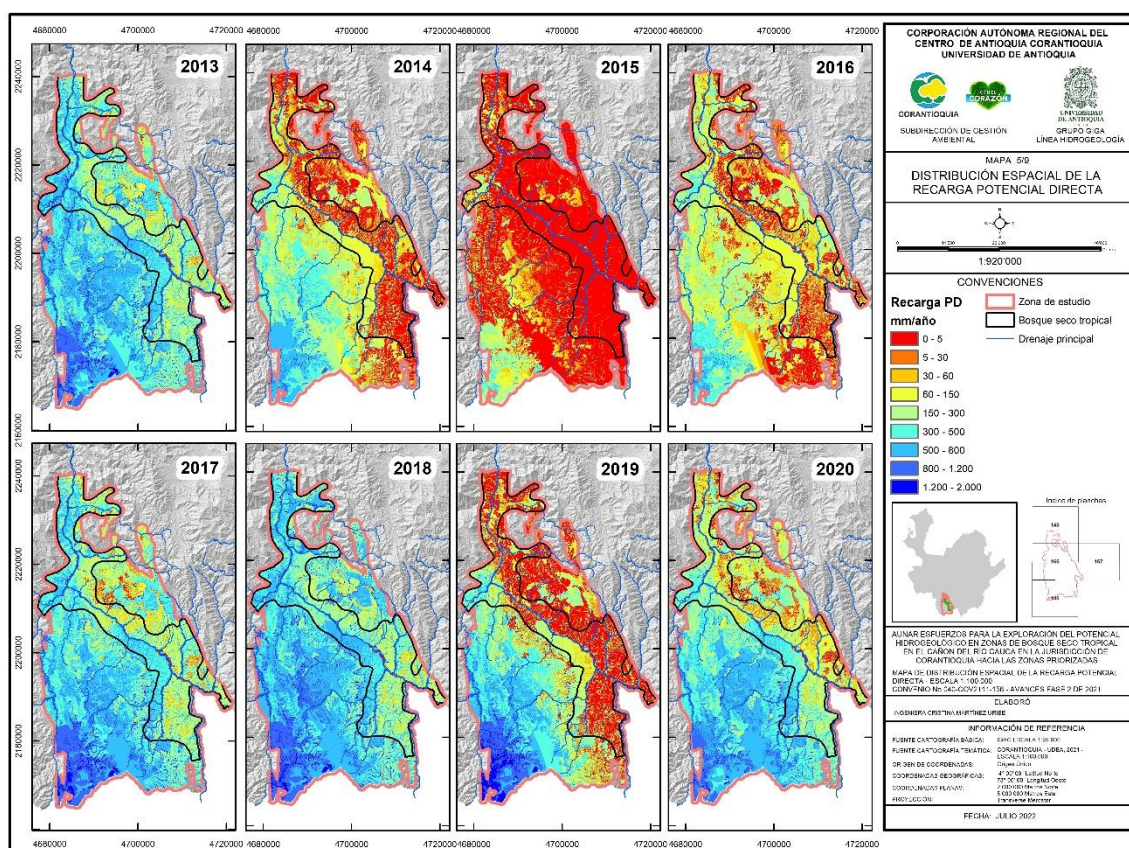
**Figura 14. Variabilidad espacio – temporal de la recarga potencial directa mensual promedio multianual (2013 – 2020) para la zona de estudio.**

La variabilidad interanual de la recarga potencial por precipitación en el territorio se presenta en la Figura 15. En la figura se observa una variación espacio - temporal en escala anual de la recarga, la cual oscila entre 0 y 2.000 mm/año, y tiene un promedio multianual (2013–2020) de 332,39 mm/año, que representa el 14,3% de la precipitación promedio multianual (2013 – 2020), dicha magnitud varía notablemente en función de la magnitud de la precipitación (Tabla 7). En el año 2015, correspondiente al periodo hidrológico seco y caracterizado por la ocurrencia de una fase El Niño fuerte del ENSO, se presenta una disminución de la recarga potencial anual que llega hasta un valor de 44,48 mm/año en comparación con el promedio multianual, y que representa tan sólo el 2,8% de la precipitación de ese año. En relación con el periodo hidrológico húmedo del año 2018 y caracterizado por la ocurrencia de una fase La Niña débil del ENSO, la recarga potencial anual aumenta hasta un valor de 561,09 mm/año en comparación con

el promedio multianual y que representa el 23% de la precipitación del año 2018 (Tabla 7).

**Tabla 7. Resumen estadístico de la recarga potencial directa (RPD) total anual, promedio espacial para la zona de estudio.**

Año	Lluvia [mm]	Recarga [mm]	RPD/P
2013	2.441	504,41	20,70%
2014	1.958	193,44	9,90%
2015	1.612	44,48	2,80%
2016	2.007	156,58	7,80%
2017	2.539	486,85	19,20%
2018	2.440	561,09	23,0%
2019	2.191	312,81	14,30%
2020	2.352	399,42	17,00%
Promedio	2192,5	332,39	14,30%



**Figura 15. Variabilidad espacial interanual de la recarga potencial directa estimada usando el modelo SWB para la zona de estudio (entre 2013 – 2020).**

En la Figura 16A se puede observar patrones espaciales de la recarga potencial relacionados con la variabilidad espacial de la lluvia en la zona. Se observa que las mayores tasas de recarga, del orden entre 500 y 2.898 mm/año, se presentan en la vertiente izquierda del río Cauca, hacia las partes altas de las cuencas de los ríos San Juan y Piedras y hacia la margen izquierda del río Cartama, estas zonas no solo tienen condiciones de mayor pluviosidad, sino que también suelos de mayor permeabilidad y bajas capacidades de campo. Por otra parte, las menores tasas de recarga, inferiores a 30 mm/año, se localizan principalmente en la vertiente derecha del río Cauca en los municipios de La Pintada, Fredonia y Venecia. También se presentan en la vertiente

izquierda del Cauca tasas de recarga entre 60 y 150 mm/año, en municipios como La Pintada, Valparaíso y Caramanta. La Figura 16B se puede observar de manera más clara el comportamiento de la recarga potencial y la precipitación por medio de una relación porcentual entre estas, se evidencia que las mayores tasas de recarga, entre 25 y 45% de la precipitación, se localizan en la vertiente izquierda del río Cauca hacia la parte alta de las cuencas del río San Juan y Piedras, mientras que en toda la vertiente derecha del río Cauca y en municipios como La Pintada y Valparaíso (margen izquierda) predominan tasas de recarga inferiores al 10% de la precipitación.

En la Figura 17 se muestra la distribución espacial de la recarga potencial promedio anual (2013-2020) en la extensión del ecosistema de BsT, tanto en términos absolutos, en mm/año, como en términos relativos, en % respecto a la lluvia. En esta se evidencia el predominio de mayores tasas de recarga, entre 150 y 500 mm/año, hacia la margen izquierda del río Cauca a la altura de Peñalisa, representando de 20 - 25% de la precipitación, y entre la desembocadura del río Cartama y el límite entre Tarso y Jericó, representando entre el 10 – 15 % de la precipitación. Las recargas más bajas se encuentran principalmente en la margen derecha del Cauca y hacia La Pintada y Valparaíso (margen derecha), en donde las tasas de recarga que predominan se encuentran entre 0 y 150 mm/año, lo que representa hasta un 10% de la precipitación.

Los patrones espaciales de la recarga potencial y sus magnitudes, permiten reafirmar la hipótesis de recargas por flujos regionales hacia las unidades hidrogeológicas que se relacionan directamente con el ecosistema de BsT, ya que directamente en la extensión de dicho ecosistema, la recarga directa es baja, sin embargo, en la parte alta de las cuencas asociadas, se presentan recargas directas significativas, las cuales pueden convertirse en flujos regionales, dependiendo de los patrones estructurales en la zona y las direcciones del flujo subterráneo.

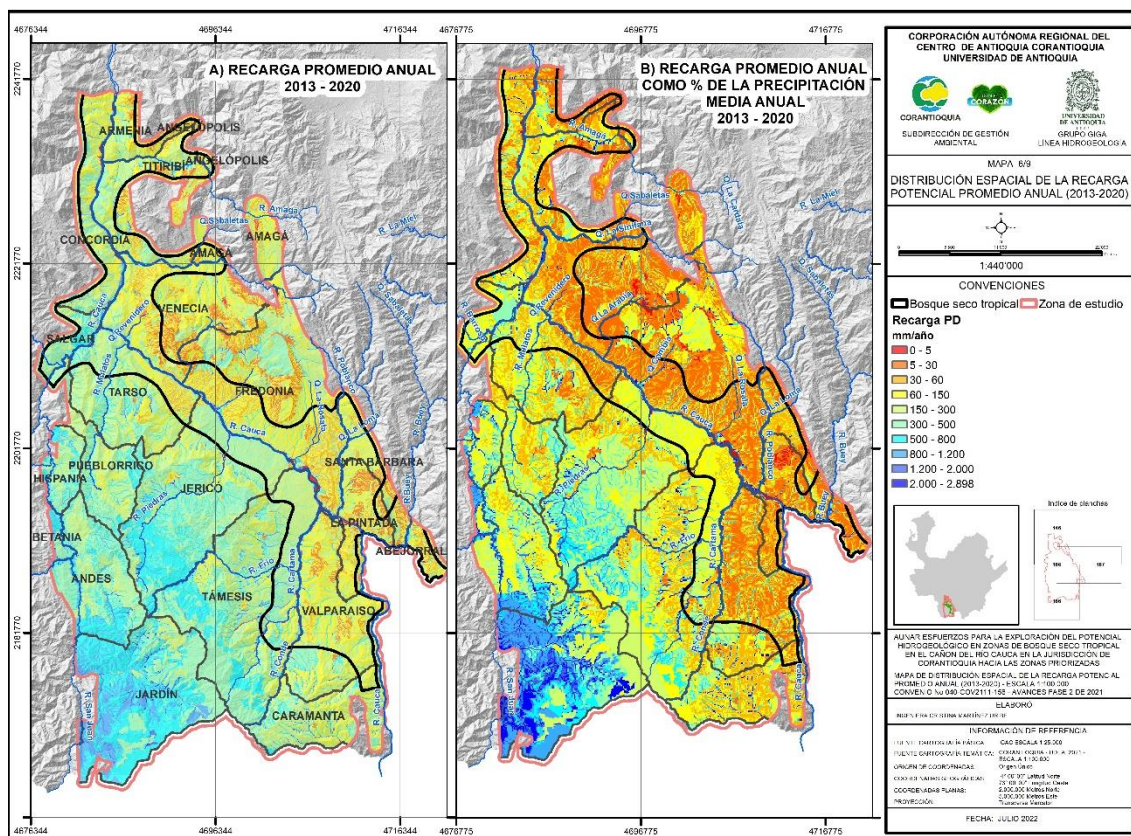
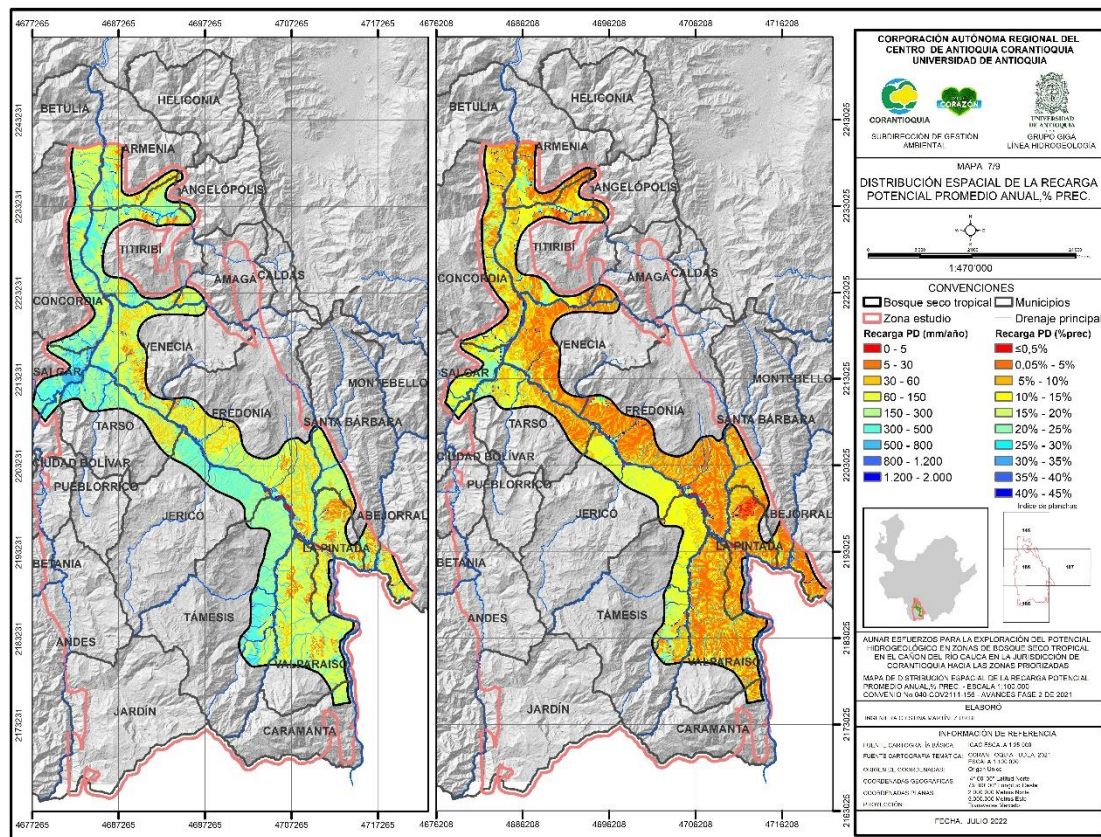


Figura 16. Distribución espacial de la recarga potencial promedio anual en la zona de estudio, entre 2013 y 2020.



**Figura 17. Distribución espacial de la recarga potencial promedio anual en la extensión del BsT, entre 2013 y 2020.**

## 6.2 ZONAS DE RECARGA

Para realizar la definición de zonas de recarga en el área de estudio fue utilizada la metodología definida por la Universidad de Antioquia (UdeA & Corantioquia, 2021; Betancur et al., 2020; Betancur et al., 2018; Betancur et al., 2017; Escobar et al., 2017). Esta metodología considera que la recarga está determinada por los parámetros: i) áreas con topografía adecuada, ii) condiciones de infiltración, iii) patrones texturales, iv) coberturas terrestres y v) condiciones estructurales.

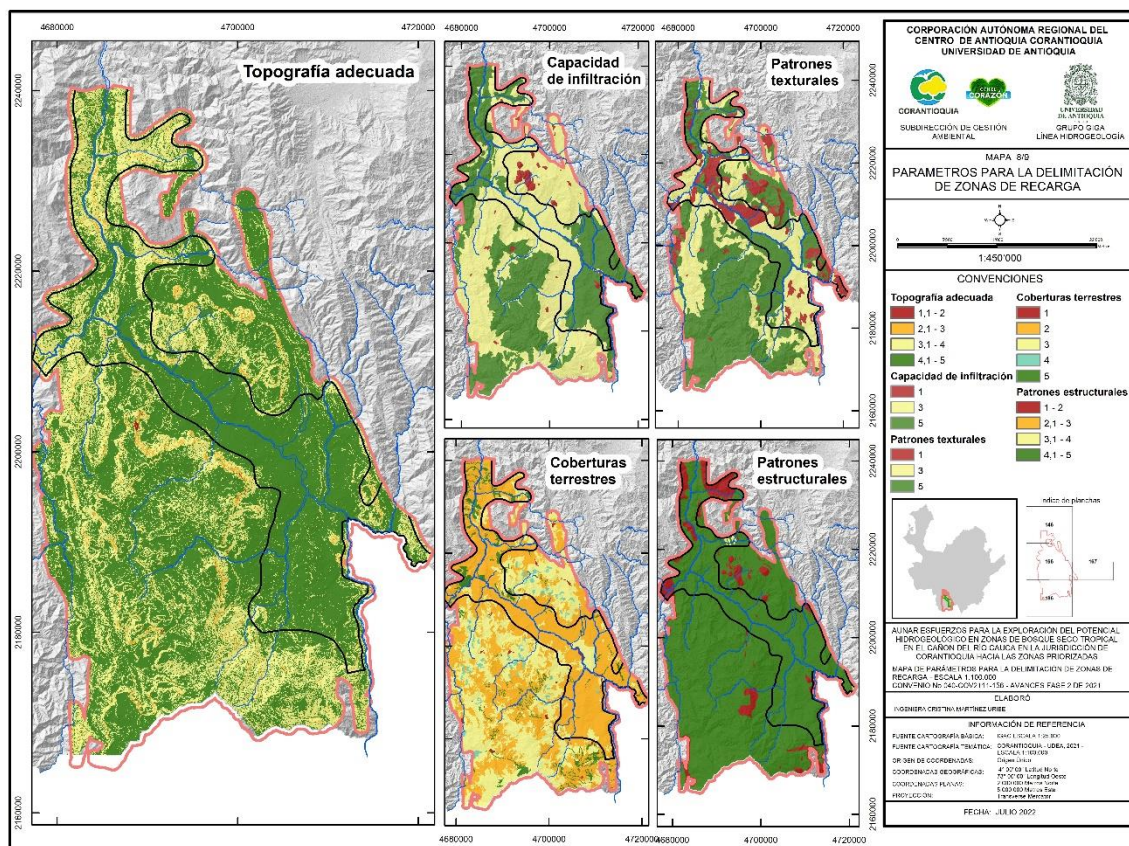
La categorización de las zonas de recarga se determina a partir de la relación que se presenta en la Ecuación 3.

$$IFR = 0,34(T) + 0,27(I) + 0,17(PT) + 0,12(CT) + 0,10(E)$$

Ecuación 3

Dónde: IFR: Índice de flujos regionales; T: Topografía; I: Infiltración; PT: Patrones Texturales; CT: Coberturas Terrestres; E: Estructuras.

En la Figura 18 se presenta la distribución espacial de los cinco parámetros según calificación asignada, de acuerdo con la metodología aplicada.



**Figura 18. Calificación de los cinco parámetros considerados en delimitación de zonas de recarga.**

En la Figura 19 se presenta el resultado, se observa que la mayor parte de territorio se encuentra en la categoría de importancia media con un 54,47% del área total de la zona; seguida con un porcentaje del 40,82% se evidencian zonas de recarga de importancia alta, en especial hacia la vertiente izquierda del río Cauca en los municipios de Valparaíso, Támesis, Jericó y Jardín. Con menor área en el territorio (4,67%) se encuentran zonas con categoría de importancia baja.

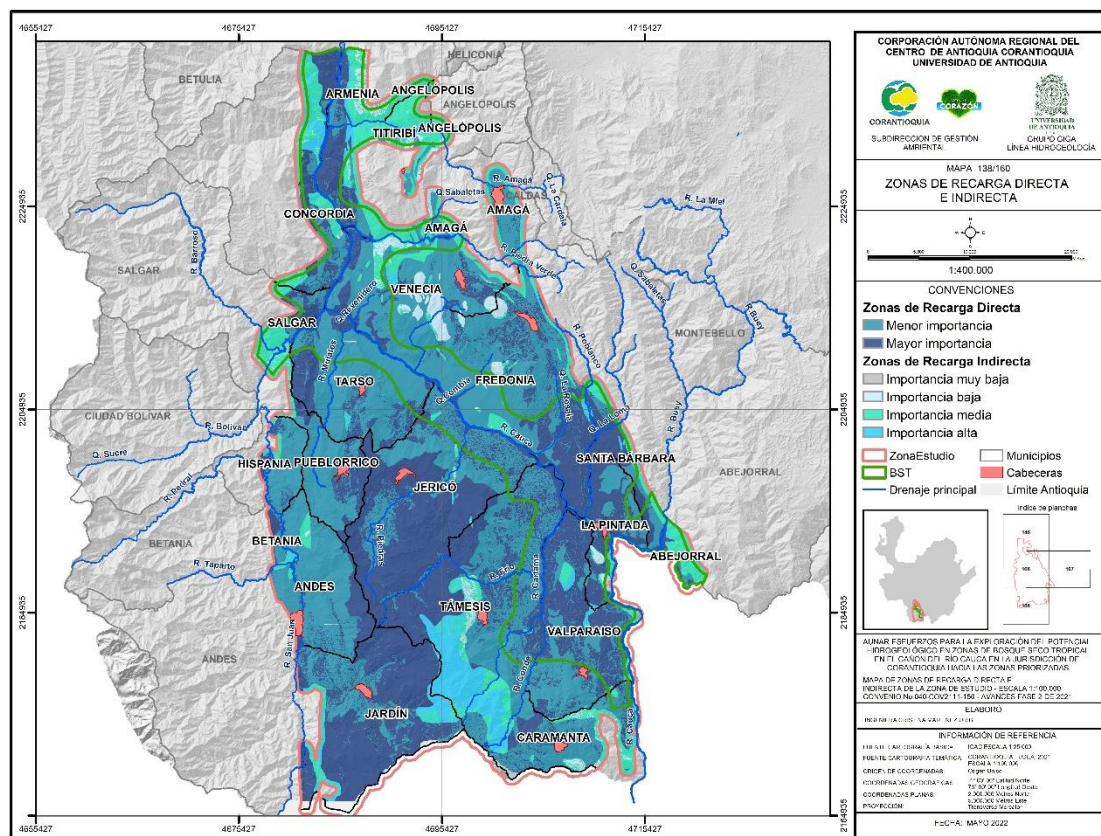


Figura 19. Delimitación de zonas de recarga.

## 7 EXPLORACIÓN SOCIO-HIDROLÓGICA

La exploración constituye un viaje a través de un espacio con el propósito de conocerlo y entenderlo; no es un viaje a ciegas, es un recorrido guiado por personajes, por conceptos, por las rutas que definen el trasiego de aquello que se quiere conocer. En el campo de la hidrogeología, siendo el agua subterránea un bien fundamental para la sostenibilidad de los ecosistemas y el bienestar humano, la llamada exploración socio-hidrogeológica a la que aquí nos referimos comprende varios aspectos que hemos querido considerar: el inventario de puntos de agua, la observación del subsuelo, las rutas invisibles del agua entre los poros de la corteza y el diálogo con los actores sociales de la región.

### 7.1 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Un punto de agua es un lugar natural, obra civil, o circunstancia que permita un acceso directo o indirecto al mundo del agua subterránea. caben dentro de esta definición todas las perforaciones existentes y las fuentes o surgencias (nacimientos o manantiales) que, en principio, se consideran aliviaderos naturales de los acuíferos (Custodio & Llamas, 1996). Un inventario de puntos de agua consiste en el registro de los puntos de agua subterránea, en un tiempo y espacio; con el fin de recolectar información que posibilite determinar sus características respecto a las obras que puedan existir en torno a él, la posición en la que se encuentra el agua, el uso o demanda del recurso, las características del entorno que pueden afectar su existencia (en cantidad o calidad), etc.

Un inventario se realiza mediante la recopilación de información existente en oficinas y centros de documentación y se completa recorriendo palmo a palmo el territorio y levantando la información directamente con los moradores del mismo. Para la región del suroeste se han inventariado 852 puntos de agua subterránea (Tabla 8 y Figura 20); 553 a partir de información disponible en fuentes documentales y 299 en el marco de este estudio. De estos puntos 755 son manantiales, 72 son aljibes, seis pozos, 14 galerías y cinco piezómetros. En Jericó la información de gran parte (280) de los puntos registrados procede de informes adelantados en estudios de detalle que se han motivado a raíz del interés minero que se ha suscitado sobre esta región; en Valparaíso y La Pintada existía un inventario previo realizado por SHI y CORANTIOQUIA, durante él se habían identificado 92 captaciones de agua subterránea. Las 13 galerías existentes en Fredonia fueron construidas sobre el Cerro Combia con propósitos geotécnicos; no obstante, el agua que se capta en ellas se utiliza para satisfacer algunas necesidades de los vecinos del sector.

En la Tabla 8 se presenta la síntesis de los resultados del inventario y en la Figura 20, los resultados obtenidos. Un informe completo de todo el trabajo del inventario, desde las fases preparatorias, la realización del mismo –durante tres meses de trabajo de campo-, el procesamiento y síntesis de la información y la socialización con actores sociales, está consignado en el documento soporte del Alcance 1 de este convenio y en sus 5 anexos.

**Tabla 8. Síntesis del inventario de puntos de agua en la zona de estudio de la Fase II.**

Municipio	Fuente		Manantial	Aljibe	Pozo	Piezómetro	Galería	Total puntos
	Primaria	Secundaria						
Amagá	11	13	20	3	0	1	0	24
Andes	24	12	36	0	0	0	0	36
Armenia	0	1	1	0	0	0	0	1
Betania	2	1	2	0	0	0	1	3
Caramanta	27	5	32	0	0	0	0	32
Concordia	8	3	10	1	0	0	0	11
Fredonia	29	53	61	5	1	2	13	82
Hispania	8	8	16	0	0	0	0	16
Jardín	29	13	37	3	0	2	0	42
Jericó	15	280	294	0	1	0	0	295
La Pintada	9	67	25	50	1	0	0	76
Pueblorrico	26	9	35	0	0	0	0	35
Salgar	2	0	0	2	0	0	0	2
Santa Bárbara	2	2	4	0	0	0	0	4
Támesis	25	18	43	0	0	0	0	43
Tarso	21	11	32	0	0	0	0	32
Titiribí	9	9	17	0	1	0	0	18
Valparaíso	25	35	55	4	1	0	0	60
Venecia	27	13	35	4	1	0	0	40
<b>TOTAL</b>	<b>299</b>	<b>553</b>	<b>755</b>	<b>72</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>14</b>	<b>852</b>

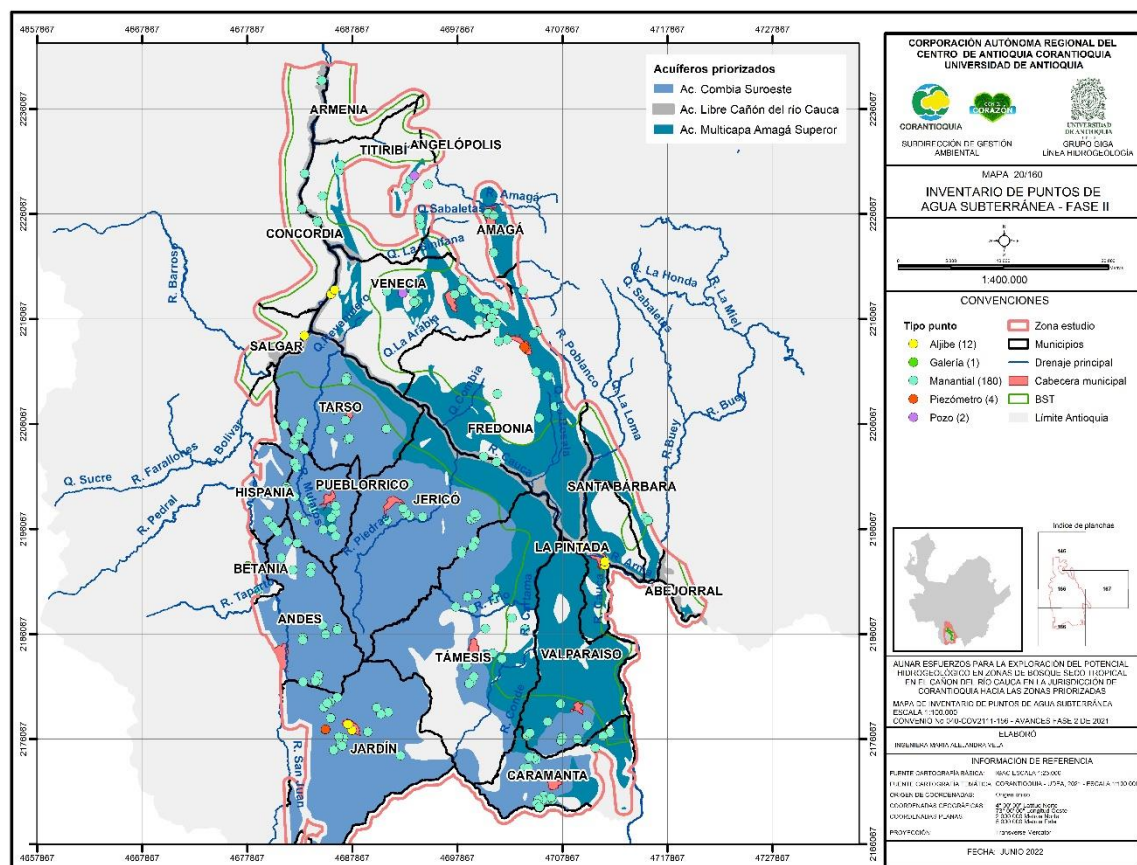


Figura 20. Localización de todos los puntos de agua inventariados en la zona de estudio.

En relación con la condición de los puntos de agua se encontraron 287 en uso (productivos) o en reserva, 213 inactivos (incluidos dentro de estos 133 puntos de agua levantados dentro del proyecto de exploración minera Quebradona), seis abandonados, 29 destinados exclusivamente al monitoreo, 15 secos y 299 sin información (Tabla 15).

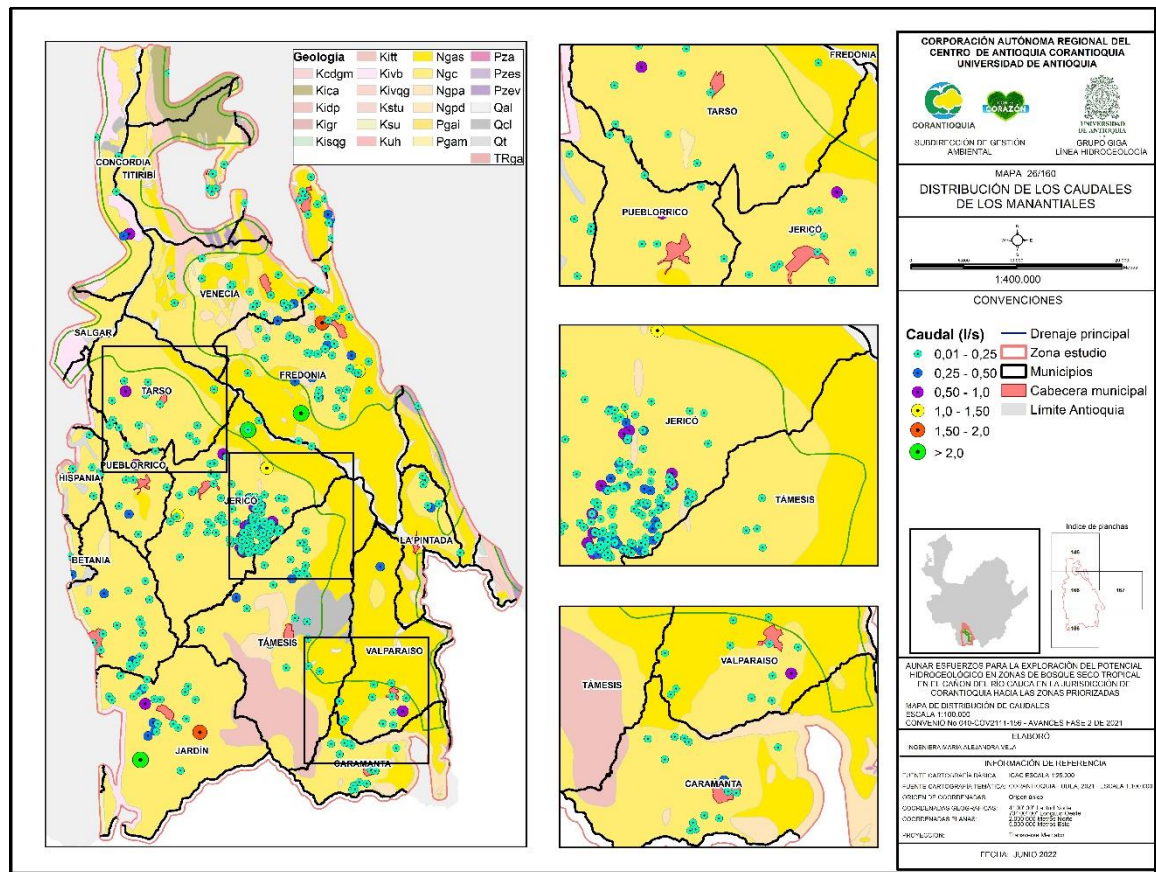
Tabla 9. Estado de los puntos de agua inventariados.

Tipo punto	Productivo	Monitoreo productivo	Reserva	Monitoreo	Monitoreo seco	Inactivo	Estudio Quebradona (inactivos)	Abandonado	Sin información.
Manantiales	220	27	16	16	15	73	132	1	252
Aljibes	18		4			2		5	43
Pozos	1					1	1		3
Piezómetros						4			1
Galería	1			13					

### 7.1.1 Usos, caudales y demanda

Según se reporta, para los puntos con información, en relación con los usos se tiene que, el 61 % de las capitaciones suministran agua para uso doméstico, 9,1% se destinan

Se tiene registro de caudal para 423 puntos de agua, de los cuales 418 son manantiales, 3 aljibes, una galería y un pozo. Los valores oscilan entre 0,02 y 5,8 l/s. Esta información se representa en la Figura 21.



69

Asumiendo estas cifras se estima que para uso doméstico se extraerían por lo menos, 390.860 m<sup>3</sup>/año, y para abastecimiento público el volumen de agua utilizada anualmente no sería menor de 232.770 m<sup>3</sup>/año.

Para la evaluación de la demanda agrícola y pecuaria, es necesario contar con información sobre tipos de cultivo, número promedio de cabezas de ganado y extensión de terreno. De la información consignada en el inventario para estos usos se reporta un caudal promedio de 5,46 l/min, se puede estimar una extracción mínima en los 69 puntos destinados a los usos agrícola y pecuario suma anualmente más de 200.000 m<sup>3</sup>.

El uso acuícola se reporta en cinco manantiales, con un caudal promedio extraído de 0,076 l/min, lo que representaría anualmente a 200.000 m<sup>3</sup>/año.



Con respecto al uso industrial sólo se tiene el reporte de tres puntos de agua asociados a este uso, dos aljibes y un manantial, pero no se cuenta con el registro de su caudal. Lo mismo sucede con el uso indicado como riego y jardinería. Tampoco se cuenta con esta información para el uso reportado como recreativo, que haría parte de la categoría de servicios.

La demanda total de agua subterránea se evalúa mediante la suma los distintos usos; de acuerdo con los datos parciales descritos hasta el momento, se puede calcular que en la zona de estudio se estría extrayendo anualmente más de 850.000 m<sup>3</sup> cúbicos de agua subterránea. Esta cifra incrementará en la medida en que se refine el inventario y a la par del crecimiento demográfico.

### 7.1.2 Propiedades hidráulicas

Las propiedades hidráulicas de una unidad hidrogeológica hacen referencia a su Transítividad (T), que representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua; a su conductividad hidráulica (k), que hace referencia a la característica intrínseca del medio geológico para permitir el paso del fluido que circula a través de él; y a su Capacidad de Almacenamiento (S), la cual se refiere al agua que puede ser liberada por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura equivalente al espesor saturado del mismo, cuando se produce un descenso unitario del nivel piezométrico. Dichas propiedades son obtenidas mediante la realización de pruebas de bombeo, las cuales siguen diferentes metodologías tanto para su realización como para el análisis de los resultados.

Es poco el conocimiento que se puede reunir en este sentido para la zona de estudio; solo se cuenta con registros documentales de 21 pruebas y tres más que se obtuvieron en el marco de este estudio (Tabla 10 y Figura 22). En el anexo 1.4 del documento soporte del Alcance 1 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA se puede consultar la memoria de las pruebas hidráulicas realizadas para este estudio.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

**Tabla 10. Propiedades hidráulicas recopiladas a partir de información secundaria y pruebas ejecutadas en campo**

Código	Fecha	Fuente	Geología	Rango de Profundidad (m)	Cooper-Bredehoeft-Papadopulus (CBP)			Hvorslev		Theis-Jacob				Capacidad específica [l/s]	Lugeon U.L (10-5 cm/s.)	Permeabilidad (Vallejo [cm/s])
					Transmisividad [m <sup>2</sup> /d]	Conductividad Hidráulica [m/d]	Coefficiente de Almacenamiento	Conductividad [m/d]	Transmisividad [m <sup>2</sup> /d]	Transmisividad [m <sup>2</sup> /d]	Conductividad Hidráulica [m/d]	Coefficiente de Almacenamiento	Distancia Radial (m)			
LAPA19	18/07/2014	*	Depósito Aluvial		292	3,6	2,96 x10 <sup>-5</sup>	7,800		69,60	0,87	0,15	0,60			
LAPA25	18/07/2014	*	Depósito Aluvial		6,7	0,08	2,5 x10 <sup>-4</sup>	0,011		11,6	0,14	0,22	0,55			
LAPA26	18/07/2014	*	F. Amagá		17,1	0,21	2,96 x10 <sup>-5</sup>	2,710		13,3	0,17	0,50	0,53			
LAPA28	18/07/2014	*	Depósito Aluvial		194,0	2,43	3,9x10 <sup>-6</sup>	6,550		60,4	0,75	0,45	0,72			
LAPA31	18/07/2014	*	Depósito Aluvial		38,4	0,48	6,67 x10 <sup>-5</sup>	6,670		39,4	0,49	0,50	0,50			
LAPA32	18/07/2014	*	F. Amagá		25,6	0,32	4,89 x10 <sup>-4</sup>	1,520		442,0	5,52	0,50	0,53			
LAPA07	18/07/2014	*	Depósito Aluvial		19,4	6,480	6,48 x10 <sup>-4</sup>	6,940		209,0	6,97	0,46	0,65			
AMGPZ01	1/01/2019	***	F. Amagá	325.50-327.88											0,50	5,4 x10 <sup>-6</sup>
AMGPZ01	1/01/2019	***	F. Amagá	314.50-316.88											1,50	1,53 x10 <sup>-5</sup>
AMGPZ01	1/01/2019	***	F. Amagá	303.00-305.38											24,00	2,4 x10 <sup>-4</sup>
AMGPZ01	1/01/2019	***	F. Amagá	286.50-288.88											11,60	1,16x10 <sup>-4</sup>
JERP02	24/09/2015	****	F. Amagá		100-500									0,70		
FREP01	1/06/2009	****	F. Combia											0,46		
UHG-I	01/01/2019	**	Depósito de vertiente			23,4 x10 <sup>-3</sup>										
UHG-II	01/01/2019	**	Rocas sedimentarias			24,7 x10 <sup>-3</sup>										

Código	Fecha	Fuente	Geología	Rango de Profundidad (m)	Cooper-Bredehoeft-Papadopulus (CBP)			Hvorslev		Theis-Jacob				Capacidad específica [l/s]	Lugeon U.L (10-5 cm/s.)	Permeabilidad (Vallejo [cm/s])
					Transmisividad [m <sup>2</sup> /d]	Conductividad Hidráulica [m/d]	Coefficiente de Almacenamiento	Conductividad [m/d]	Transmisividad [m <sup>2</sup> /d]	Transmisividad [m <sup>2</sup> /d]	Conductividad Hidráulica [m/d]	Coefficiente de Almacenamiento	Distancia Radial (m)			
UHG-III	01/01/2019	**	Rocas volcánicas			13,9 x10 <sup>-3</sup>										
UHG-IV	01/01/2019	**	Intrusivos			24,9 x10 <sup>-3</sup>										
UHG-V	01/01/2019	**	Zona de transición roca-suelo			12,1 x10 <sup>-2</sup>										
UHG-VI	01/01/2019	**	Saprolito			9,5 x10 <sup>-4</sup>										
UHG-VII	01/01/2019	**	Suelo residual			10										
UHG-VIII	01/01/2007	**	Depósito aluvial (*)			10										
LAPA44	13/06/2022	*****	Depósito Aluvial	0-11				21,36	1388,65							
JARA01	16/06/2022	*****	F. Combia	0-8,7				0,03	3,02							
CONA01	12/06/2022	*****	Depósito Aluvial	0-9,2				0,92	0							

Fuente:

\* (Corantioquia & SHI, 2014)

\*\* (AngloGold Ashanti, 2019)

\*\*\* (GEMI SAS et al., 2019)

\*\*\*\* Informes de perforación de Serviminas

\*\*\*\*\*Pruebas realizadas en este estudio

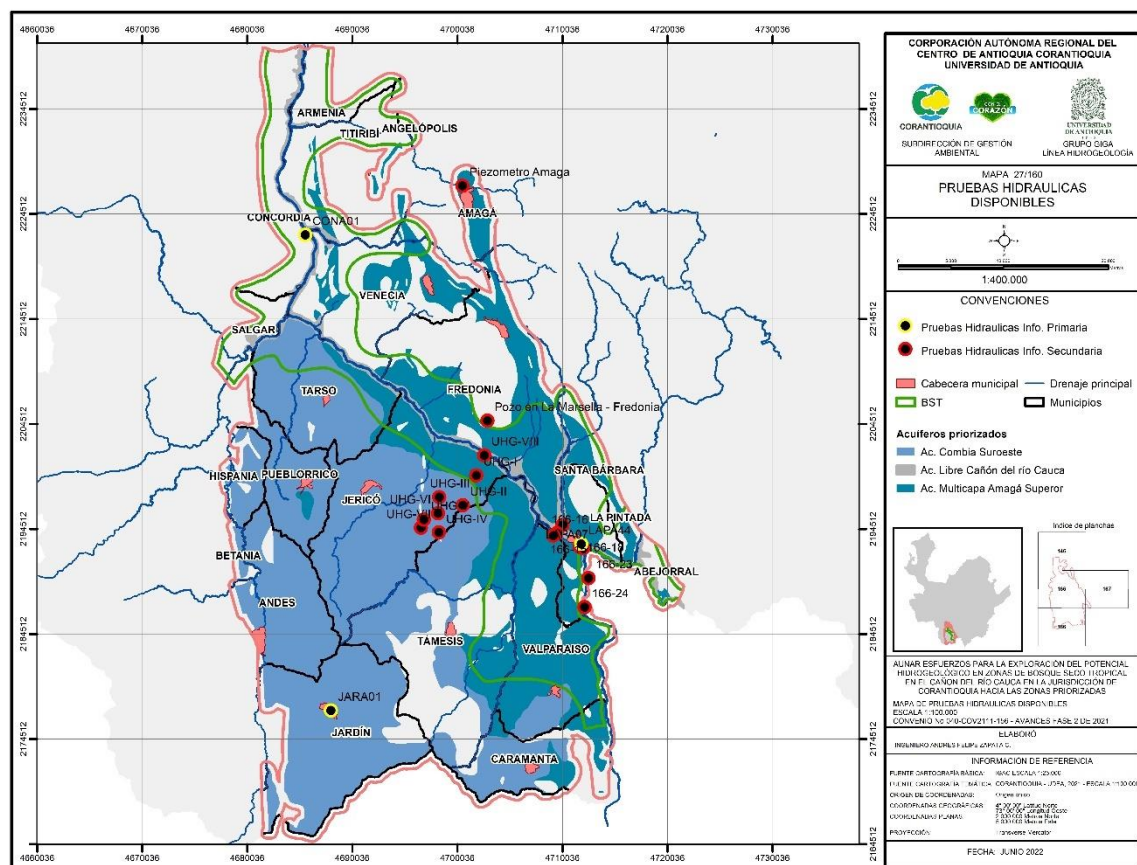


Figura 22. Distribución espacial de los puntos con información de propiedades hidráulicas.

### 7.1.3 Propiedades fisicoquímicas de campo

Durante el inventario de puntos de agua se registraron datos de pH, temperatura y conductividad eléctrica medidos con equipos multiparamétricos portátiles. También se anotaron condiciones organolépticas como color, olor y apariencia.

Con respecto al pH del agua medido en campo, se cuenta con información para 612 puntos, su rango varía entre 3,7 y 9,4. Las condiciones más ácidas ( $\text{pH} < 6$ ) se presentan en 69 puntos de agua; las condiciones neutras ( $\geq 6$  y  $\leq 8$ ) se presentan en 530 puntos; más alcalinas ( $> 8$ ) se reportan en 13 puntos.

La temperatura del agua varió, al momento del muestreo, entre 15,2 y 33,9 °C. Con respecto a las características organolépticas de los puntos que cuentan con información respecto al color, apariencia y olor; el 92,4 % del agua es reportada como incolora, el 93,9 % como clara y el 98% como inolora.

Un significado especial tienen los registros de la conductividad del agua (Figura 23). Conductividades menores a 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , que representarían circunstancias asociadas a aguas de reciente recarga se encuentran registrados 192 puntos. Entre 60 y 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , se presentan 372 puntos, este rango estaría relacionado con zonas de tránsito del flujo subterráneo y el contacto con formaciones geológicas que por su condición geoquímica

aportan más sales al agua. Entre 500 y 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hay 42 puntos, varios de ellos están asociados a posibles zonas de descarga cerca al río Cauca o a otras corrientes como el río San Juan; entre 1.000 y 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se encuentran cuatro puntos, uno ubicado en Jericó cerca al Río Piedras y al contacto entre la Formación Combia con un dique andesítico y los tres restantes están localizados en La Pintada muy cerca al río Cauca; finalmente los valores de conductividad mayores a 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se registran en dos puntos, un aljibe de La Pintada (LAPA43)  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un piezómetro del municipio de Amaga (AMGPZ01).

Relacionando estos valores con la geología se observa que los valores de conductividad mayores a 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se encuentran en la Formación Amagá miembro superior; el rango comprendido entre 500 y 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se encuentran principalmente en Depósitos aluviales y la Formación Amagá miembro superior. Los puntos con conductividades inferiores a 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se encuentran principalmente en la Formación Combia y algunos pocos en la Formación Amagá Miembro Superior.

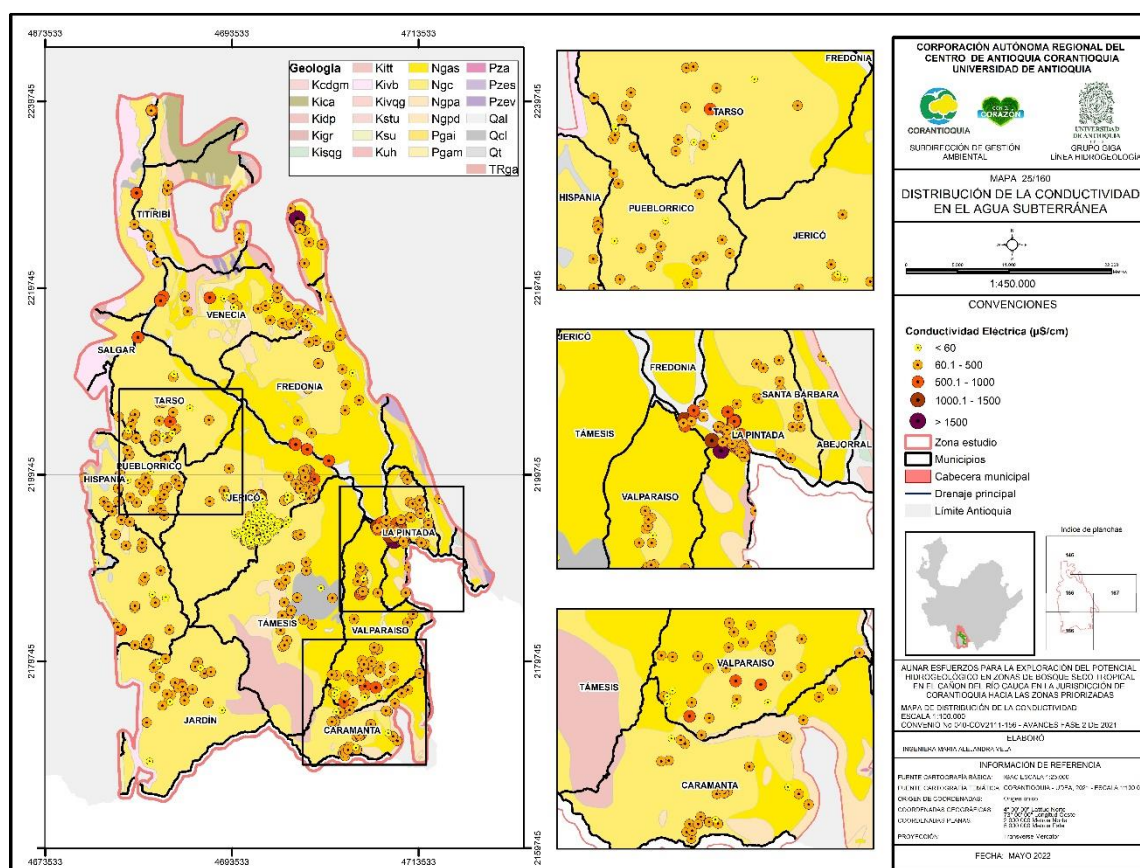


Figura 23. Distribución de la información disponible de conductividad eléctrica del agua subterránea

#### 7.1.4 Condiciones de los puntos de agua

El estado de mantenimiento de un punto de agua es clave para prevenir impactos por contaminación de las aguas subterráneas. El estado de los aljibes en campo registra diferentes condiciones: se encuentran puntos bien cuidados, con tapa y realce en

establecimientos en donde se utiliza el agua para actividades domésticas, como en La Pintada y Valparaíso; también se han encontrado aljibes abandonados, que han sido contruidos hace décadas antes de que las comunidades contaran con servicio de acueducto, momento al cual dejaron de lado su uso; también hay captaciones colmatadas y con las tapas de concreto deshecho. Con respecto a los manantiales los puntos visitados cuyo uso principal es de abastecimiento, cuentan con buenas coberturas protectoras y en general se encuentran en buen estado, entre las presiones antrópicas que se encontraron en algunos puntos, se puede destacar la ampliación de la frontera agrícola y pecuaria, encontrando afloramientos en medio de cultivos (Café, Aguacate, entre otros) y zonas potrerizadas donde se permitía ingreso de ganado.

En las Fotografías 6, se presentan un recuento del estado de algunos puntos de agua que han sido registrados.





**Fotografías 6. Condiciones de puntos de agua registrados en trabajo de campo.**

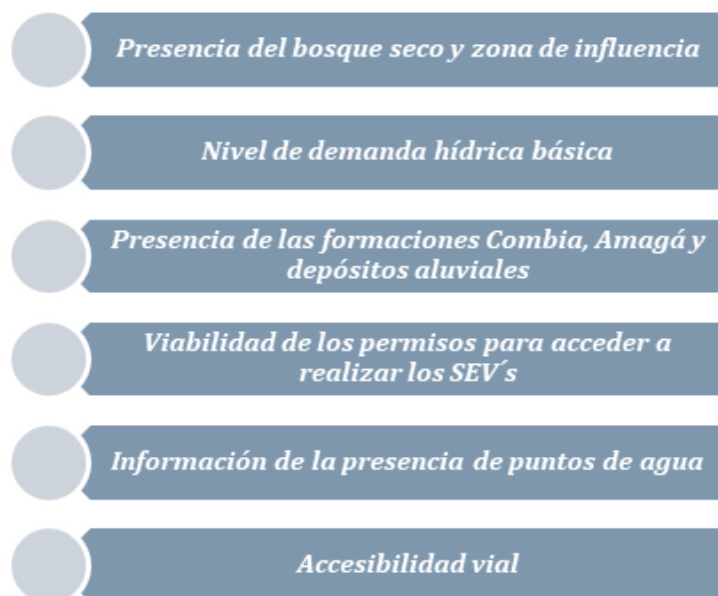
Reiterando que el uso más generalizado de las aguas subterráneas en la zona de estudio es el abastecimiento doméstico, se encuentra que 213 puntos de agua están legalizados y se adelantan trámite de legalización para 201 manantiales.

## 7.2 GEOFÍSICA

Una pregunta acompañó la fase de exploración de esta investigación sobre las aguas subterráneas en el suroeste de Antioquia: ¿Cómo optimizar el análisis geofísico para obtener una aproximación conceptual representativa de las características hidrogeológicas de una zona extensa y de alta complejidad geográfica?

La tarea consistía en diseñar una estrategia de muestreo para priorizar las zonas y lugares específicos donde se realizaría un número limitado de sondeos eléctricos verticales y tomografías.

A partir de los estudios realizados, la información temática y cartográfica disponible en la región de estudio; se definió un conjunto de criterios de carácter hidrogeológico y social que debían cumplir los sitios en los que se practicarían los sondeos (Figura 24).



**Figura 24 Criterios para la definición de los sitios en los que se realizarían pruebas geofísicas.**

La Prioridad se entendería como un parámetro comparativo entre puntos de interés hidrogeológico de acuerdo con una propiedad o a un conjunto de propiedades medibles y que representan cualidades físicas, atributos hidrológicos, geológicos y geográficos - de interés hidrogeológico-. Lo anterior equivale a decir que la Prioridad es función del conjunto de atributos de análisis. En la tabla 1 se exponen las variables identificadas y seleccionadas para evaluar y priorizar los sitios en los que se realizaron los SEV.

**Tabla 11. Variables de priorización de zonas de interés hidrogeológico.**

Variable	Criterios	Relación	Valores	Expresión
<b>Geología</b>	A mayor potencial acuífero mayor interés (Amagá, Combia Aluviales)	Directa	{0,1}	$IG = G \dots G = 0, 1$
<b>Pendiente</b>	< 10°, A menor pendiente mayor interés	Inversa	[0,1]	$IP = (P_{max} - P)/(P_{max}-P_{min})$
<b>Grado de información</b>	Menos información mayor interés	Inversa	[0,1]	$IGI = (GI_{max} - GI)/(GI_{max}-GI_{min})$
<b>Perforación</b>	A mayor proximidad a la perforación, mayor interés	Directa	[0,1]	$Ipf = (Pf - Pf_{min})/(Pf_{max}-Pf_{min})$
<b>Vías</b>	A mayor proximidad a la vía mayor interés	Directa	[0,1]	$IV = (PxV - PxV_{min})/(PxV_{max}-PxV_{min})$
<b>Índice agregado</b>	Índice de Prioridad Geofísica (Producto simple de valores con criterios)		(0,1)	$IPG = (IG * IP * IGI * Ipf * IV)$

A partir de este modelo de priorización se logró definir un conjunto de zonas estratégicas para la exploración geofísica (Figura 25). En el capítulo 2 del documento soporte del Alcance 2 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, y en el



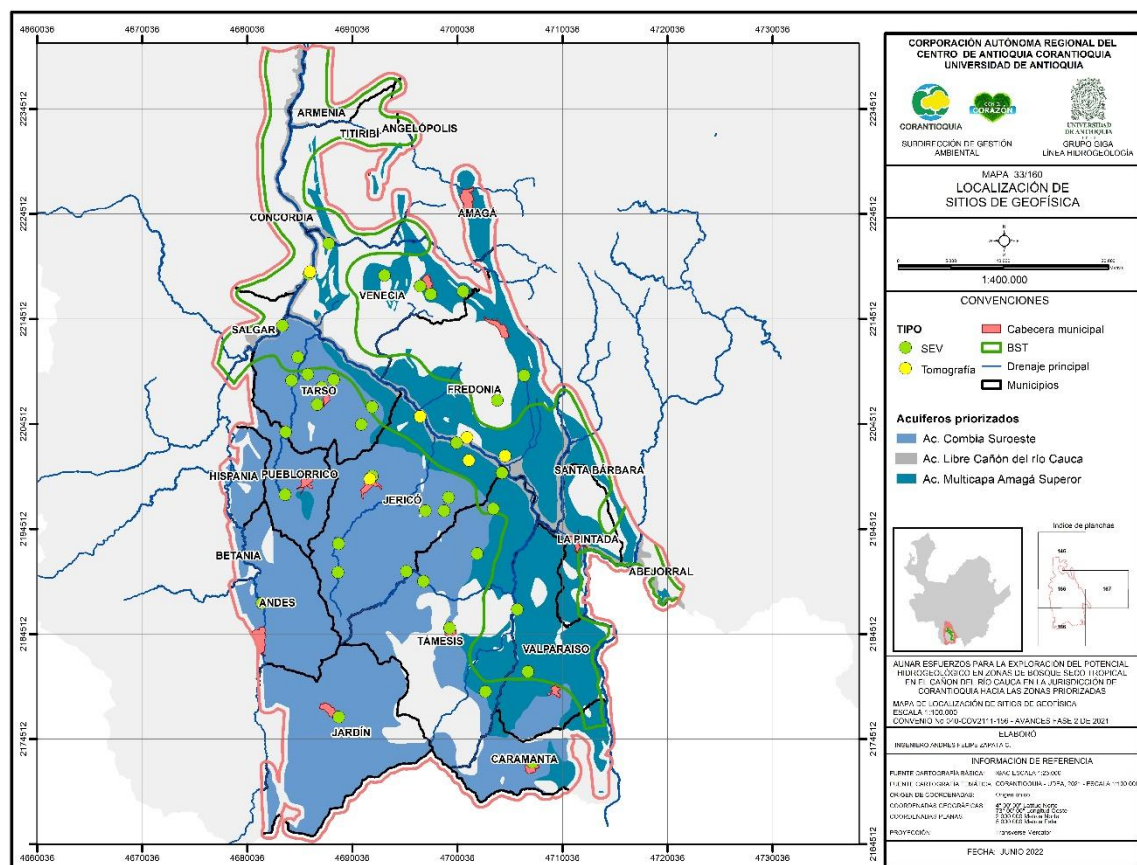


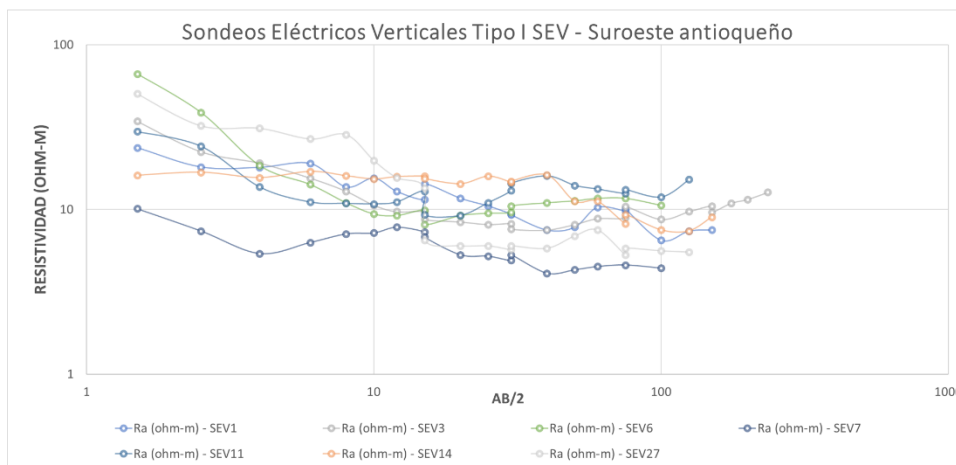
Figura 26. sitios en los cuales se practicaron las pruebas geofísicas en el presente estudio.

Tabla 12. Síntesis de los Sondeos eléctricos verticales; su localización, geología superficial correspondiente y la profundidad de exploración estimada.

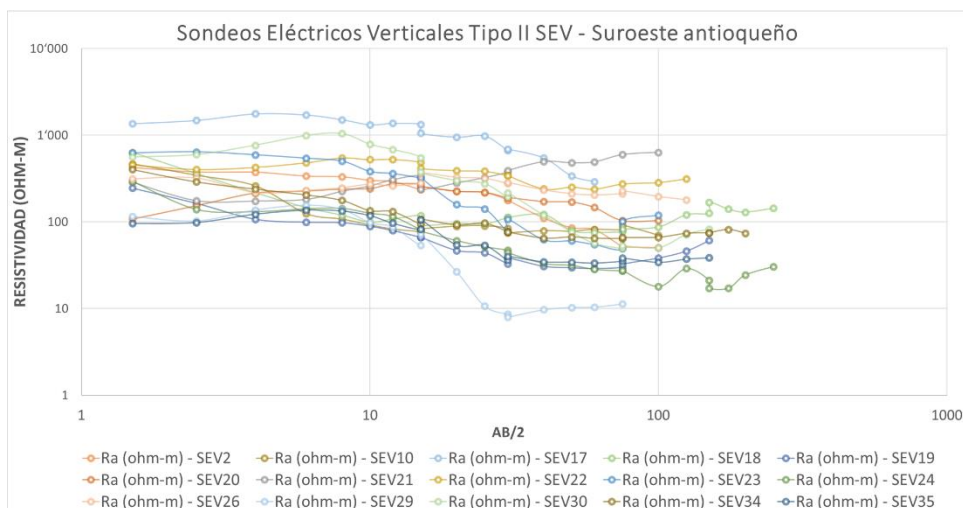
SEV	Unidad Hidrogeológica	Profundidad alcanzada (m)	SEV	Unidad Hidrogeológica	Profundidad alcanzada (m)
SEV1	Aluvio torrencial	10,1	SEV20	Combia	50,5
SEV2	Combia	53,1	SEV21	Combia	5,3
SEV3	Combia	173,0	SEV22	Combia	25,5
SEV4	Aluvión Cauca	20,4	SEV23	Combia	100,0
SEV5	Aluvión Cauca-Combia	206,0	SEV24	Combia	94,0
SEV6	Amagá	16,0	SEV25	Amagá	12,0
SEV7	Amagá	10,0	SEV26	Combia	45,4
SEV8	Amagá	13,1	SEV27	Amagá	3,8
SEV9	Amagá- Pórfido	95,0	SEV28	Amagá	112,0
SEV10	Amagá	68,4	SEV29	Amagá	8,2
SEV11	Amagá	71,0	SEV30	Combia	30,8
SEV12	Amagá	76,0	SEV31	Combia	17,7
SEV13	Amagá	22,5	SEV32	Amagá	19,7
SEV14	Amagá- Pórfido	50,0	SEV33	Combia	30,3
SEV15	Amagá- Pórfido	47,0	SEV34	Combia	125,0
SEV16	Combia	81,1	SEV35	Combia	75,7
SEV17	Combia-Pórfido	12,0	SEV36	Combia	80,0
SEV18	Combia	179,0	SEV37	Combia	10,6
SEV19	Combia	75,3	SEV38	Combia	30,2

## 7.2.1 Tipos de curvas geoeléctricas

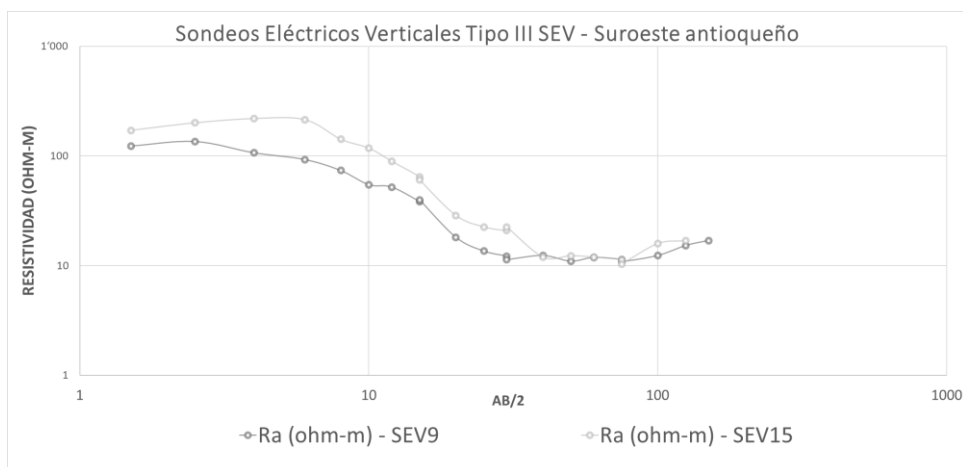
Luego de procesar toda información se pudieron identificar cuatro tipos de curva geofísica, las cuales ayudan a diferenciar el comportamiento geoeléctrico de las unidades geológicas de interés. Para el caso de las curvas Tipo I (Figura 27), el procesamiento dio como resultado intercalaciones de valores bajos de resistividad eléctrica (menores de 20 ohm-m) con valores medianos (20 a 100 ohm-m) y eventualmente altos (mayores a 100 ohm-m), correspondientes a intercalaciones de arcillolitas con areniscas y limolitas de la Formación Amagá, respectivamente. En cuanto a las curvas Tipo II (Figura 28), el procesamiento dio como resultado valores entre 100 y algo más de 1000 ohm-m, con algunas intercalaciones de valores menores de 100 ohm-m y esporádicamente, valores menores de 10 ohm-m; esto corresponde a areniscas conglomeráticas, con tobas de origen volcánico y eventualmente arcillolitas. Para las curvas Tipo III (Figura 29), el procesamiento dio como resultado valores de resistividad bajos (9 a 29 ohm-m) en los primeros 50 a 100 m de profundidad y después valores mayores a 1000 ohm-m; este comportamiento se correlaciona con arcillolitas y areniscas finas de la Formación Amagá, instruidas por un Pórfido andesítico. Finalmente, para las curvas Tipo IV (Figura 30), el procesamiento dio como resultado valores entre 19 y 63 ohm-m en los primeros 50 m de profundidad y luego valores bajos (menores de 10 ohm-m); esto corresponde a depósitos no consolidados de arenas, gravas y limos sobre arcillolitas y areniscas de la Formación Amagá.



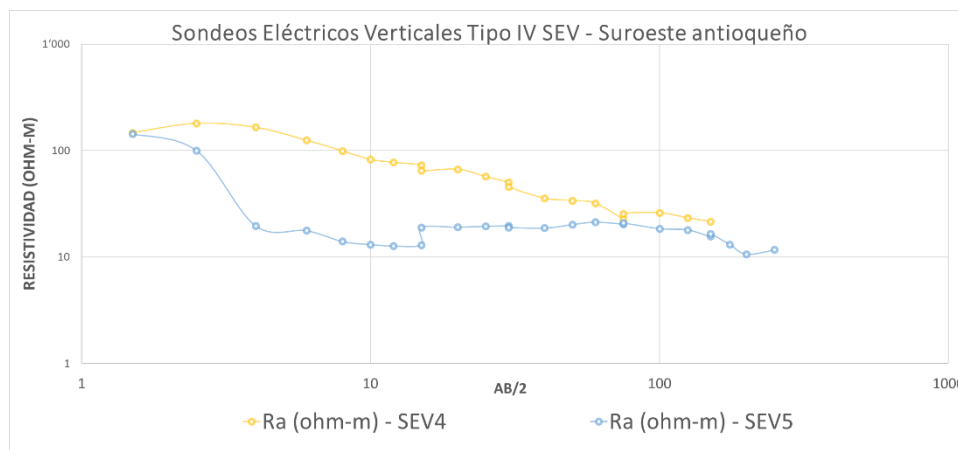
**Figura 27. Curvas geofísicas Tipo I en la zona de estudio.**



**Figura 28. Curvas geofísicas Tipo II en la zona de estudio.**



**Figura 29. Curvas geofísicas Tipo III en la zona de estudio.**



**Figura 30. Curvas geofísicas Tipo IV en la zona de estudio.**

## 7.2.2 Los perfiles geoelectricos

A partir de los SEV y del conocimiento de la geología regional se obtienen aproximaciones longitudinales para sondeos correlacionables; de esta forma se propusieron cinco secciones geoelectricas. El perfil 1 (Figura 31), con valores de resistividad típicos de la Formación Amagá, muestra un sinclinal con eje en la cabecera del municipio de Venecia. El perfil 2 (Figura 32) muestra un homoclinal en el municipio de Fredonia; este rasgo comprende a la Formación Combia y a la Formación Amagá. En Jericó, el perfil 3 (Figura 33) revela una estructura sinclinal con en el eje sobre el río Piedras y está conformado por rocas fracturadas de la formación Combia (Ngc). El perfil geoelectrico 4 (Figura 34), entre Támesis y Valparaíso, presenta un flanco homoclinal inclinado hacia el noroeste principalmente, conformado tanto por la Formación Combia como por la Formación Amagá, intruídas a su vez por un cuerpo de roca ígnea tipo Pórfido (Tadh). Finalmente, en el perfil 5 (Figura 35) se observa una estructura homoclinal fallada, pero con inclinación o buzamiento hacia el sureste. Está conformado por las Formaciones Amagá (Nga) y Combia (Ngc).

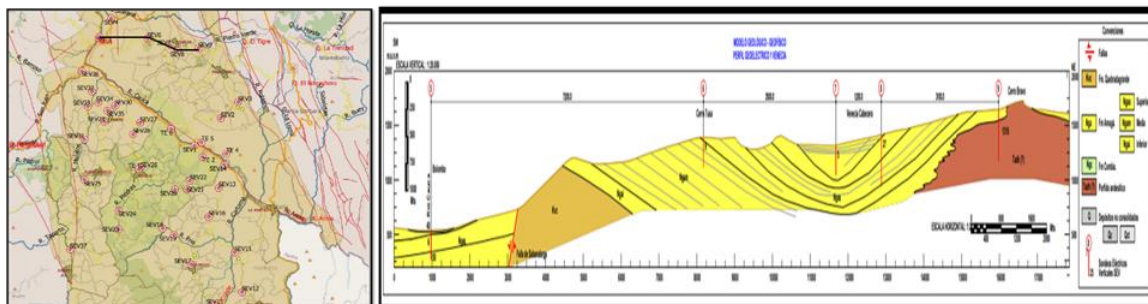


Figura 31. Localización del Perfil 1 – Venecia.

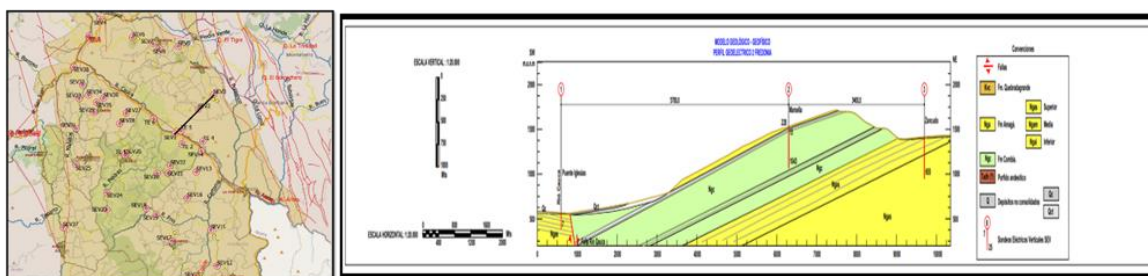


Figura 32. Localización del Perfil 2 – Fredonia.

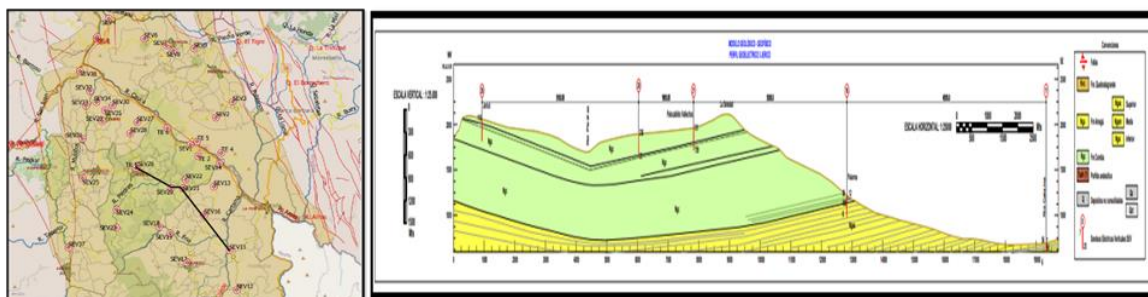


Figura 33. Localización del Perfil 3 -Jericó.

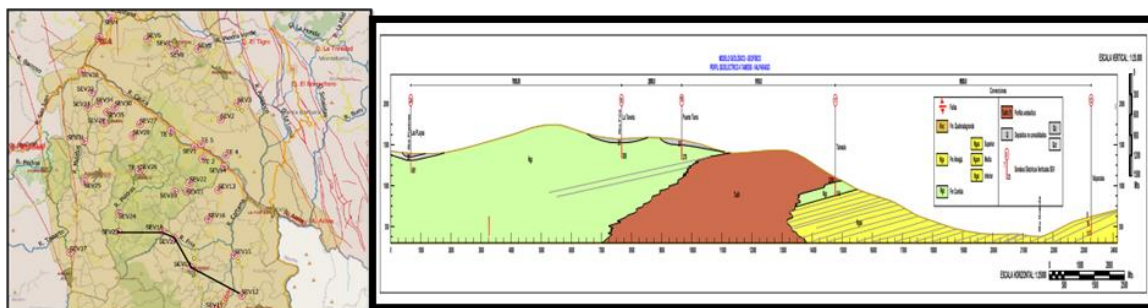


Figura 34. Localización del Perfil 4 -Támesis Valparaíso.

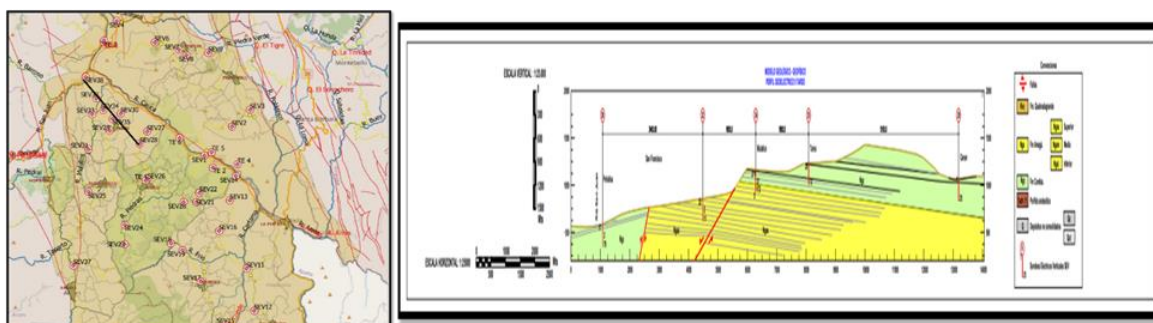


Figura 35. Localización del Perfil 5 – Tarso.

### 7.2.3 Consideraciones hidrogeológicas

En este trabajo se hicieron, basados en el modelo propuesto por Akanmu y Adewumi (2016), estimativos indirectos del coeficiente de permeabilidad en cada sondeo; según la profundidad de exploración alcanzada se calcularon valores estimados de transmisividad (Tabla 13).

Tabla 13. Valores estimados de Transmisividad a partir del espesor de capas de los SEV  
(Fuente: GEOFISIK, 2022)

SEV	K (m/día)	T (m2/día)	SEV	K (m/día)	T (m2/día)
1	0,09	0,10	20	0,29	6,06
2	0,27	4,90	21	12,52	626,01
3	5,92	88,82	22	1,36	81,78
4	0,08	1,58	23	0,07	6,54
5	0,07	1,77	24	0,07	2,90
6	0,06	0,48	25	0,06	4,33
7	0,06	0,24	26	4,67	172,75
8	0,08	0,51	27	0,07	0,13
9	0,06	5,12	28	0,06	5,83
10	0,15	5,95	29	0,06	1,57
11	0,08	0,55	30	0,13	5,66
12	0,14	1,42	31	0,08	3,88
13	0,09	1,04	32	0,06	0,77
14	0,07	0,74	33	0,08	3,59
15	0,07	0,82	34	0,18	13,86
16	0,11	4,27	35	0,09	1,33
17	0,12	1,17	36	0,06	4,93
18	0,82	1,17	37	0,08	0,77
19	0,37	3,70	38	0,09	3,74

### 7.3 RED FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los caminos que sigue el agua subterránea definen, de manera intangible, rutas que conectan la geografía de un territorio. La posición del nivel de agua en los puntos inventariados ha permitido definir una red, preliminar, que ponen en evidencia las conexiones que se establecen a través del mundo hidrogeológico. Esa red de flujo es uno de los elementos más importantes en la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual y a la vez posibilita el pensar acerca de las relaciones sociales que el agua subterránea puede generar; es esta la razón por la cual este resultado se plantea dentro de este apartado al que hemos denominado exploración socio-hidrogeológica.

Para cada punto de agua que fue objeto de la actividad del inventario se obtuvieron las coordenadas de localización y con base en ellas fue posible definir la altura aproximada, según la información disponible en el modelo digital de elevación de la zona de estudio; de esta forma se interpola la superficie de esa tabla de agua (Figura 36) y desde ella se trazan las líneas de flujo; el modelo hace evidente la continuidad que define el agua en su trayecto, conectando las distintas unidades geológicas.

El río Cauca se muestra como la principal zona de descarga de aguas subterráneas; son también claros los aportes de caudal base hacia las corrientes del Cartama y el San Juan. En la vertiente izquierda del río Cauca, hacia la parte suroccidental de la zona de estudio, se demarca una divisoria de aguas subterráneas entre los límites del municipio de Jardín con el municipio de Támesis, esa divisoria gira hacia el noreste marcando flujos de agua hacia los ríos Frio y Cartama -hacia el este- y hacia el río Piedras en sentido noroeste. Por último, entre los ríos Piedras y Mulatos se marca otra divisoria subterránea.

En la vertiente derecha, en cercanías al cerro Combia, en el municipio de Fredonia, se insinúa otra divisoria, a partir de la cual el flujo se dirige hacia el río Cauca y el río Poblano. En la zona donde la quebrada Sabaletas confluye con la quebrada Sinifaná, se observa una especie de sumidero, coincidiendo la localización de este rasgo con el sinclinal registrado en el corte geofísico 1 que se mostró arriba (Figura 31).

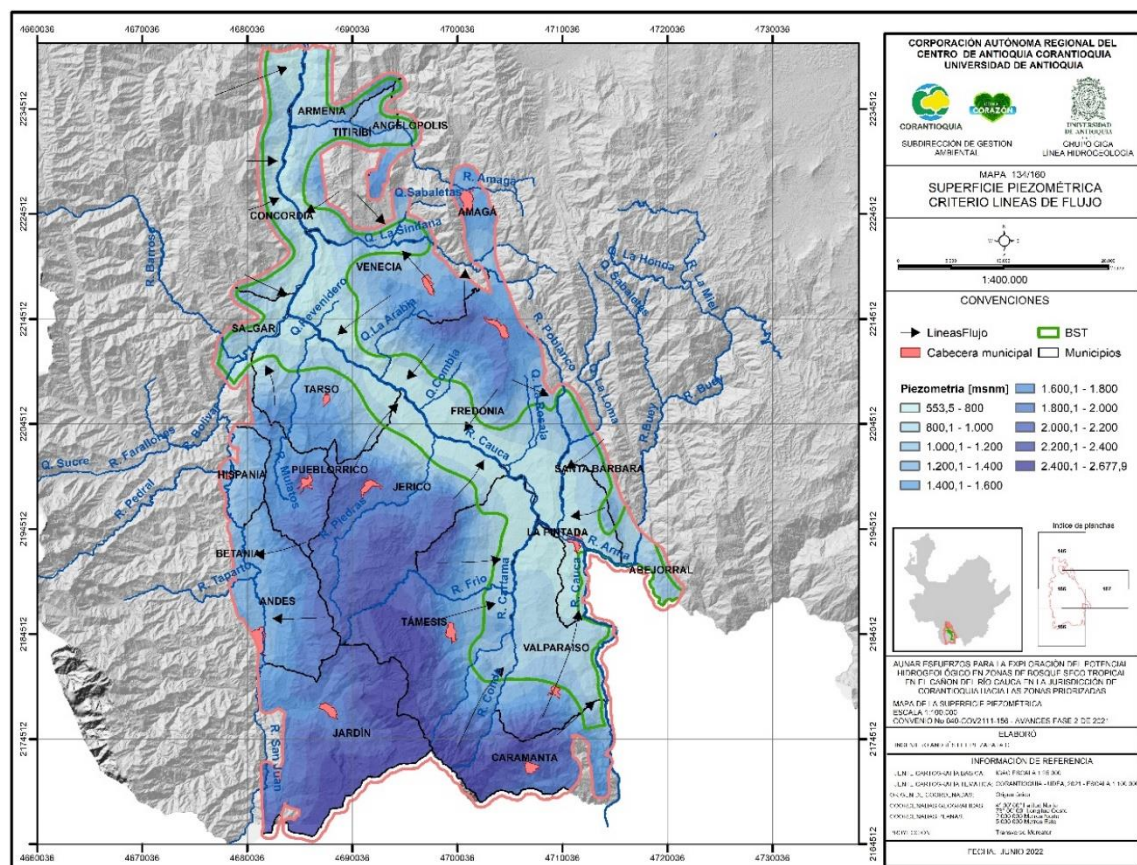


Figura 36. Superficie piezométrica y direcciones de flujo en la zona de estudio.

## 7.4 ACTORES CLAVE: LAS REDES DE CONECTIVIDAD HUMANA CON EL AGUA SUBTERRÁNEA

Dentro de las formas de concebir la gestión del conocimiento se encuentra la que tiene que ver con la inclusión de actores sociales que, a diferentes niveles, permiten un reconocimiento integral del territorio y sus complejidades alrededor del agua subterránea. Es así como para este estudio se ha reivindicado la idea de caminar de la mano con diferentes instituciones, grupos de interés y ciudadanos que directa o indirectamente tenían que ver con el agua subterránea, esto con el fin de reconocer las prácticas y el conocimiento asociado a este recurso que, en algunos municipios, aún resulta novedoso.

Hemos concebido el propósito de identificar y caracterizar esas redes de conectividad humana con el agua subterránea; aquellos actores claves que no solo acompañan el ejercicio de investigación con su conocimiento sobre los puntos de agua, sino con quienes también se tiene una conversación horizontal sobre las variables que, en campo, son fundamentales para entender mejor el movimiento del agua en la cotidianidad de quienes finalmente se benefician de ella.

El relacionamiento en campo con diversidad de organizaciones, comunidades y ciudadanía en general pone de manifiesto la importancia de poner en conversación el conocimiento académico con el conocimiento local, con las voces y sentires de los

habitantes de cada vereda, corregimiento o municipio que acompañaron el proceso. Esto representa una primera etapa de la primera puntada del tejido: saber quiénes viven el territorio, cómo son sus condiciones de habitabilidad y condiciones de vida y posteriormente, como sus prácticas cotidianas están asociadas de alguna forma al alguna que fluye por entre las rocas.

Posteriormente, se reconocen roles e intereses en función del conocimiento, cuidado y protección del acuífero y finalmente se establecen conexiones entre actores.

La realización del mapeo de actores inicia con un ejercicio de caracterización sociodemográfica, y de la revisión de información sobre organizaciones y grupos sociales.

También se realizan acercamientos a las administraciones municipales de los territorios, indagando acerca de las personas que tengan relación con el liderazgo social y ambiental y también, que puedan brindar información de contexto sobre la realidad en términos de abastecimiento de agua y conocimiento sobre recurso hídrico subterráneo.

Pero ¿qué es un actor social? Según Palacio (2015) un actor social en el marco de la planeación ambiental participativa, “puede ser un individuo o una organización social [...] que se define por sus identidades, propósitos e intereses, que se resuelven mediante la interacción social y con el entorno. El actor es una unidad relacional, es decir, se es actor en tanto se tiene una posición y un papel en un esquema relacional con pares y entidades heterogéneas del entorno”.



Dentro de la caracterización de actores clave, surge la categoría de sectores que representan el conjunto de actores agrupados que comparten algunas características orgánicas por su misión o visión o respecto a algún rol o interés.

La importancia del reconocimiento del territorio y sus dinámicas sociales, a través del relacionamiento y la caracterización de actores locales, representa un proceso fundamental a la hora de establecer estrategias de participación y comunicación intencionadas, acordes a cada sector y orientado a establecer roles e intereses de estos, tanto en la ejecución del proyecto como en la búsqueda de la sostenibilidad de este en el tiempo y en perspectiva, promover de mejor manera instrumentos y estrategias de conocimiento, gestión y planeación para la protección y conservación del agua subterránea, a través de la construcción de una cultura participativa.

Durante el proceso de identificación de actores se tienen en cuenta aquellos que, por su interés o rol dentro del territorio en temas ambientales o por su participación en la gestión y uso del recurso hídrico, puedan ser importantes para los procesos de socialización y articulación al proyecto en cuanto a la realización del inventario, la divulgación y apropiación del conocimiento sobre aguas subterráneas en el área de estudio y zona de influencia y la posible participación en las redes sociales que se definan y quieran implementarse.

La identificación de actores y sectores considera algunos criterios de inclusión, esto con el fin de priorizar aquellos que para cumplimiento de los objetivos del proceso se consideren claves:



- Sectores que desarrollen su actividad económica, social o política en el territorio del área de influencia y zona de estudio de proyecto

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---



- Actores que con relación al agua subterránea tengan una relación: regulación, gestión, uso actual o potencial o afectación.
- Actores que integran cada sector deben tener relaciones de regulación, gestión, uso actual o potencial y/o afectación, con el agua subterránea.

#### 7.4.1 Mapa de actores en la zona de estudio

En la Tabla 14 se presenta la descripción de actores clave identificados dentro de este estudio, considerando los criterios de sector, rol e interés. Es de resaltar que la calificación aquí descrita corresponde al cruce de los datos de información secundaria y primaria recolectados en campo y que tiene que ver principalmente, con los usos, alcances y amenazas identificadas a las aguas subterráneas, durante la realización de los recorridos de campo. Esto, conjugado con la lectura y análisis de los actores que hacen uso directo e indirecto del recurso y que, con sus acciones, podrían afectar o no potencialmente este bien natural.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Sector	Actor	Rol	Interés
Institucional	Administraciones Municipales – Secretarías de Ambientes y Secretarías de Planeación, UMATAS	Actor con competencias legales para la protección Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	Protección del agua subterránea; administración y regulación
	Empresas de servicios Públicos	Actor usuario directo del agua subterránea Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	Uso para la prestación de servicio público del acueducto
	Corporación Ambiental (Corantioquia)	Actor con competencias legales para la protección Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	Protección del agua subterránea; administración y regulación
Productivo	Comerciantes y pequeños productores	Actores usuarios directos del agua subterránea Actor con impacto potencial	Uso individual del agua en diferentes actividades económicas
	Empresas productoras	Actores usuarios directos del agua subterránea Actor con impacto potencial	Uso individual del agua en diferentes actividades económicas
Educativo	Instituciones Educativas urbanas y rurales	Actor con impacto potencial Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	Generación y difusión del conocimiento sobre el agua subterránea.
	Sedes Universitarias	Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	
Comunitario	Juntas de Acción Comunal	Actores usuarios directos del agua subterránea Actor con impacto potencial	Abastecimiento humano y doméstico protección del agua subterránea
	Juntas Administradoras del Acueducto	Actores usuarios directos del agua subterránea Actor con impacto potencial	Abastecimiento humano y doméstico. Administración y regulación
	Consejos de Cuenca	Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	Generación y difusión del conocimiento sobre el agua subterránea.
	Comunidades étnicas: Emberá Katíos (Andes, Ciudad Bolívar, Jardín, Pueblorrico, Támesis, Valparaíso) Emberá Chaamí (Emberá Katío),	Actores usuarios directos del agua subterránea Actor con impacto potencial	Abastecimiento humano y doméstico
	Guardabosques	Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	Generación y difusión del conocimiento sobre el agua subterránea.
	Mesas ambientales	Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría	Generación y difusión del conocimiento sobre el agua subterránea.
Comercial y de servicios	Hoteles	Actor usuario directo del agua subterránea	Abastecimiento humano y doméstico.
	Hosterías	Actor usuario directo del agua subterránea	Abastecimiento humano y doméstico.
	Parques Recreativos	Actor usuario directo del agua subterránea	Abastecimiento humano y doméstico.
Construcción e infraestructura	Concesionarios de vías	Actor con impacto potencial	Uso individual del agua en diferentes actividades económicas
	Parcelaciones	Actor usuario directo del agua subterránea Actor con impacto potencial	Abastecimiento humano y doméstico.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Sector	Actor	Rol	Interés
Minero	Empresas Mineras	Actor con impacto potencial	Uso individual del agua en diferentes actividades económicas
	Mineros artesanales	Actor con impacto potencial	Uso individual del agua en diferentes actividades económicas

**Tabla 14. Clasificación por roles e intereses de actores del proyecto.**

Fuente: Elaboración propia. Grupo GIGA (UdeA) - Corantioquia, 2022

En la Figura 37 se sintetiza el mapa de actores con roles e intereses para el proyecto.



**Figura 37. Síntesis del mapa de actores para el proyecto.**

#### 7.4.2 Diálogo de saberes: Una conversación visible sobre un universo esencial invisible

¿Cómo logramos que el ejercicio de exploración hidrogeológica en la zona de Bosque Seco, se incluya en las agendas ambientales locales? Es mediante el diálogo de saberes que se expresa un ejercicio de comunicación horizontal, donde a través de la pluralidad de creencias, valores y sistemas de conocimiento, comprendemos la realidad territorial y ambiental, en este caso del agua, desde diferentes perspectivas.

El diálogo de saberes consiste en una narrativa, en una forma de relacionarse que no impone el conocimiento científico en la conversación. Es un ejercicio de preguntas permanentes por las formas de ser y de habitar los caminos del agua, los usos del agua y las formas en cómo se conciben las amenazas que a las que se ve expuesto este recurso.

El relacionamiento con los actores clave estuvo orientado a fortalecer acciones y canales para el conocimiento de las aguas subterráneas en el territorio. El conocimiento se construye en doble vía: i) con los recorridos de campo donde los pobladores y guías

enseñan sobre sus experiencias en campo y ii) desde la aplicación de rutas metodológicas para la investigación y la gestión.

Lo que surge de este proceso dialógico es una serie de narrativas, convertidas en necesidades especiales de participación (en función precisamente de fortalecer el conocimiento) e interés de los actores en el proyecto que se resumen a continuación:

- **Conocimiento del agua subterránea: las formas de nombrar:** en el relato identificado en campo, se han evidenciado formas de nombrar el agua subterránea: “las aguas perdidas, ojos de agua, el afloramiento”. También las maneras en cómo se accede al recurso; las formas de “empezar” el agua del nacimiento, de recoger el agua que brota, de bombear desde el aljibe.
- **Conocimiento del agua subterránea para su inclusión en los procesos de planificación ambiental en los municipios:** en perspectiva se evidencia la necesidad de un diálogo más cercano entre comunidad, autoridades locales y autoridad ambiental, pues los nuevos retos de la región proponen tener conocimiento y herramientas de planificación para el agua subterránea en la zona
- **Conocimiento del agua subterránea, como estrategia de gestión de conflictos ambientales, asociados a la explotación y amenazas al recurso hídrico.** Comprender que el agua es el recurso vital, mediador de la interacción entre todos los seres de la naturaleza y que su cuidado es clave para el desarrollo de los territorios. Comprender las balanzas y las discusiones sobre los conflictos ambientales en la zona y generar espacios de diálogo, mediación y confianza.

Los escenarios que se propiciaron para materializar esta interacción incluyeron varios espacios de socialización, virtuales (Figura 38) y presenciales (Fotografías 7, Fotografías 8 y Fotografías 9), con colectivos de la región (Fotografías 7 y Fotografías 8) o empresas de servicio público (Fotografías 9), foros, etc. Los canales del dialogo se propiciaron y quedan abiertos, de su continuidad depende el devenir y la confianza futura. Reportes detallados de las jornadas de diálogo con los actores sociales de la región se encuentran en los anexos 1.2, 1.3 y 1.5 del documento soporte del Alcance 1 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA

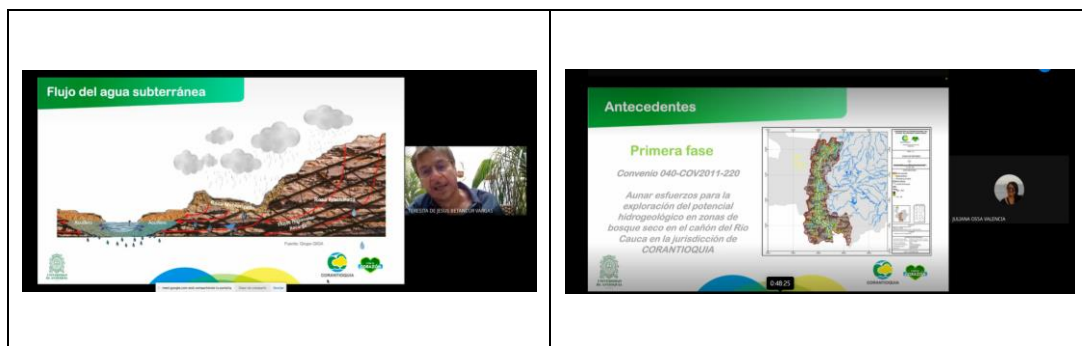


Figura 38. Capturas de pantalla de algunas socializaciones virtuales.

**TALLER SOCIALIZACIÓN FREDONIA**



**TALLER SOCIALIZACIÓN LA PINTADA**



**Fotografías 7. Talleres de socialización en Fredonia y La Pintada**

**TALLER SOCIALIZACIÓN JARDÍN I.E MIGUEL VALENCIA**



**Fotografías 8. Socialización en la Institución Educativa Miguel Valencia.**



**Fotografías 9. Socialización con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado ASSA**

## 8 CORRELACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA Y POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO

Es claro que acuífero se define como una formación hidrogeológica que permiten el almacenamiento y la circulación de agua en unas condiciones de calidad y cantidad que hacen posible, desde una perspectiva económica, su utilización para satisfacer necesidades humanas (Betancur et al., 2020); en línea con esta definición, tal y como se establece conceptualmente para este proyecto, sumando el interés relacionado con la sostenibilidad del ecosistema BsT la perspectiva del estudio de las aguas subterráneas se realiza bajo la visión del potencial hidrogeológico; teniendo en cuenta la relación agua roca bajo consideraciones geológicas (Verma et al., 2016; Hoque, 2017), hidrológicas y también ecosistémicas (Brkió, 2019), incluyendo la interacción de las aguas subterráneas con aguas superficiales y considerando zonas de recarga, tránsito y descarga (de Vries y Simmers, 2002; Harlow y Hagedorn, 2018; Mussa et al., 2020).

Según las condiciones de presión hidrostática a la que esté sometida el agua en un acuífero, estos se clasifican en: acuífero libre o acuífero confinado. Las formaciones sedimentarias, que normalmente están formadas por intercalación de capas permeables, semipermeables e impermeables, suelen tener el carácter de sistemas multicapa; es decir: existen capas con condición acuífera y otras no, y pueden existir niveles libres y niveles confinados.

La representación, mediante mapas, secciones transversales y maquetas tridimensionales, de los diferentes tipos de unidad hidrogeológica y la descripción de su potencial como reservorio de agua subterránea constituye un modelo hidrogeológico conceptual. Los elementos que constituyen el modelo comprenden la geometría de las diferentes unidades, las características de la recarga incluyendo las áreas, fuentes y magnitud de ella, la red de flujo, las propiedades hidráulicas como conductividad y transividad y la evaluación de la calidad.

En este capítulo se sintetiza el modelo hidrogeológico conceptual para la zona de estudio, ello con base en el establecimiento de unos criterios para la correlación que se sustentan en las características del sistema objeto de análisis. En el documento soporte del Alcance 2 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, se puede leer, en extenso, el análisis efectuado para lograr la correlación hidroestratigráfica y la síntesis de un primer modelo hidrogeológico conceptual.

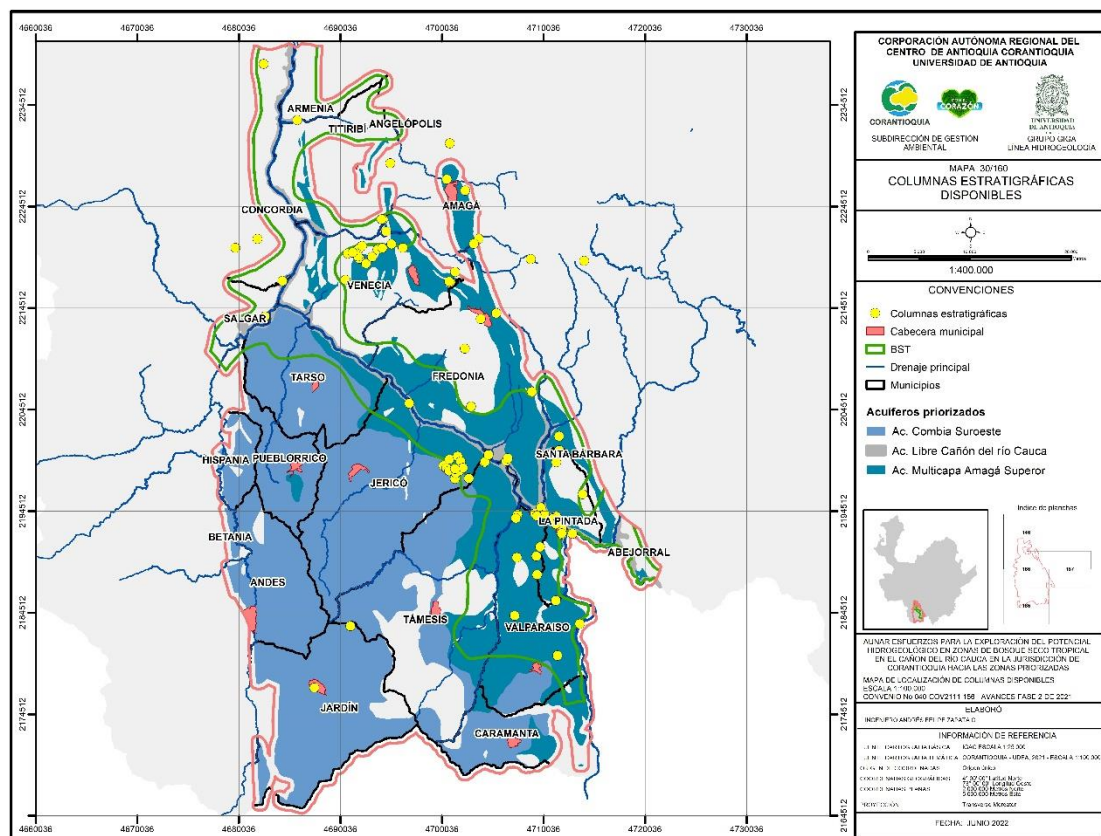
## 8.1 CORRELACIÓN

La correlación hidroestratigráfica, efectuada en esta región del suroeste de Antioquia, dio como resultado la identificación y definición de la geometría de las unidades priorizadas, y permitió definir e integrar otros elementos del modelo hidrogeológico conceptual, tales como la recarga, la capacidad de almacenamiento en los niveles permeables, las propiedades hidráulicas conocidas y las tendencias en el aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Para modelar geoespacialmente los resultados que describen la geometría de las unidades geológicas, hasta la profundidad de exploración alcanzada, y dentro de ellas los segmentos permeables se utilizaron herramientas geoinformáticas de análisis espacial. El proceso de correlación hidroestratigráfica siguió un derrotero que, según la información que logró recopilarse, se fue ajustando a partir de la ejecución y análisis de resultados, hasta obtener una representación con un claro significado físico.

Es necesario mantener clara la idea de que para este proceso de correlación se priorizaron tres unidades geológicas: El Miembro Superior de la Formación Amagá, la Formación Combia y los depósitos aluviales que las suprayacen.

Los estudios básicos para avanzar en la evaluación de la geología del subsuelo proceden de las publicaciones realizadas por el servicio Geológico Colombiano –SGC– y las investigaciones llevadas a cabo en las escuelas de geología de Antioquia. Por otra parte, en 2020 el SGC publicó el libro *Geology of Colombia*, dentro de él hay dos capítulos de especial importancia porque se refieren a la Formación Amagá (Silva-Tamayo et al., 2020) y a la Formación Combia (Weber et al., 2020); estos además de ser las referencias más completas y recientes, proporcionan una vasta lista de referencias bibliográficas en las cuales se podrían encontrar las primeras columnas que alimenten la correlación. Es así como producto de la revisión de más de 80 documentos se recopilaron 92 columnas estratigráficas (Figura 39) en las que se describen condiciones de la naturaleza del subsuelo, en la zona de estudio, con distintos niveles de profundidad; alcanzándose en pocos casos a identificar la posición del basamento. En el anexo 2.1 del documento soporte del Alcance 2 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, se han reunido las columnas estratigráficas interpretadas para este estudio.



**Figura 39. Localización de columnas estratigráficas disponibles a la fecha (Fuente: Elaboración propia).**

Si se referencia la definición de lo que es una unidad hidroestratigráfica es procedente iniciar la labor de clasificar las distintas capas de las secuencias litológicas, procedentes de las columnas recopiladas, en categorías cuya permeabilidad determine la condición en la que se puede dar el flujo de aguas subterráneas. Teniendo en cuenta la naturaleza de las unidades geológicas priorizadas, se definieron distintas categorías de permeabilidad, según se tuvieran depósitos del Cuaternario, rocas sedimentarias, unidades volcánicas o rocas duras. En la Tabla 15 se presentan los criterios y convenciones utilizadas para este fin.

**Tabla 15. Categorías y convenciones para la interpretación hidroestratigráfica (Fuete: Elaboración propia)**

Categoría	Número	Color	Código del color RGB		
Conglomerado	1		R:0	G:176	B:240
Conglomerado con material fino	2		R:47	G:84	B:150
Arenisca	3		R:0	G:112	B:192
Arenisca con arcillolita o lodolita/ arcillolita arenosa	4		R:0	G:32	B:96
Arcillolita y/o lodolita	5		R:191	G:143	B:0
Arcillolita (lodolita) fracturada	6		R:0	G:112	B:192
Aluvial	7		R:142	G:170	B:219

Categoría	Número	Color	Código del color RGB		
Coluvión o depósito de vertiente	8		R:118	G:113	B:113
Carbón	9		R:0	G:0	B:0
Toba	10		R:196	G:89	AB17
Lapilli, Cenizas	11		R:168	G:208	B:141
Aglomerado	12		R:226	G:239	B:217
Material orgánico, Suelo	13		R:92	G:69	B:0
Brecha	14		R:83	G:129	B:53
Ignimbritas, basaltos	15		R:128	G:96	B:0
Pórfidos, andesitas, esquistos, rocas duras	16		R:130	G:53	B:104
Sin información, sin descripción					

Teniendo en cuenta los criterios de correlación hidroestratigráfica descritos anteriormente, se agregaron espesores permeables en cada columna y según descripciones de las características texturales se establecieron límites máximos y mínimos de porosidad para contabilizar un volumen, probable, de unidad saturada y, dentro de ello, la capacidad posible de almacenamiento de agua.

### 8.1.1 Formación Amagá

En la Figura 40 se presenta una interpretación hidroestratigráfica de la sección tipo del Miembro Superior de la Formación Amagá. De acuerdo con esta descripción esta formación tendría una unidad somera (libre) con potencial hidrogeológico y varios niveles confinados que conformarían un acuífero confinado multicapa. Sin embargo, teniendo en cuenta que en algunos de los registros con los que se cuenta, en los niveles superiores se reportan espesores arcillosos de más de 10 m, al no ser posible, con la información disponible establecer límites de continuidad de ese primer manto permeable, se opta por conferir, de forma regional, el carácter de acuífero multicapa al Miembro Superior de la Formación Amagá.

El polígono que representa el Miembro Superior de la Formación Amagá cuenta con información de espesores de la unidad para 44 puntos, la zona con mayor cantidad de información geológica se ubica en la margen derecha del río Cauca hacia los municipios de Amagá, Fredonia y Venecia; en proximidades al curso del Cauca, en ambas márgenes la cantidad de observaciones es menor, hacia esas zonas se tuvieron en cuenta registros de Sondeos Eléctricos Verticales y tomografías, sin perder de vista las limitaciones que ello representa en términos de profundidad de exploración. De esta forma, los espesores obtenidos constituyen rangos hasta donde se tienen observaciones del subsuelo y en pocas ocasiones se alcanzó la base de la formación, por este motivo se resalta que las dimensiones pueden ser mayores a las reportadas en este documento.

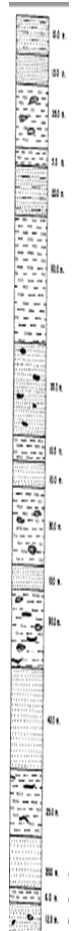
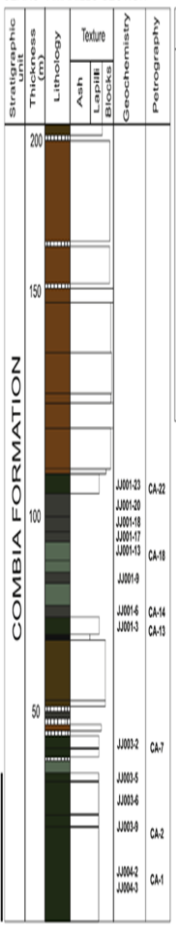
Columna	Espesor (m)	Descripción general (textural)	Composición	Porosidad	Permeabilidad	Estructuras	Hidroestratigrafía
	15	Arenisca gris verdosa con capas delgadas de arenisca arcillosa	NO DISPONIBLE	PRIMARIA	MEDIA	NO REGISTRADAS	Buen potencial acuifero
	13	Arenisca arcillosa de color gris, grano medio a grueso			MEDIA		
	25	Arcillolitas arenosas gris-verdosas, con concreciones calcáreas			MEDIA		
	5,5	Arcillolitas deleznales de color ocre			BAJA		Acuitardo
	20	Arenisca de color crema, grano medio, con capas delgadas intercaladas de arenisca arcillosa y arcillolita arenosa			MEDIA		Buen potencial acuifero
	50	Arcillolitas gris-verdosas y ocre			BAJA		Acuitardo
	35	Arenisca de grano medio a fino, con pequeñas concreciones ferruginosas			MEDIA		Buen potencial acuifero
	10,5	Arcillolitas deleznales de color ocre			BAJA		Acuitardo
	10	Arenisca de grano medio a grueso			MEDIA		Buen potencial acuifero
	30	Arcillolitas ocre y gris-verdosas con concreciones calcáreas y pequeñas capas intercaladas de arenisca gris de grano fino			BAJA		Acuitardo
	10	Arenisca amarilla de grano medio			MEDIA		Buen potencial acuifero
	30	Arcillolitas grises y ocre con concreciones calcáreas, capas de 0,5cm de arcillolita carbonosa			BAJA		Acuitardo
	42	Arenisca de grano fino, color crema muy alterada			MEDIA		Buen potencial acuifero
	25	Arcillolitas arenosas con capas delgadas de arcillolita carbonosa			BAJA		Acuitardo
	200	Arenisca amarilla de grano medio			MEDIA		Buen potencial acuifero
	6	Arcillolitas ocre y grises			BAJA		Acuitardo
	12	Arenisca de color crema, grano medio con concreciones ferruginosas aisladas			MEDIA		Buen potencial acuifero
		Miembro medio de la formación Amagá, arcillolitas arenosas con concreciones y lentes de siderita					

Figura 40. Interpretación hidroestratigráfica preliminar de la sección tipo del Miembro Superior de la Formación Amagá.

### 8.1.2 Formación Combia

En relación con la Formación Combia se presenta la columna tipo descrita por Barnet (2020) en Cerro Amarillo, de acuerdo con ella (Figura 41) se plantea la hipótesis de que, a escala regional Combia podría tener al menos dos niveles significativos, con potencial acuífero, el primero de carácter libre y el otro, por debajo normalmente de niveles de ceniza y/o tobas, confinado. Los límites profundos de la Formación Combia, bajo perspectiva hidrogeológica están por explorar, hasta ahora solo se puede bosquejar un modelo preliminar que abarca solo, máximo, los primeros 200 m de su espesor.

Columna	Espesor capa (m)	Descripción general (textural)	Composición	Porosidad	Permeabilidad	Estructuras	Hidro estratigrafía
 <p>CERRO AMARILLO SECTION</p> <p>COMBIA FORMATION</p>	3	Brecha de toba lapilli	No disponible	Primaria	ALTA	Buen potencial acuífero	
	90	Brecha piroclástica con pequeñas láminas de materia orgánica			ALTA		
	5	Ignimbrita			BAJA	No disponible	Acuitardo
	13	Andesita basáltica			BAJA		
	8	Andesita basáltica vesicular			BAJA		
	3	Andesita basáltica			BAJA		
	6	Andesita basáltica vesicular			BAJA		
	3	Andesita basáltica			BAJA		
	5	Ignimbrita			BAJA		
	1	Escoria			ALTA		
	18	Brecha de toba lapilli			MEDIA		Buen potencial acuífero
	3	Andesita basáltica			BAJA		Acuitardo
	3	Brecha piroclástica			ALTA		Buen potencial acuífero
	8	Ignimbrita			BAJA		Acuitardo
	4	Andesita basáltica vesicular			BAJA		
	40	Ignimbrita					

**Figura 41. Interpretación hidroestratigráfica preliminar de la sección tipo de la Formación Combia.**

La Formación Combia, que aflora en ambas márgenes del río Cauca y sobre las dos vertientes de la cuenca, tiene mayor continuidad y extensión hacia el Occidente. Para Combia se cuenta con pocas columnas estratigráficas disponibles; existen resultados de la interpretación de pruebas geoelectricas realizadas en Estudios de Impacto Ambiental y algunos de exploración hidrogeológica; para tratar de remediar esa escasez en el marco del presente proyecto se practicaron nuevos SEV; nuevamente hay que

anotar que la geofísica en zonas de topografía irregular tiene serias limitaciones en la profundidad de exploración que se logra. Para esta formación se realizaron ejercicios de modelación espacial en dos sentidos: 1. Buscando lograr una representación gruesa de la magnitud de esa unidad a escala regional, ello teniendo como evidencias algunos levantamientos geológicos disponibles y haciendo lecturas de los rasgos geomorfológicos que develan su presencia y sus dimensiones; en ese sentido se sumaron puntos con inferencias de profundidad; en la Tabla 16 se resumen los criterios tenidos en cuenta para modelar la geometría de la Formación Combia a escala regional. 2. A partir de los rangos de profundidad logrados mediante geoeléctrica se efectuó una modelación de los espesores explorados, para con base en ellos establecer unas dimensiones mínimas en relación con los niveles en los que se detecta la presencia de aguas subterráneas.

Los productos de la exploración geofísica se agregaron 46 descripciones a las siete columnas estratigráficas de las que se tenía registro, a partir de información documental, con ellas se efectuó la interpolación de las características geométricas para la Formación Combia.

El tamaño de píxel considerado para la modelación de los espesores, techo y base de Amagá y de espesores de Combia fue de 1.000\*1.000 metros.

**Tabla 16. Síntesis de criterios para la modelación espacial de los espesores de la Formación Combia a escala regional.**

1. La Formación Combia es una formación de tipo volcánico sedimentario que tiene continuidad espacial en toda el área de exposición.
2. La columna tipo exhibe un espesor cercano a los 1.000 metros.
3. La base de la Fm Combia es la Fm Amagá.
4. Las capas que la conforman tienen distribuciones paralelas con reducción del espesor hacia los ejes de los sinclinales que coinciden con los principales ríos de montaña (Mulatos, Piedras, Cartama, Sinifaná).
5. Las partes altas correspondientes al altiplano Jericó Pueblorrico, tienen espesores menores que las partes bajas asociadas a los ríos Cauca y san Juan (fronteras del dominio espacial de la Fm Combia).
6. El escarpe de Tarso Jericó Támesis está conformado por estratos de la Fm Combia y su altura define el espesor mínimo aproximado de la Formación.
7. Las zonas de contacto de la Fm Amagá y los intrusivos regionales, son zonas favorables para inferir espesores estimados y mejorar las distribuciones espaciales de isoespesores.
8. Los intrusivos regionales de la Fm Combia se hacen más anchos en profundidad.
9. En los contactos de la Fm Combia con los intrusivos de la región, el espesor de la Fm Combia tiene reducciones que varían linealmente hacia la zona de contacto.

10. La tendencia general de la variación de espesores de la Fm Combia es de SE a NW; siendo mayores al NW.

### 8.1.3 Depósitos aluviales

Los depósitos aluviales que se registran en la zona de estudio están asociados especialmente al río Cauca, la mayor extensión y los registros de que se disponen se concentran en el sur y hacia las áreas en los que estos se asocian a la confluencia con los ríos Poblano y Cartama.

Para los depósitos aluviales se alcanza a vislumbrar, en las zonas donde mejor están representados, niveles con alta permeabilidad, que en algunas zonas podrían llegar a constituir un medio libre más otro confinado (Tabla 17).

**Tabla 17. Interpretación hidroestratigráfica preliminar de una sección tipo de depósitos aluviales del río Cauca de la Formación Combia.**

Columna	Espesor	Descripción general (textural)	Composición	Porosidad	Permeabilidad	Estructuras	Hidroestratigrafía
Columna C65	0.5	Gravas y arenas	No disponible	Primaria	ALTA	No se registras	Acuífero Libre
	2.1	Arenas			ALTA		
	21.5	Gravas y arenas			ALTA		
	42.5	Arcillas			BAJA		Acuitardo
	33.4	Gravas			ALTA		Acuífero confinado

Para el caso de los depósitos aluviales, no se realizó modelación de espesores, ello debido a que la unidad tiene una distribución areal alineada, paralela al curso del Cauca, y los puntos para los que se tienen registros de profundidad, espesor y descripción textural no constituyen una muestra representativa para efectuar una interpolación confiable.

## 8.2 POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO

Con el fin de tener una mejor comprensión de la variabilidad espacial de las unidades acuíferas identificadas y teniendo en cuenta criterios de extensión, complejidad estructural, características geomorfológicas, direcciones de flujo del agua subterránea e interacciones con aguas superficiales según cuencas hidrográficas, se segmentó la zona de estudio en una serie de sistemas a los cuales se les llamó conjuntos hidrogeológicos, tal como se indican en la Tabla 18 y en el mapa de la Figura 42.

**Tabla 18. Conjuntos hidrogeológicos, sus cuencas y geología priorizada.**

Conjunto	Cuenca	Geología
Sinifaná	Sinifaná y Amagá	Amagá Superior, aluviales
Poblano	Poblano	Amagá Superior, Combia, aluviales
Cartama	Cartama	Amagá Superior, Combia, aluviales
Fredonia	Directos Cauca margen derecha	Amagá Superior, Combia, aluviales
San Juan	San Juan	Combia, aluviales
Piedras Mulatos	Piedras y Mulatos	Amagá Superior, Combia, aluviales
Concordia	Directos al Cauca	Combia, aluviales.



El conjunto hidrogeológico Sinifaná se localiza al Norte de la zona de estudio, si bien comprende jurisdicciones de los municipios de Titiribí, Armenia y Angelópolis, la mayor extensión y la priorización para este estudio se estableció sobre Amagá, Venecia y Fredonia. Además de los cascos urbanos de estos tres últimos, también incluye los corregimientos Camilo C, La Clarita y Minas de Amagá, La Mina de Venecia, y Palomos de Fredonia. Como conjunto hidrogeológico, esta zona está limitada por las divisorias de las cuencas superficiales de la quebrada Sinifaná al Sur, y del río Amagá al Norte; en este conjunto las marcas tectónicas de las Fallas Piedecuesta, Cascajosa y Amagá encuadran las unidades geológicas priorizadas, con mayor potencial hidrogeológico.



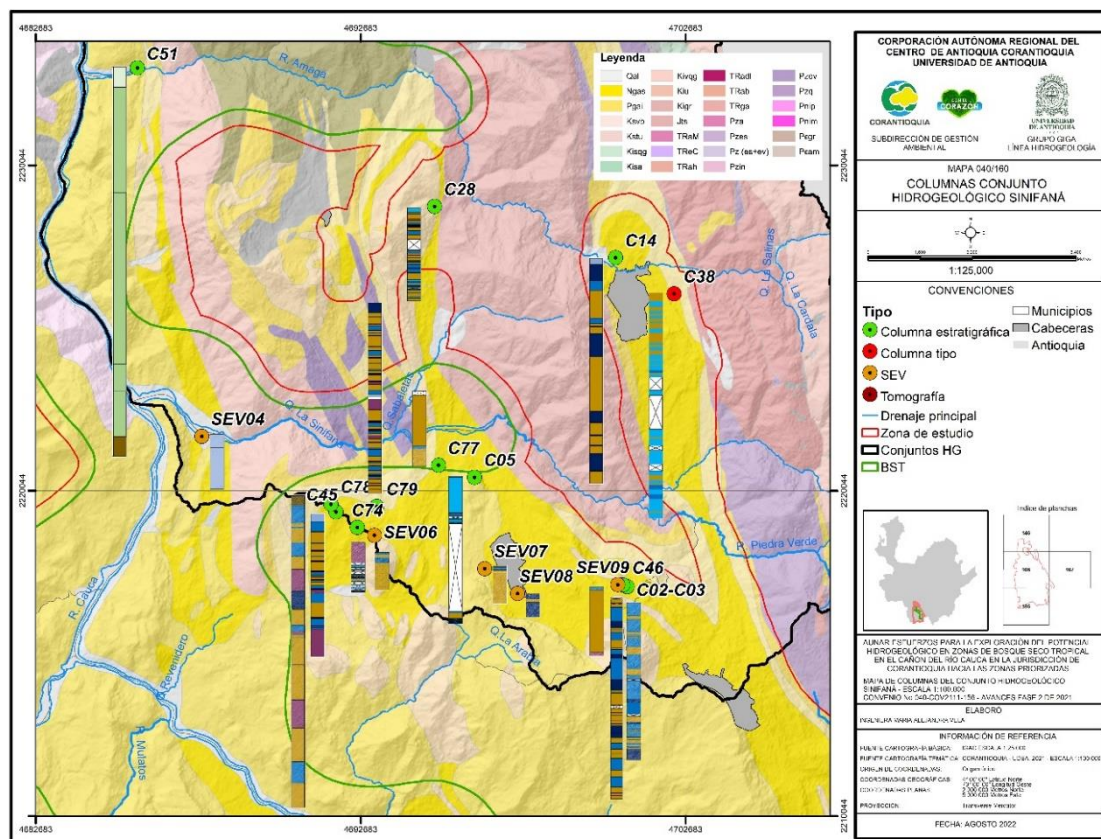


Figura 44. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Sinifaná.

### 8.2.1.1 Formación Amagá

El Miembro Superior de la Formación Amagá aflora en una extensión de 71 km<sup>2</sup>; si se cuenta su extensión total, debido a su presencia estratigráfica por debajo de la Formación Combia alcanzaría 80 km<sup>2</sup>.

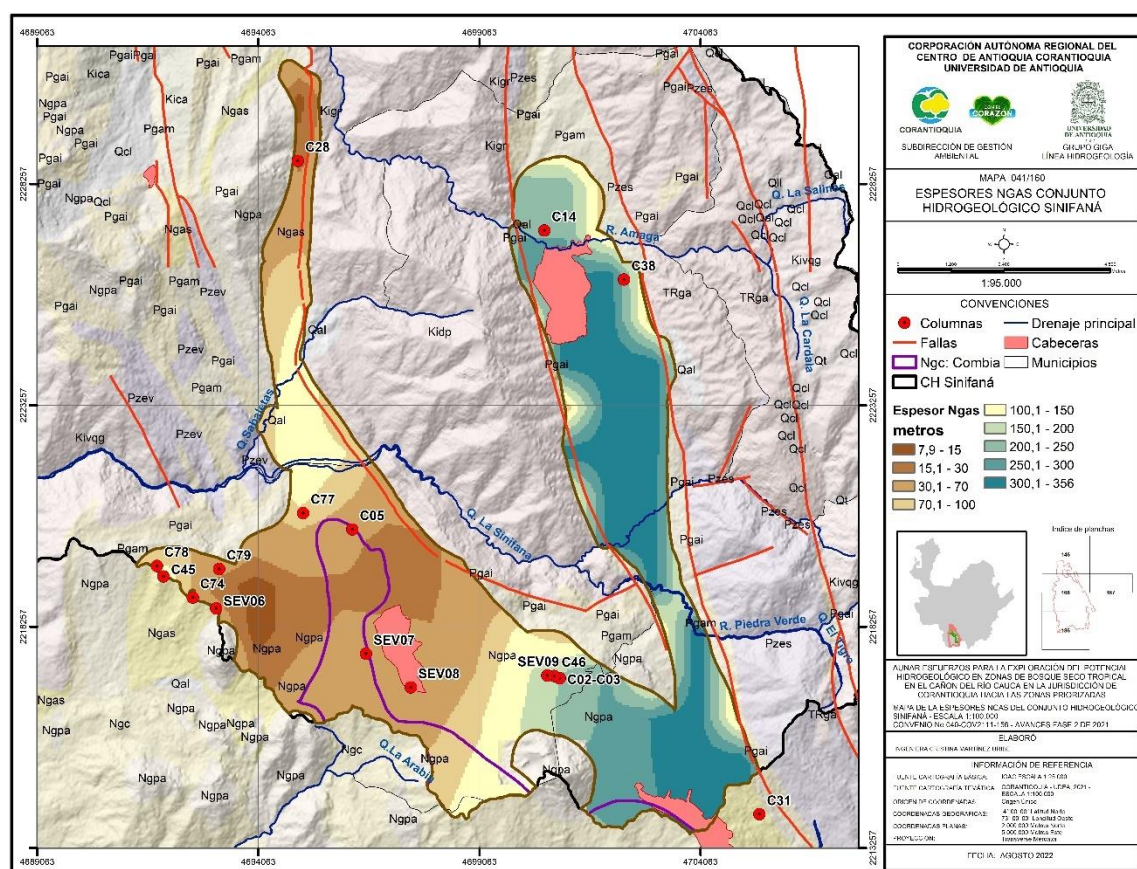
Con base en la interpretación hidroestratigráfica lograda a partir de once columnas geológicas y cuatro sondeos geoelectrónicos; se confiere, en este conjunto, al Miembro Superior de la Formación Amagá el carácter de acuífero multicapa, al estar formado por intercalación de capas de areniscas, lodolitas y arcillas de diferente espesor y con continuidad lateral variable. El número de niveles permeables identificados varía desde 2 capas hasta más de 13, ello depende de la profundidad de exploración alcanzada y del hecho de que, en casi ningún caso, se llegó al límite con la unidad que subyace. Hay columnas de más de 200 m y otras con menos de 50 m. En promedio el espesor de capas permeables, según información disponible, sería de 67 m (Tabla 19).

Tabla 19. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible y SEV (realizados para este estudio), en el conjunto Sinifaná

Columna	Espesor Columna	Espesor Acumulado Ngas Mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngas
C3-C2	190	162	4
C5	18.71	10.5	2
C14	244.5	92.9	3
C28	18	9	1

Columna	Espesor Columna	Espesor Acumulado Ngas Mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngas
C38	330	223	5
C45	204,5	107,5	4
C46	342	187	7
C74	15,7	5,44	2
C77	111,1	111,1	1
C78	53,7	26,7	1
C79	31,2	14,5	1
SEV6	55	15,9	1
SEV7	55	6	1
SEV8	35	35	1
SEV9	100	4,9	1

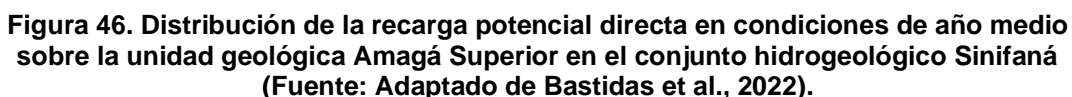
Como se observa en la Figura 45, los espesores del acuífero multicapa asociado al Miembro Superior de la Formación Amagá en el conjunto hidrogeológico Sinifaná disminuye en sentido este – oeste, registrándose valores superiores a 200 m en una franja Norte-Sur, decayendo a magnitudes entre 70 y 150 m al este del casco urbano de Venecia y registros, en promedio, menores a 50 m al oeste.



**Figura 45. Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia).**

A pesar de que no se conoce con certeza la posición del límite inferior; de acuerdo con las dimensiones de extensión y profundidad conocidas, si se tienen en cuenta las características texturales que se derivan de la descripción de la geología en las columnas localizadas en este conjunto, asumiendo una porosidad eficaz entre 5% y 20%

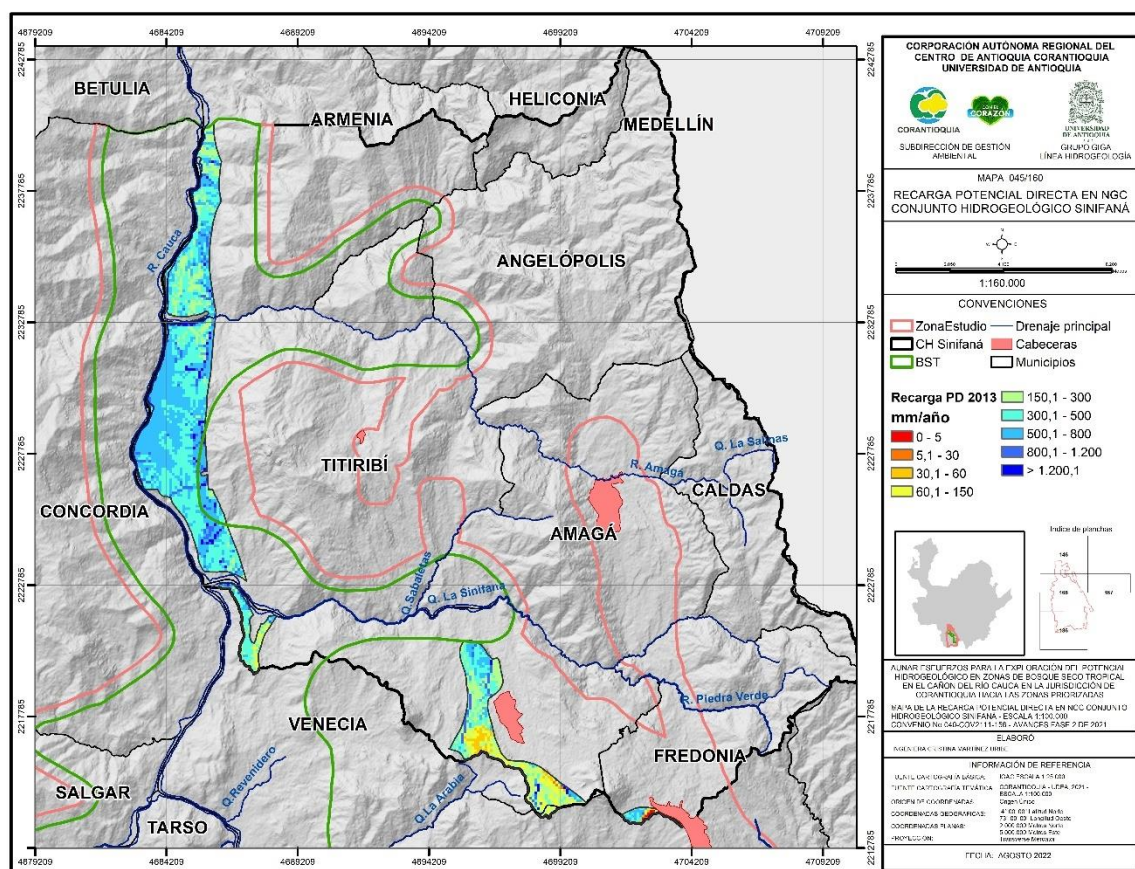
A partir del cálculo de la recarga potencial directa en un año medio obtenida mediante balance hídrico distribuido (Figura 46) (Bastidas et al., 2022), al acuífero multicapa Amagá ingresarían 18,5 millones de metros cúbicos de agua; sin embargo, para condiciones secas, como El Niño 2016, esta cifra podría caer a 0,0006 km<sup>3</sup> (623.000 m<sup>3</sup>).



105

### 8.2.1.2 Formación Combia

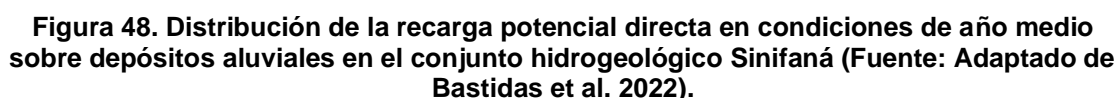
Dentro de este conjunto hidrogeológico, Combia tiene una superficie de 13 km<sup>2</sup>, distribuida en dos polígonos: uno hacia la parte central (9 km<sup>2</sup>) y un cuerpo alargado hacia el Occidente, paralelo al sentido del río Cauca (4 km<sup>2</sup>). Hasta el momento no se cuenta a esta escala con información para caracterizar hidroestratigráficamente esta unidad; sólo la columna C51, cerca al río Cauca, muestra un espesor de 600 m con más del 50% correspondiente a material permeable tipo lapilli y aglomerados. A partir de los resultados que se presentan en la Figura 47, según datos regionales de recarga (Bastidas et al., 2022) la recarga en año medio podría ser de hasta 17,7 millones de metros cúbicos; no obstante, en un año El Niño podría no alcanzar más de 63.000 m<sup>3</sup>.



**Figura 47. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Adaptado de Bastidas et al. 2022).**

### 8.2.1.3 Depósitos aluviales

La presencia de depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Sinifaná se limita a una extensión cercana a 4 km<sup>2</sup>. Ellos se localizan en la parte baja de la quebrada Sinifaná y el río Amagá, el espesor podría sobrepasar los 80 m. Los cálculos preliminares que se tienen de recarga (Figura 48) sumarían un ingreso de agua subterránea a esta unidad en año medio de 2,2 millones de metros cúbicos, y menos de



La superficie piezométrica preliminar (Figura 49), que se modela a partir de información del inventario de puntos de agua, insinúa el sentido del flujo del agua subterránea. Como evidencia del aprovechamiento del agua subterránea en este sector; en el inventario de puntos de agua se reporta la existencia de 4 aljibes, 75 manantiales, un piezómetro y siete galerías. La mayoría de estos puntos se encuentran sobre la Formación Amagá: 4 aljibes, 1 pozo y 38 manantiales; sobre Combia: 7 manantiales y 7 galerías; a la fecha solo se ha inventariado un manantial en depósitos aluviales. Los otros puntos se encuentran sobre rocas duras. Los caudales de extracción son de hasta 1,77 l/s en Combia (Figura 50), según se estima a partir de las propiedades geofísicas evaluadas en los SEV, los caudales de extracción serían de, a lo sumo, 1,0 l/s en Amagá y entre 1 y 10 l/s desde el aluvial.

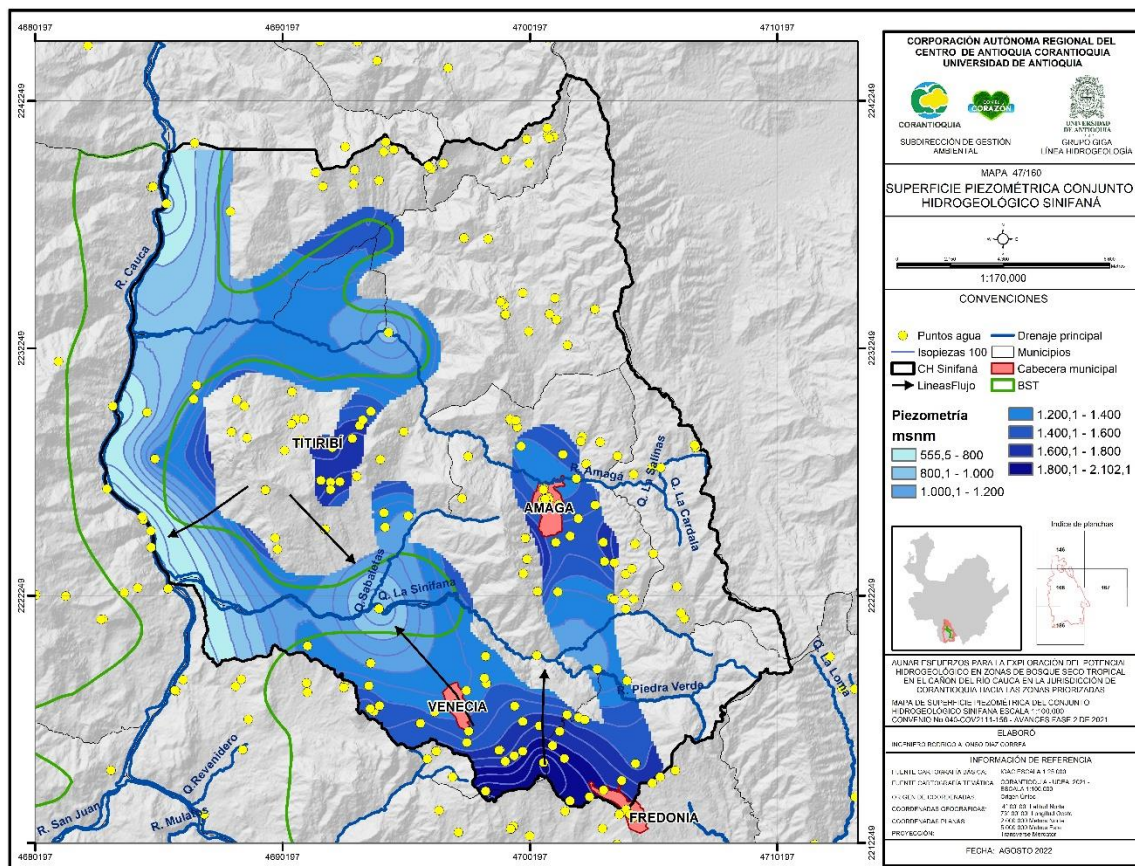
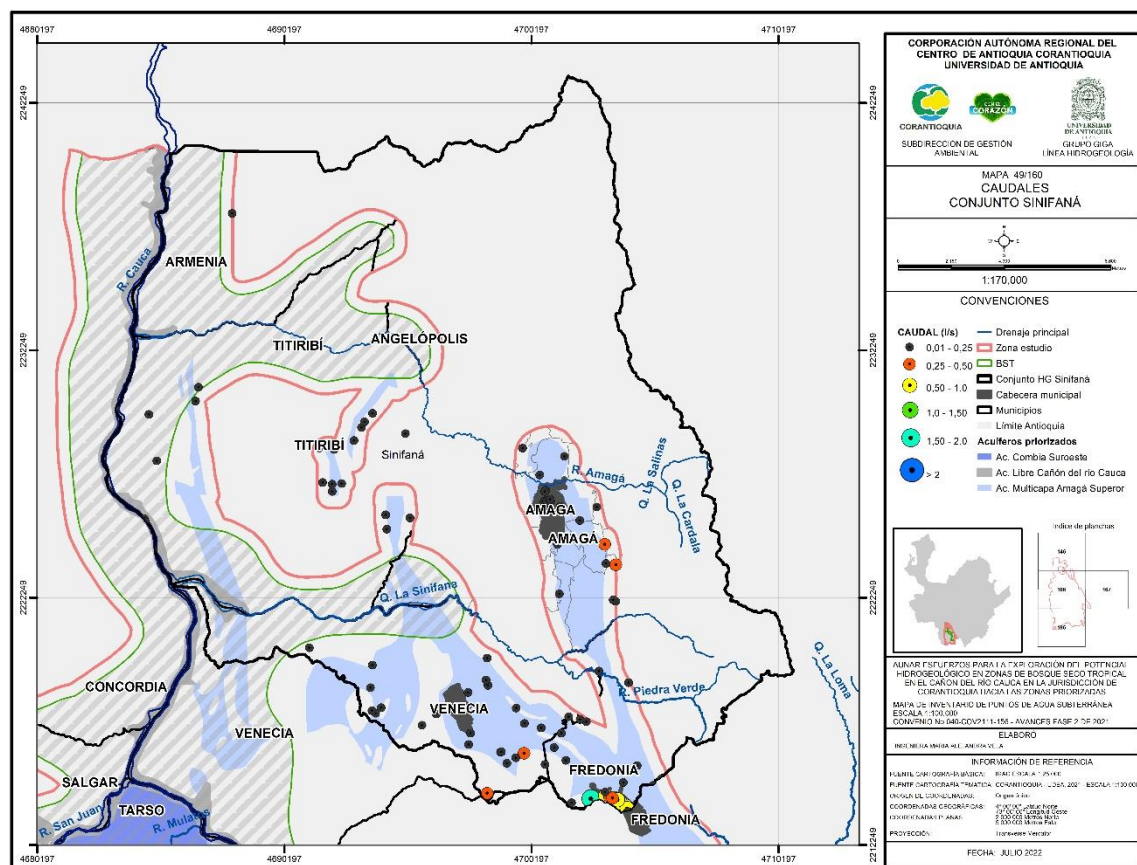


Figura 49. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia).

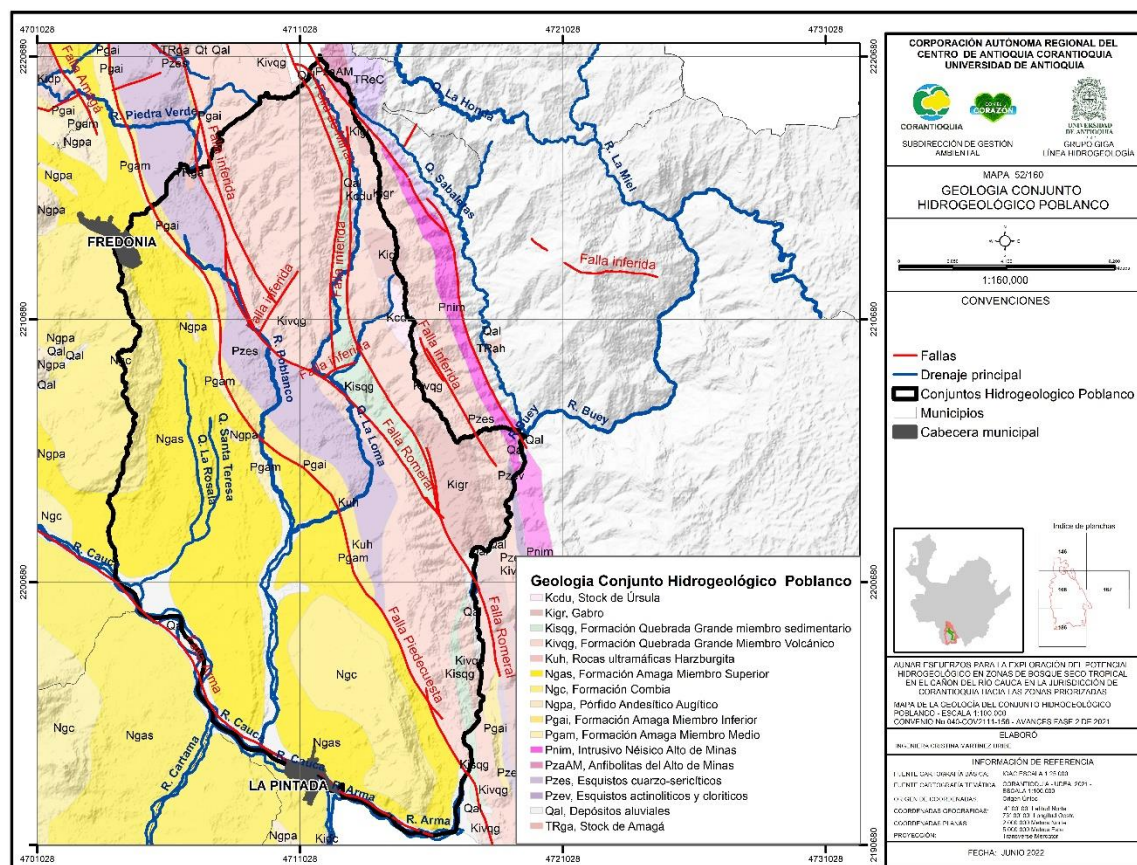


**Figura 50. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia).**

Entre los principales usos dados al agua subterránea en este conjunto, sobresale el uso doméstico, seguido del agropecuario y luego abastecimiento público. Las galerías en Cerro Combia tienen propósito de estabilidad de suelos, pero ocasionalmente el agua que se drena desde ellas se utiliza para diferentes propósitos como uso doméstico. Según análisis de calidad realizados, el agua subterránea en esta región posee condiciones adecuadas para usos agrícola e industrial, no así para consumo humano.

## 8.2.2 Conjunto hidrogeológico Poblano

El conjunto hidrogeológico Poblano se localiza al este de la zona de estudio y sobre la margen derecha del río Cauca, dentro de él se encuentra parte de los cascos urbanos de los municipios de Fredonia y La Pintada, incluye también los corregimientos de El Zancudo, Marsella, Puente Iglesias y La Mina en Fredonia; y Damasco en Santa Bárbara. Los límites que enmarcan este conjunto comprenden la divisoria de la parte alta del río Poblano, al Norte; el límite con el departamento de Caldas, al Oriente; el río Cauca, al Sur, y la divisoria oeste de corrientes directas al Cauca en el flanco oriental del Cerro Combia. Las unidades de interés hidrogeológico priorizadas para este conjunto se encuentran al Suroeste de la Falla Piedecuesta, rasgo estructural de relevancia regional, como frontera hidrogeológica (Figura 51).



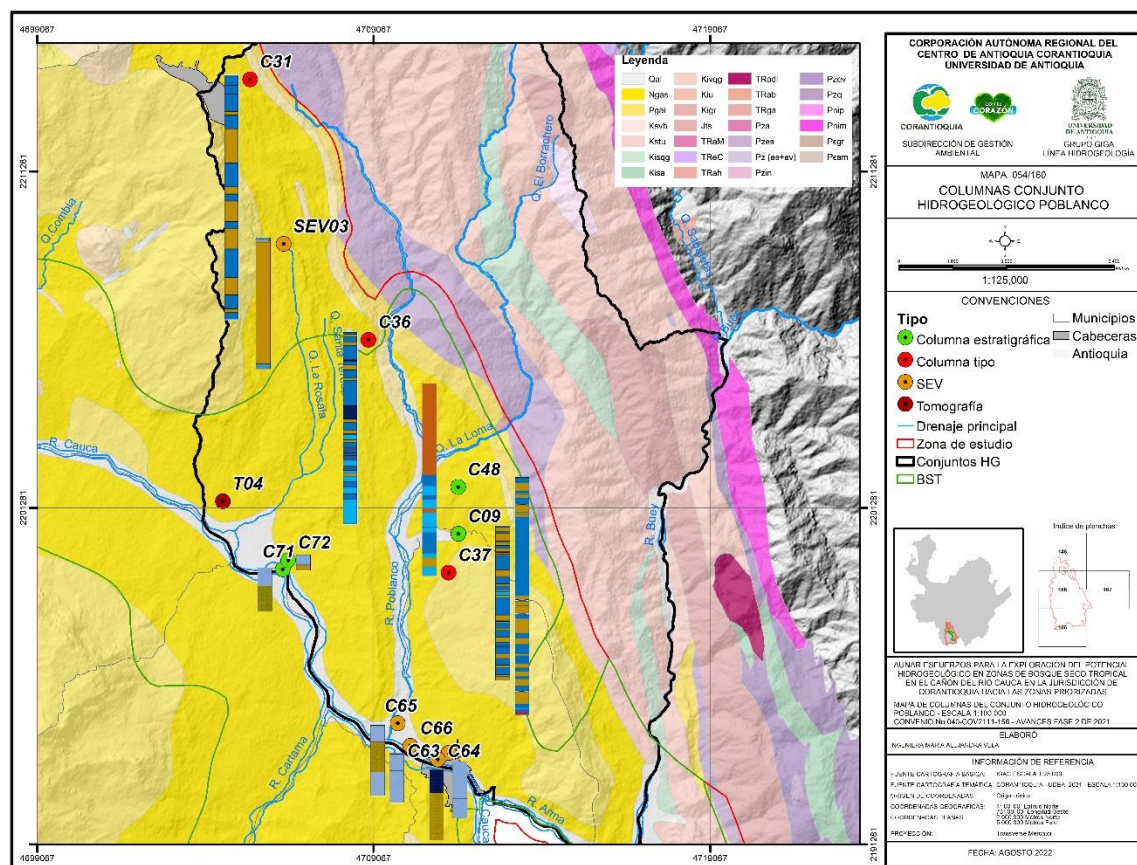


Figura 52. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Poblano.

### 8.2.2.1 Formación Amagá

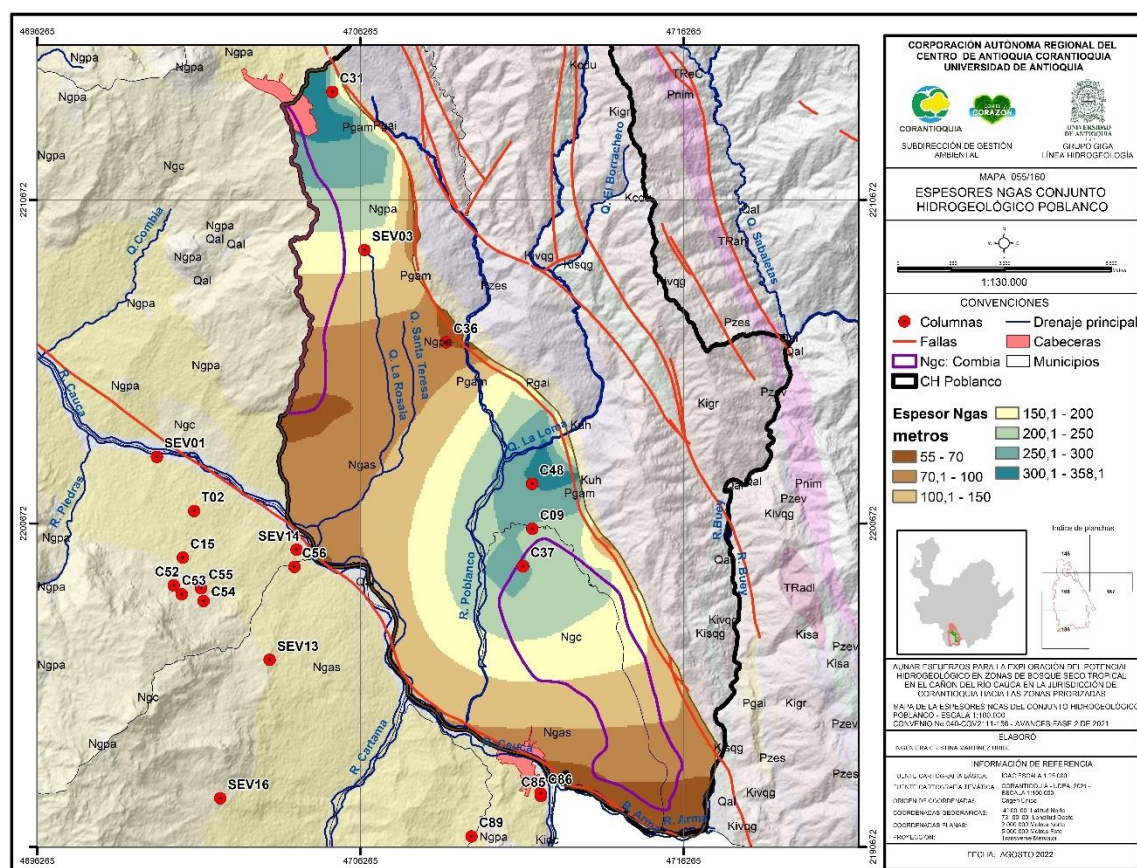
El Miembro Superior de la Formación Amagá aflora en una extensión de 113 km<sup>2</sup>; si se cuenta su extensión total, debido a su presencia estratigráfica por debajo de la Formación Combia alcanzaría 142 km<sup>2</sup>.

Con base en la interpretación hidroestratigráfica lograda a partir de cinco columnas geológicas y un sondeo geoelectrico, que se encuentran dentro de este conjunto, pero que se correlacionan con información adicional disponible a escala regional y que trasciende hacia los conjuntos hidrogeológicos vecinos; se confiere, en este conjunto, al Miembro Superior de la Formación Amagá el carácter de acuífero multicapa, al estar formado por intercalación de capas de areniscas, lodolitas y arcillas de diferente espesor y con continuidad lateral variable. El número de niveles permeables identificados llega a ser hasta de ocho, ello depende de la profundidad de exploración alcanzada y del hecho de que, en casi ningún caso, se llegó al límite con la unidad que lo subyace. Hay columnas de hasta 350 m y otra que solo alcanza 70 m. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el espesor de capas permeables sería en promedio de 135 m (Tabla 20).

**Tabla 20. Síntesis de características hidroestratigráficas del Miembro Superior de la Formación Amagá según información disponible y SEVs (realizados para este estudio) en el conjunto Poblancó.**

Columna	Espesor Columna	Espesor Acumulado Ngas Mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngas
C9	218,1	196,8	3
C31	359	213,5	6
C36	70	70	1
C37	273	130	2
C48	331	210,2	8
SEV3	180	11,44	2

Como resultado de la modelación espacial regional, en la Figura 53 se observan los espesores del acuífero multicapa asociado al Miembro Superior de la Formación Amagá en el conjunto hidrogeológico Poblancó; de acuerdo con esta distribución se registra disminución en sentido Este – Oeste desde el río Poblancó y en sentido Norte – Sur desde Fredonia, los valores resultantes oscilan desde 300 m y entre 50 m y 100 m.



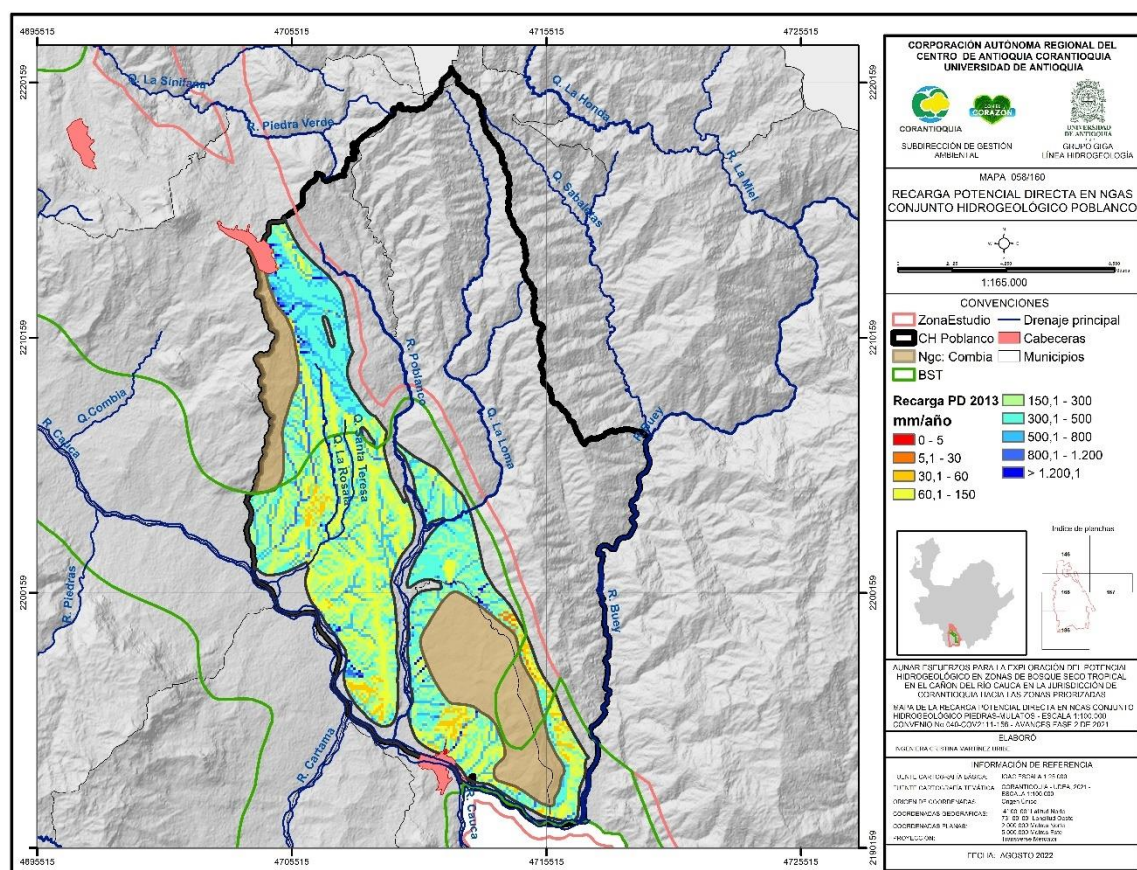
**Figura 53. Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Poblancó (Fuente: Elaboración propia).**

A pesar de que no se conoce con certeza la posición del límite inferior del Miembro Medio de la Formación Amagá en el conjunto Poblancó, si se tienen en cuenta las características texturales que se derivan de la descripción de la geología en las columnas localizadas en este conjunto, asumiendo una porosidad eficaz mínima entre 5% y 20% y considerando los valores de espesores permeables, se obtendrían

volúmenes de agua almacenada entre 0,6 y 2,2 km<sup>3</sup>; no obstante, si se tiene en cuenta que a profundidad los poros se cierran y que la porosidad eficaz va perdiendo la condición de equivalencia con el coeficiente de almacenamiento, será necesario asumir rangos diferenciales según profundidad.

A partir del cálculo de recarga (Figura 54) obtenido mediante balance hídrico distribuido (Bastidas et al., 2022), para un año medio, se estima que el volumen de agua que, como recarga potencial directa, ingresaría al sistema hidrogeológico a través del Miembro Superior de la Formación Amagá sería 29,5 millones de metros cúbicos; sin embargo, en un periodo de intensa sequía como El Niño de 2016 podrían llegar solo 0,0004 km<sup>3</sup> (430.000 m<sup>3</sup>).

No se encontraron reportes de pruebas hidráulicas para la Formación Amagá en este conjunto.

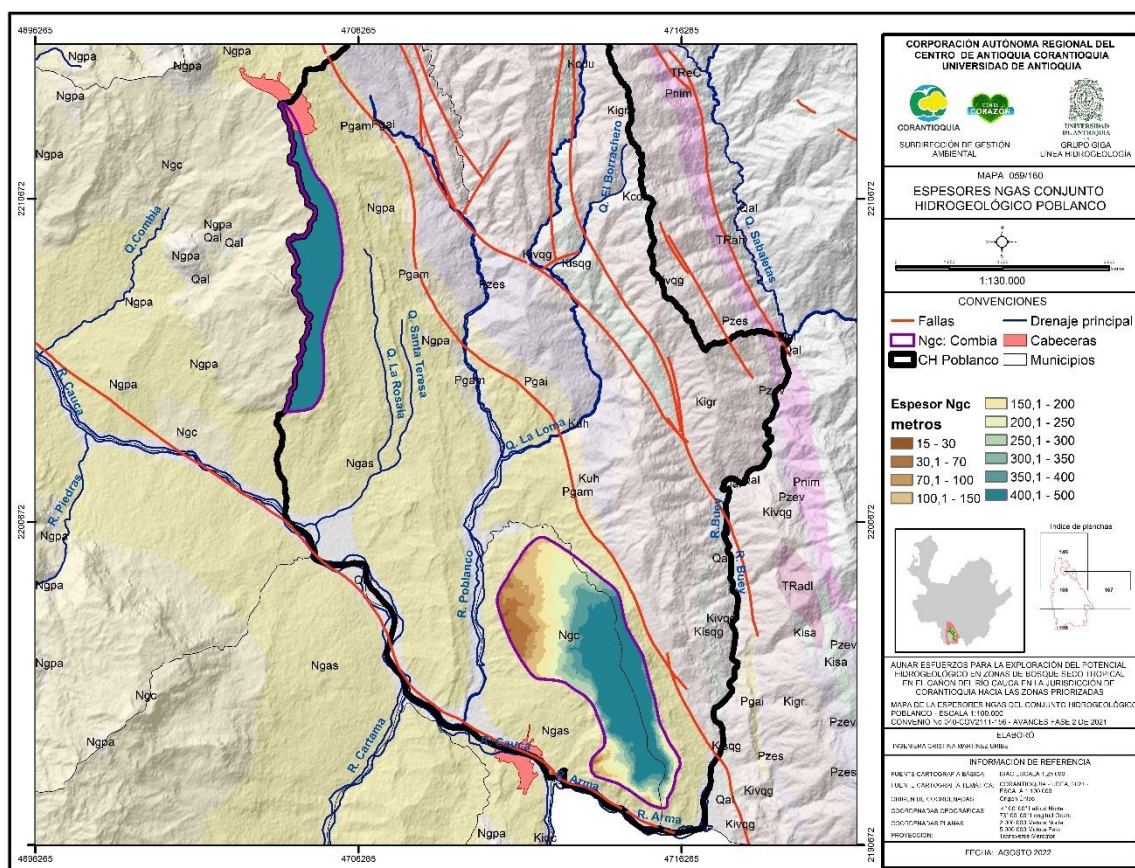


**Figura 54. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Poblancó (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

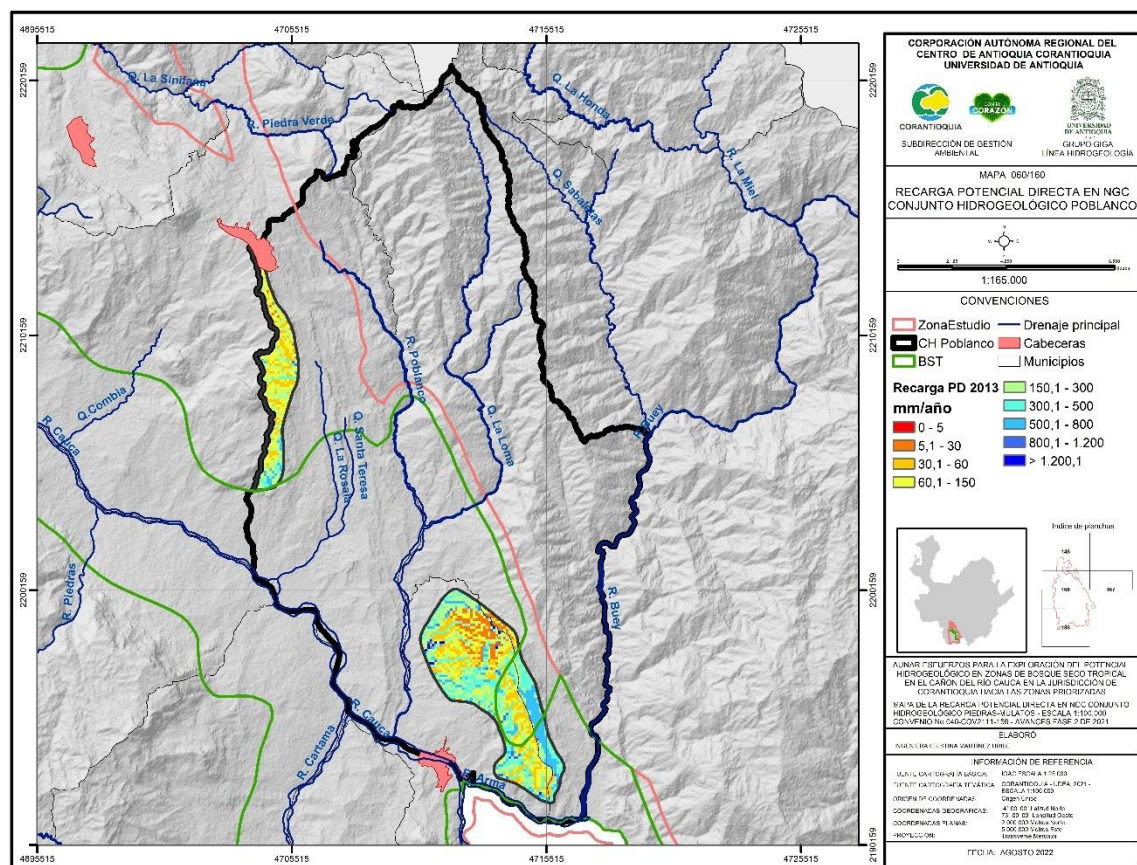
### 8.2.2.2 Formación Combia

De acuerdo con las expresiones de presencia de la Formación Combia dentro de este conjunto hidrogeológico (tiene una superficie de 29 km<sup>2</sup>) registradas en el flanco oriental del Cerro Combia en Fredonia y en Cerro Amarillo en La Pintada, se hace clara la

ocurrencia de al menos dos capas de material volcano sedimentarios con condiciones de porosidad y permeabilidad que favorecen el flujo de las aguas subterráneas. Los espesores de Combia dentro de esta zona alcanzan hasta 500 m (Figura 55); según cálculos realizados para evaluar la recarga potencial directa distribuida sobre Combia (Figura 56), esta unidad recibiría anualmente casi 7 millones de metros cúbicos de agua, magnitud que en época seca decaería a 0,00013 km<sup>3</sup> de agua (132.000 m<sup>3</sup>). Según interpretación geofísica se estima un valor de conductividad hidráulica de 5,92 m/día y una transmisividad del orden de 85 m<sup>2</sup>/día.



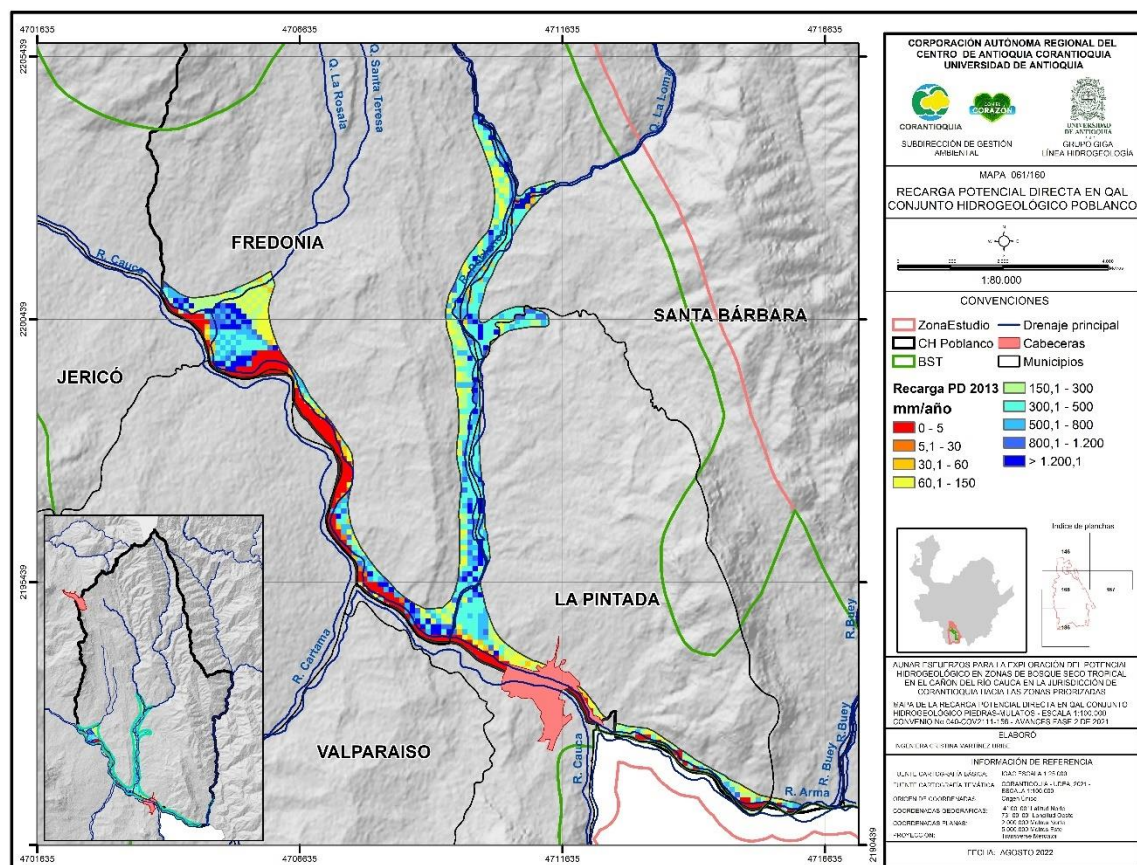
**Figura 55. Espesor del acuífero Combia en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 56. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

### 8.2.2.3 Depósitos aluviales

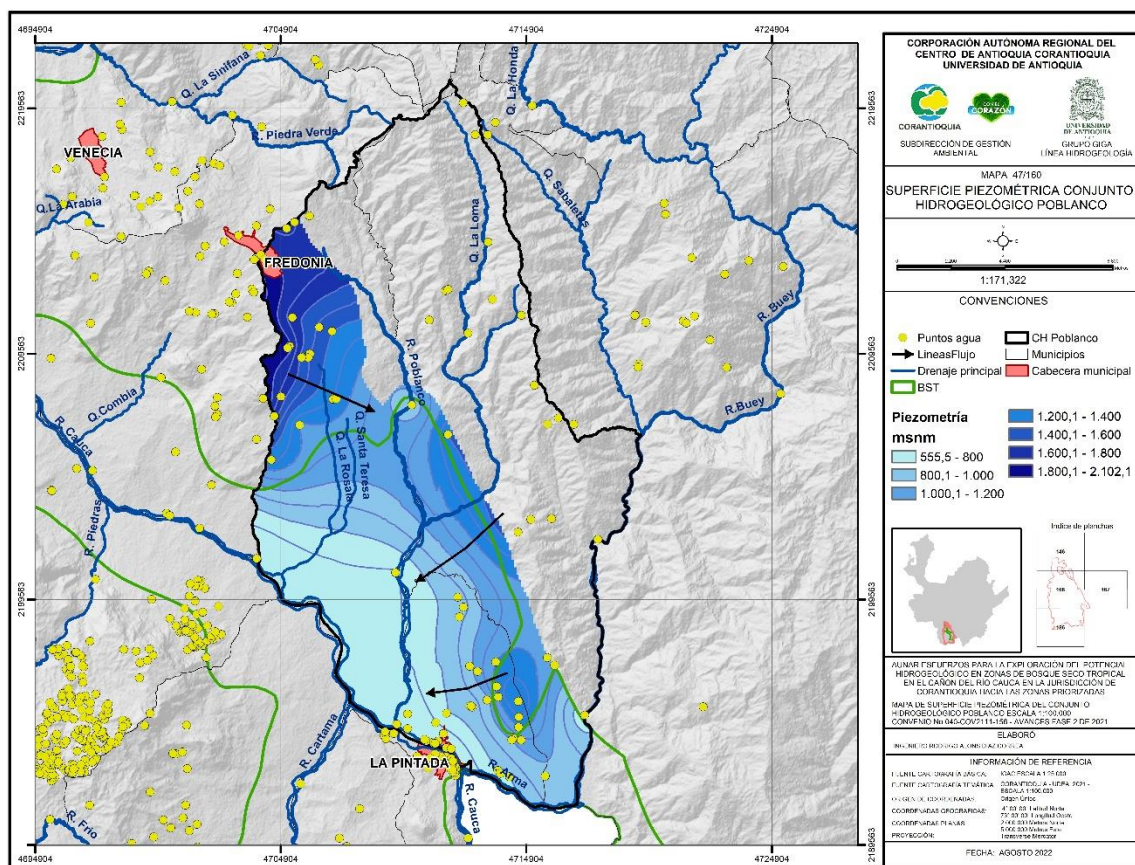
En este conjunto afloran los depósitos aluviales de los ríos Poblano y Cauca y de la quebrada La Rosalía. A lo largo de los 12,61 km<sup>2</sup> en que aflora existirían un acuífero libre y uno confinado (C65). La recarga potencial directa (Figura 57), según balance hídrico distribuido (Bastidas et al. 2022) sería, en año medio del orden de 5,5 millones de metros cúbicos, en un período El Niño podría no llegar a más de 0,00007 km<sup>3</sup> (66.800 m<sup>3</sup>). Tendría una transmisividad de más de 250 m<sup>2</sup>/día, con conductividad hidráulica de 3,6 m/día



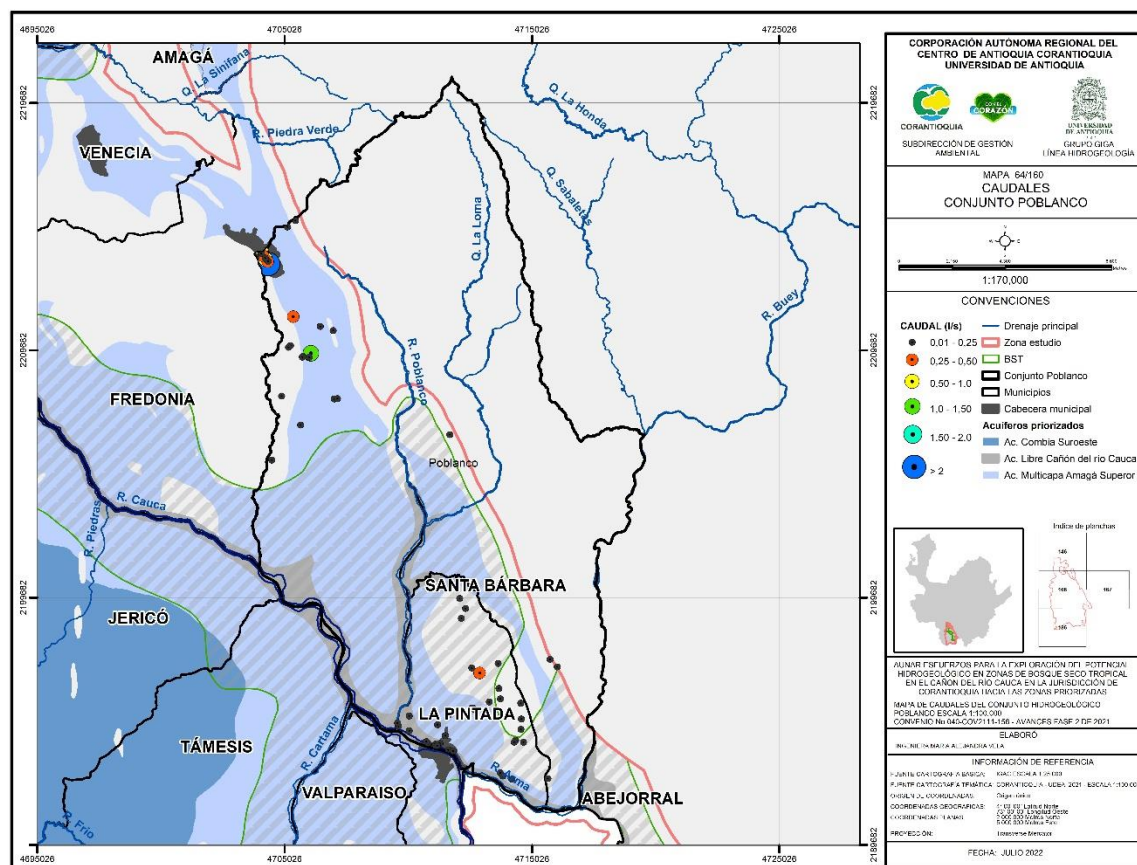
**Figura 57. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

#### 8.2.2.4 Superficie piezométrica y aprovechamiento de agua subterránea

Una superficie piezométrica regional preliminar fue modelada, a partir de los datos recopilados durante el inventario de puntos de agua; de acuerdo con ella los acuíferos emplazados sobre las Formaciones Amagá y Combia (Figura 58) aporta caudal base a los cauces de El Poblano y el Cauca. Como evidencia del aprovechamiento del agua subterránea en este sector; en el inventario de puntos de agua se reporta para todo el conjunto Poblano la existencia de 13 aljibes, 38 manantiales, un pozo, dos piezómetros y seis galerías. En la Formación Amagá se identificaron tres aljibes, 18 manantiales y dos piezómetros, en la Formación Combia: 6 galerías y 20 manantiales; en los aluviales se levantaron 10 aljibes, un manantial y un pozo. Los caudales de extracción medidos, alcanzan a registrar más de 5,68 l/s, esto en la Formación Amagá; según se estima a partir de las propiedades geofísicas evaluadas en el SEV 3, desde los niveles someros del Miembro Superior de la Formación Amagá se podrían extraer entre 10 y 50 l/s.



**Figura 58. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Poblano (Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 59. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Poblancito (Fuente: Elaboración propia).**

Entre los principales usos dados al agua subterránea en este conjunto, predominan los uso doméstico y agropecuario. Las galerías en Cerro Combia tienen propósito de estabilidad, pero ocasionalmente el agua que se drena desde ellas se utiliza para diferentes propósitos. Según análisis de calidad, el agua subterránea de esta región posee condiciones adecuadas para usos agrícola e industrial, no así para consumo humano.

### 8.2.3 Conjunto hidrogeológico Fredonia

El conjunto hidrogeológico Fredonia se localiza al centro de la zona de estudio sobre la margen derecha del río Cauca; en él hacen parte zonas rurales de los municipios de Fredonia y Venecia, conteniendo los corregimientos Marsella y La Mina de Fredonia y Bolombolo de Venecia. Como conjunto hidrogeológico esta zona está limitada por el río Cauca al Occidente y al Sur, en el tramo controlado estructuralmente por la falla Arma y al Norte y Oriente por las divisorias de las cuencas directas al Cauca, entre las quebradas Sinifaná y Rosalía (Figura 60).

119

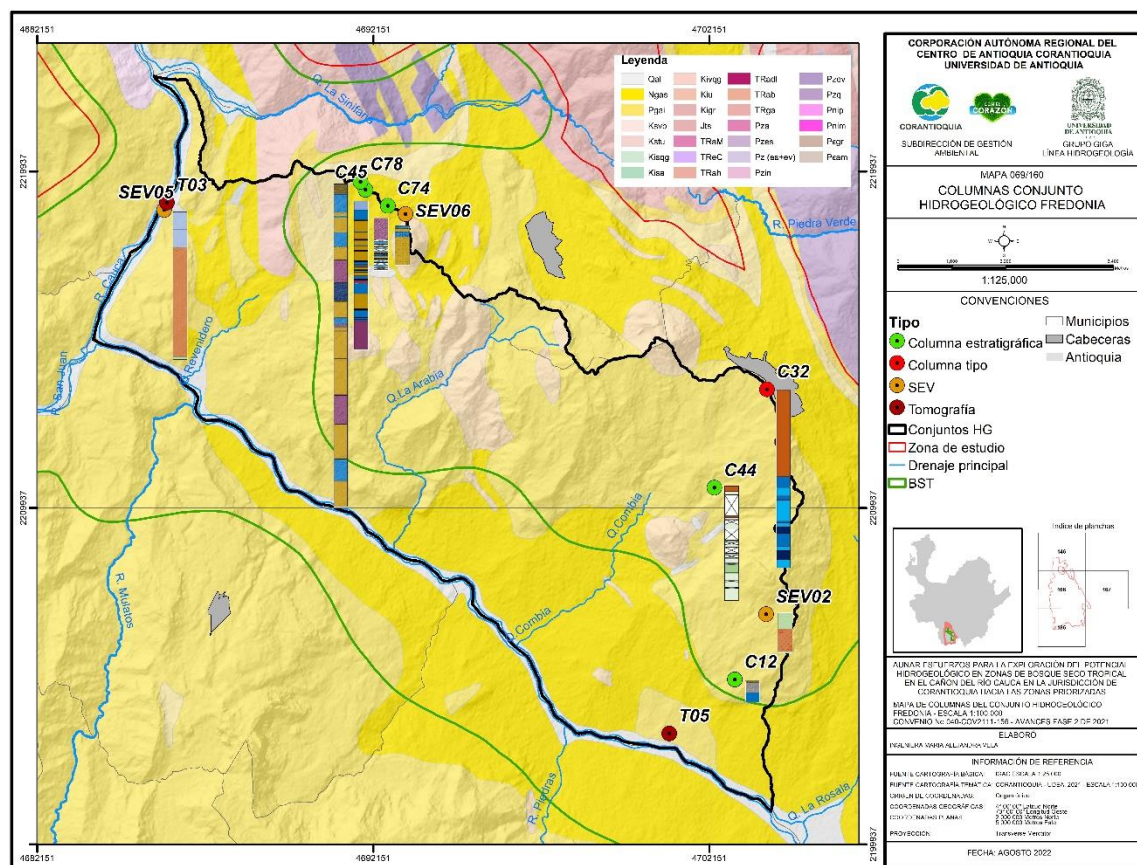


Figura 61. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Fredonia.

### 8.2.3.1 Formación Amagá

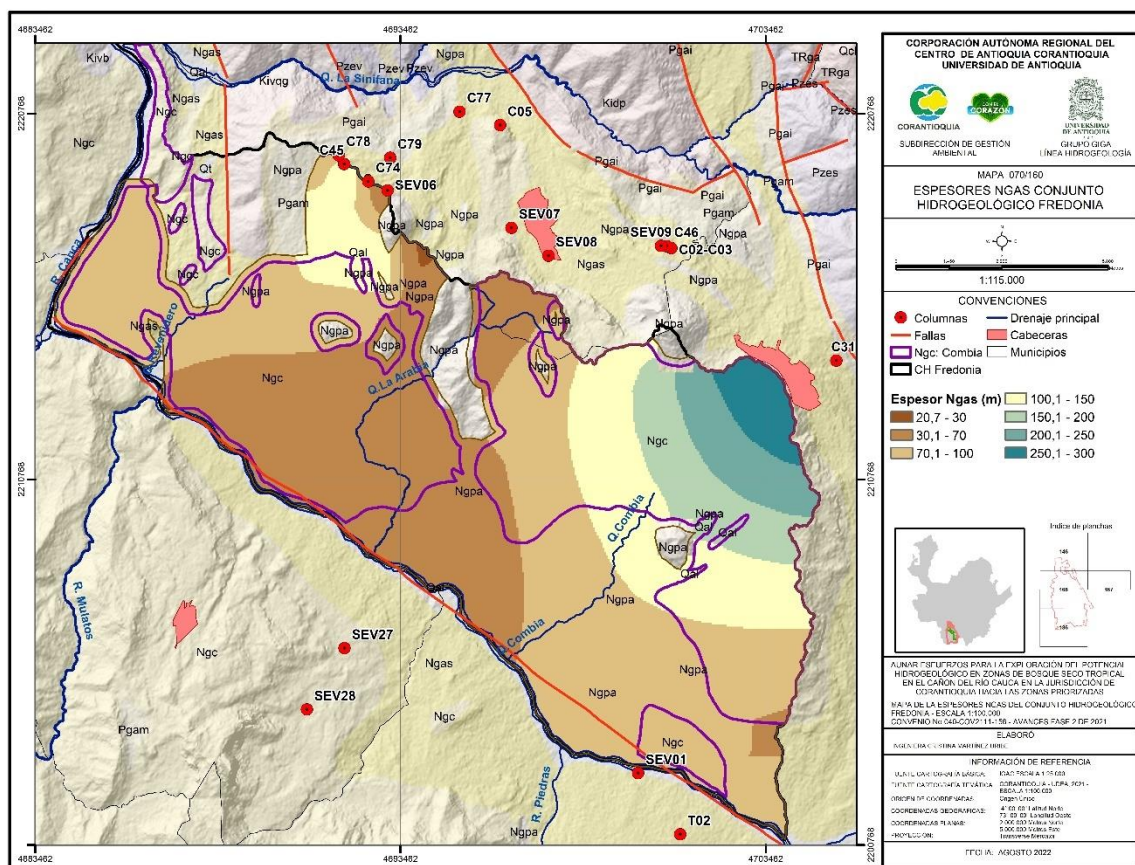
El Miembro Superior de la Formación Amagá aflora en una extensión de 63 km<sup>2</sup>; si se cuenta su extensión total, debido a su presencia estratigráfica por debajo de la Formación Combia alcanzaría 167 km<sup>2</sup>.

Con base en la interpretación hidroestratigráfica lograda a partir de tres columnas geológicas y un sondeo geoelectrico, integrados a la información regional; se confiere, en este conjunto, al Miembro Superior de la Formación Amagá el carácter de acuífero multicapa, al estar formado por intercalación de capas de areniscas, lodolitas, arcillas y diques porfíricos de diferente espesor y con continuidad lateral variable. El número de niveles permeables identificados puede ser de hasta 4 capas. El registro más profundo que se tiene es de 204 metros (Tabla 21).

Tabla 21. Síntesis de características hidroestratigráficas para la Formación Amagá, según información disponible y SEVs (realizados para este estudio) en el conjunto Fredonia

Columna	Espesor Columna	Espesor Acumulado Ngas Mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngas
C45	204,5	107,5	4
C74	15,7	5,44	2
C78	53,7	26,7	1
SEV06	55	15,9	1

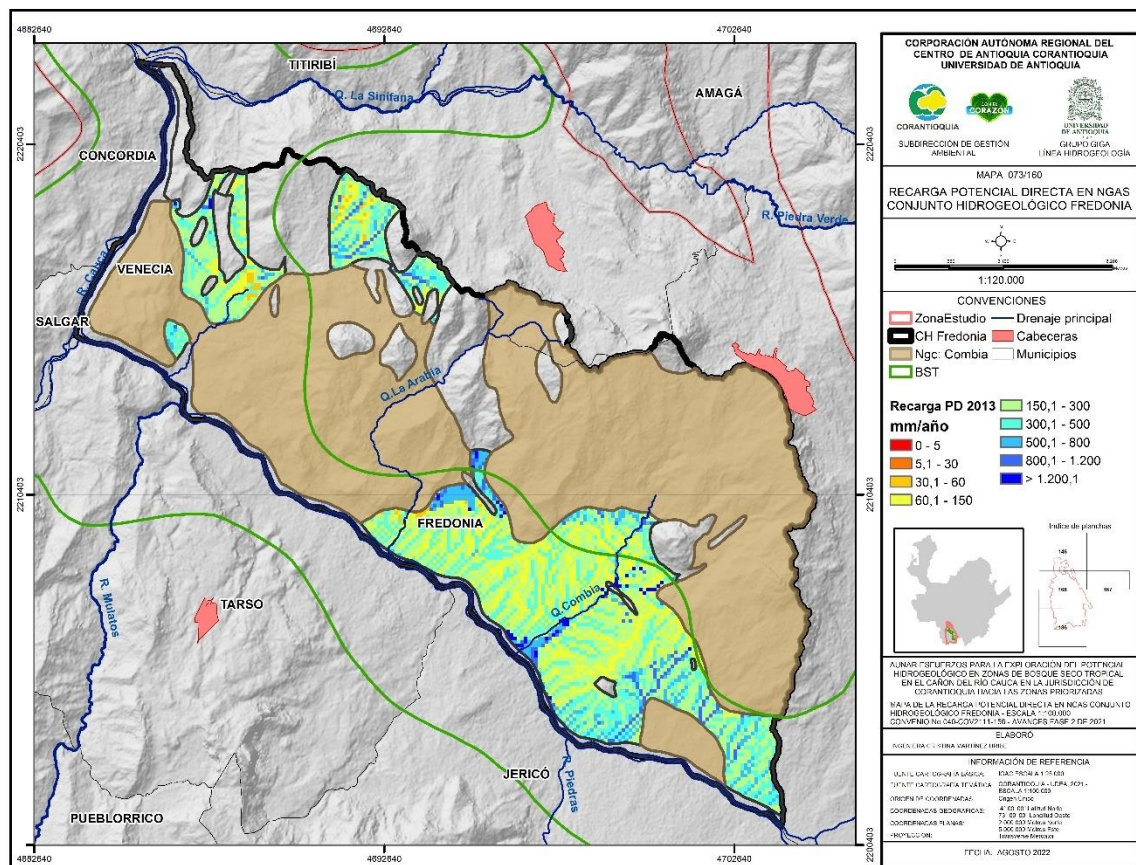
Como se observa en la Figura 62 los espesores del acuífero multicapa asociado al Miembro Superior de la Formación Amagá en el conjunto hidrogeológico Fredonia disminuye en sentido Noreste – Suroeste desde Fredonia, donde alcanzaría casi 300 m, en dirección al río Cauca, donde tendría espesores menores a 70 m.



**Figura 62. Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia).**

A pesar de que no se conoce con certeza la posición del límite inferior; de acuerdo con las dimensiones de extensión y profundidad conocidas si se tienen en cuenta las características texturales que se derivan de la descripción de la geología en las columnas localizadas en este conjunto, asumiendo una porosidad eficaz, entre 5% y 20% y considerando los valores de espesores permeables; se obtendrían volúmenes de agua almacenada del orden de entre 0,4 km<sup>3</sup> y 1,8 km<sup>3</sup>; no obstante si se tiene en cuenta que a profundidad los poros se cierran y que la porosidad eficaz va perdiendo la condición de equivalencia con el coeficiente de almacenamiento, es necesario asumir rangos diferenciales según profundidad.

A partir del cálculo de la recarga potencial directa (Figura 63) obtenida mediante balance hídrico distribuido (C Bastidas et al., 2022), en un año medio se podría contabilizar hasta 16 millones de metros cúbicos, pero para un período El Niño (2016) se han encontrado valores que, solo localmente alcanzan magnitudes que superan los 80 mm/año; el volumen que ingresaría anualmente sería del orden de 0,0005 km<sup>3</sup> (500.000 m<sup>3</sup>).



**Figura 63. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

Desde el procesamiento de los registros geofísicos se interpretan condiciones de conductividad hidráulica menores a 0,06 m/día, hasta las profundidades de exploración alcanzadas por estos métodos.

### 8.2.3.2 Formación Combia

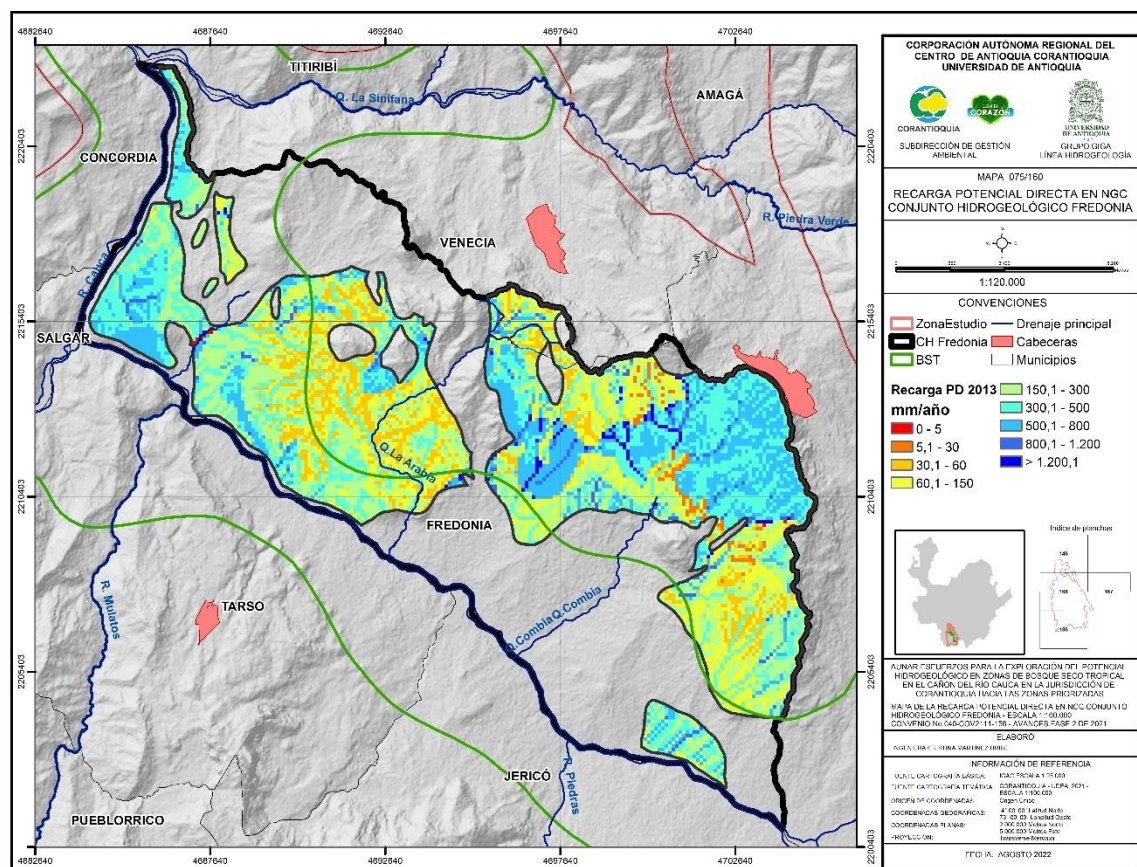
Dentro de este conjunto hidrogeológico Combia tiene una superficie de 103 km<sup>2</sup>; de acuerdo con los registros disponibles en tres columnas estratigráficas y dos sondeos eléctricos se han reportado espesores que pueden llegar a hasta más de 200 m (Tabla 22); dentro de ellos sería clara la presencia de una capa permeable de carácter libre. Según resultados de la interpolación espacial, se encuentra que los mayores espesores, hasta de 490 m, se encuentran entre Fredonia y Venecia y en el sector de Cerro Combia.

**Tabla 22. Síntesis de características hidroestratigráficas para la Formación Combia según información disponible y SEV (realizados para este estudio) en el conjunto Fredonia.**

Columna	Espesor columna	Espesor acumulado ngc mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en ngc
C12	32	32	1
C32	267	130	1
C44	162,5	99,5	4

Columna	Espesor columna	Espesor acumulado ngc mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en ngc
SEV02	55	24,1	2
SEV05	158,6	4	1

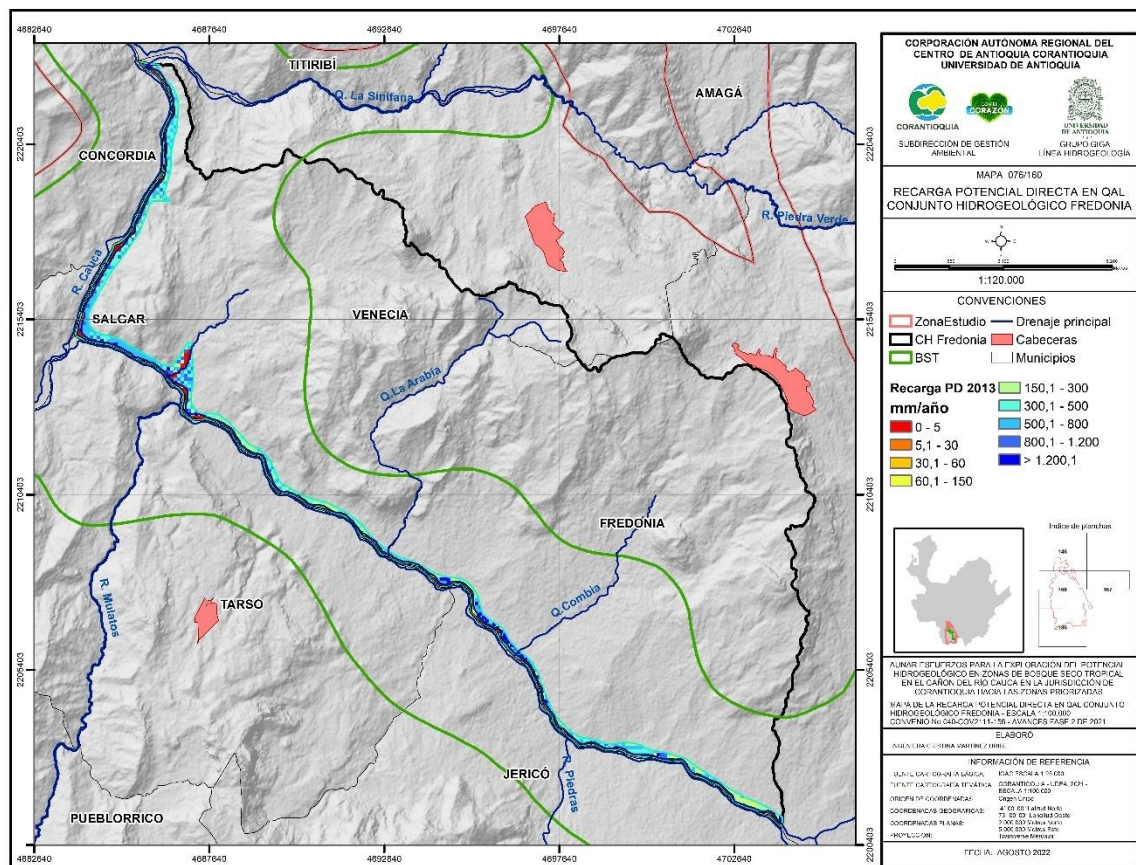
La distribución de la recarga potencial directa para un año medio que se muestra en la Figura 64 (Bastidas et al., 2022) revela valores que podrían llegar hasta 34,7 millones de metros cúbicos, pero en época de El Niño la recarga estaría entre 5 mm/año y hasta 300 mm/año.



**Figura 64. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Formación Combia en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

### 8.2.3.3 Depósitos aluviales

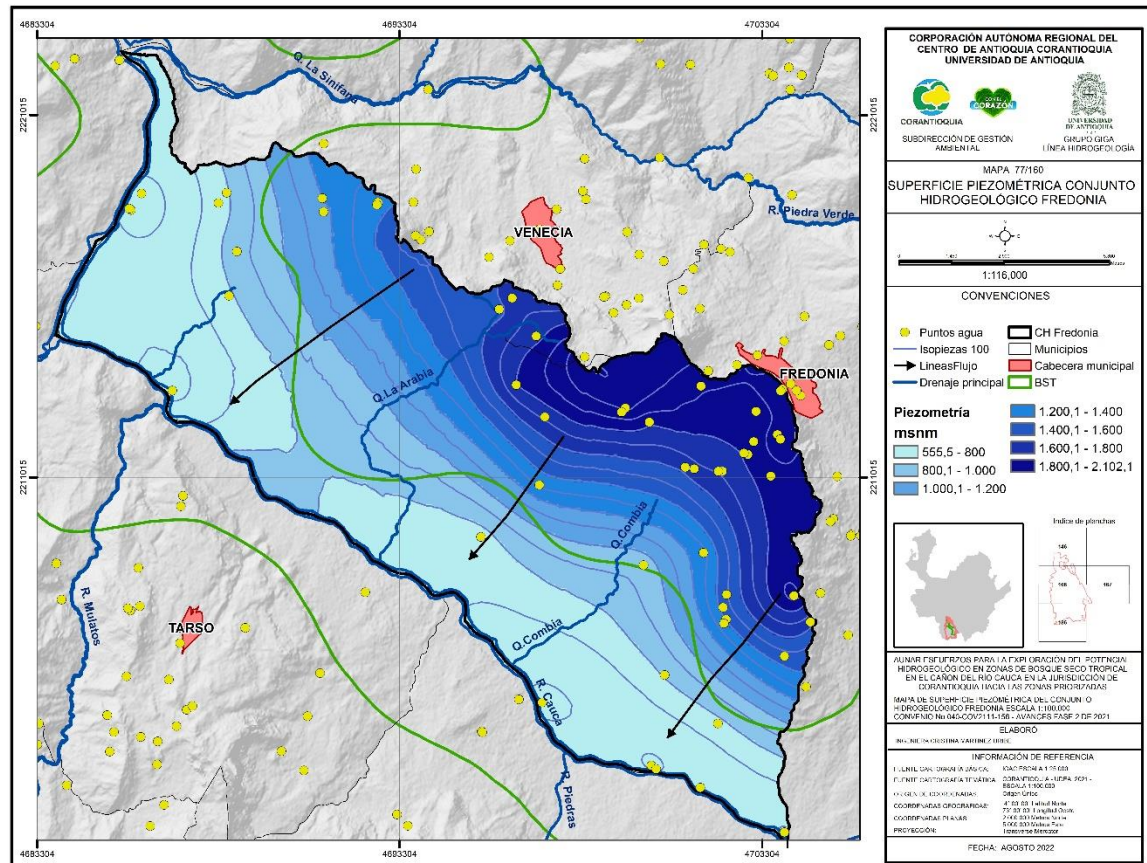
La presencia de depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Fredonia se limita a una extensión cercana a 8 km<sup>2</sup>. Ellos se localizan sobre la margen derecha del río Cauca. El espesor podría alcanzar más de 60 m de profundidad. Los cálculos preliminares de la recarga (Figura 65) sumaría en un año medio un ingreso de agua de hasta 3,7 millones de metros cúbicos; y menos de 52.000 m<sup>3</sup>, para un año El Niño.



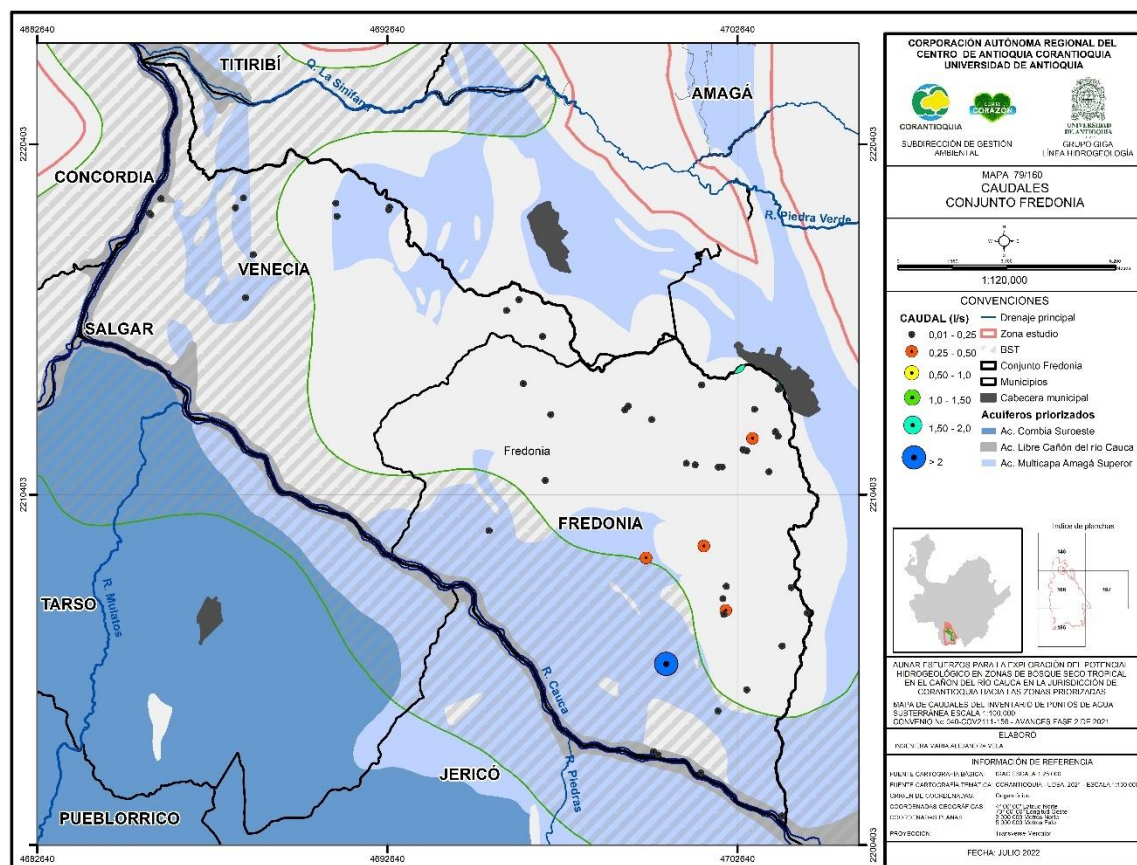
**Figura 65. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

#### 8.2.3.4 Superficie piezométrica y aprovechamiento de agua subterránea

La superficie piezométrica preliminar (Figura 66), que se modela a partir de información del inventario de puntos de agua, indica un flujo del agua subterránea en dirección Noreste – Suroeste dirigido hacia el río Cauca. Como evidencia del aprovechamiento del agua subterránea en este sector; en el inventario de puntos de agua se reporta la existencia de 43 manantiales, 8 aljibes y dos pozos. Estos puntos se distribuyen así: 10 manantiales en la Formación Amagá, 30 manantiales y tres aljibes en la Formación Combia, dos manantiales y cinco aljibes en los aluviales del río Cauca. Los caudales de extracción registrados se encuentran, entre 0,25 y 0,5 l/s, puntualmente alcanza hasta 2,84 l/s en la Formación Amagá (Figura 67); según se estima a partir de las propiedades geofísicas evaluadas en los SEV, de la Formación Amagá podrían establecerse extracciones del orden de 5 l/s y en la Formación Combia y el aluvial de 10 l/s.

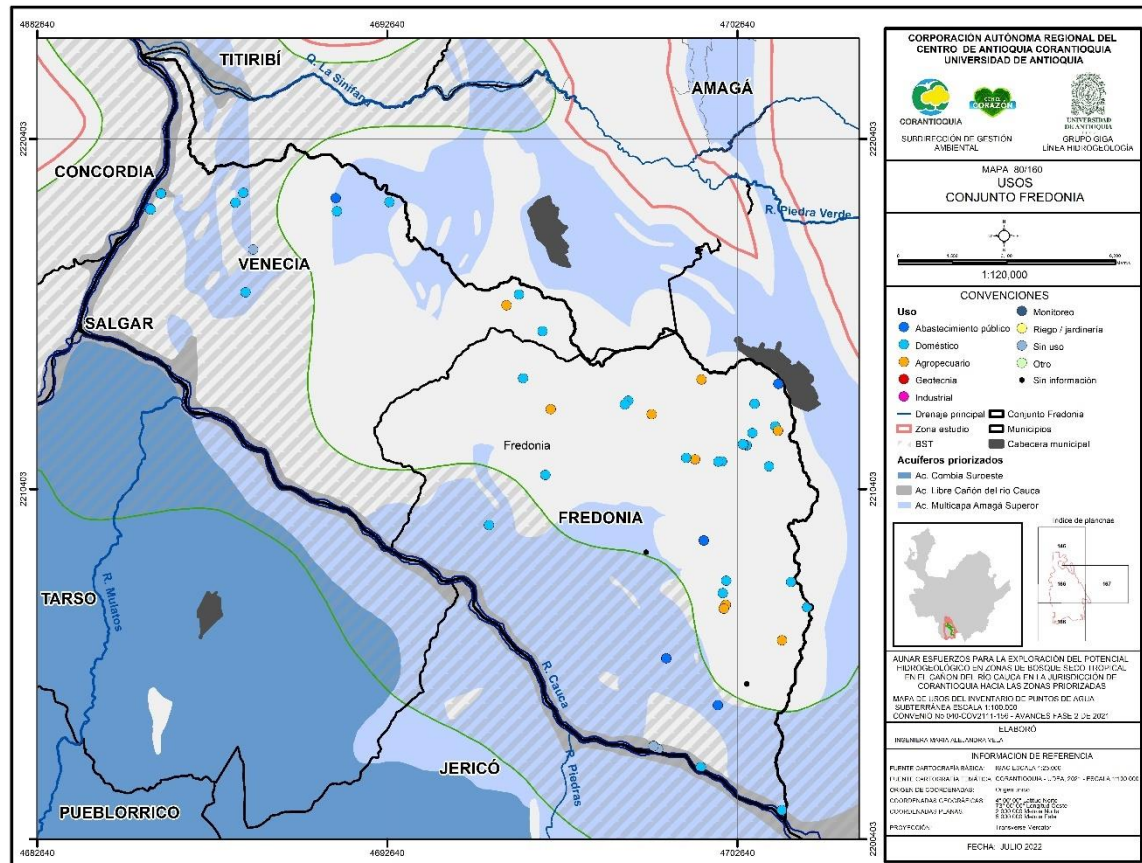


**Figura 66. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 67. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia).**

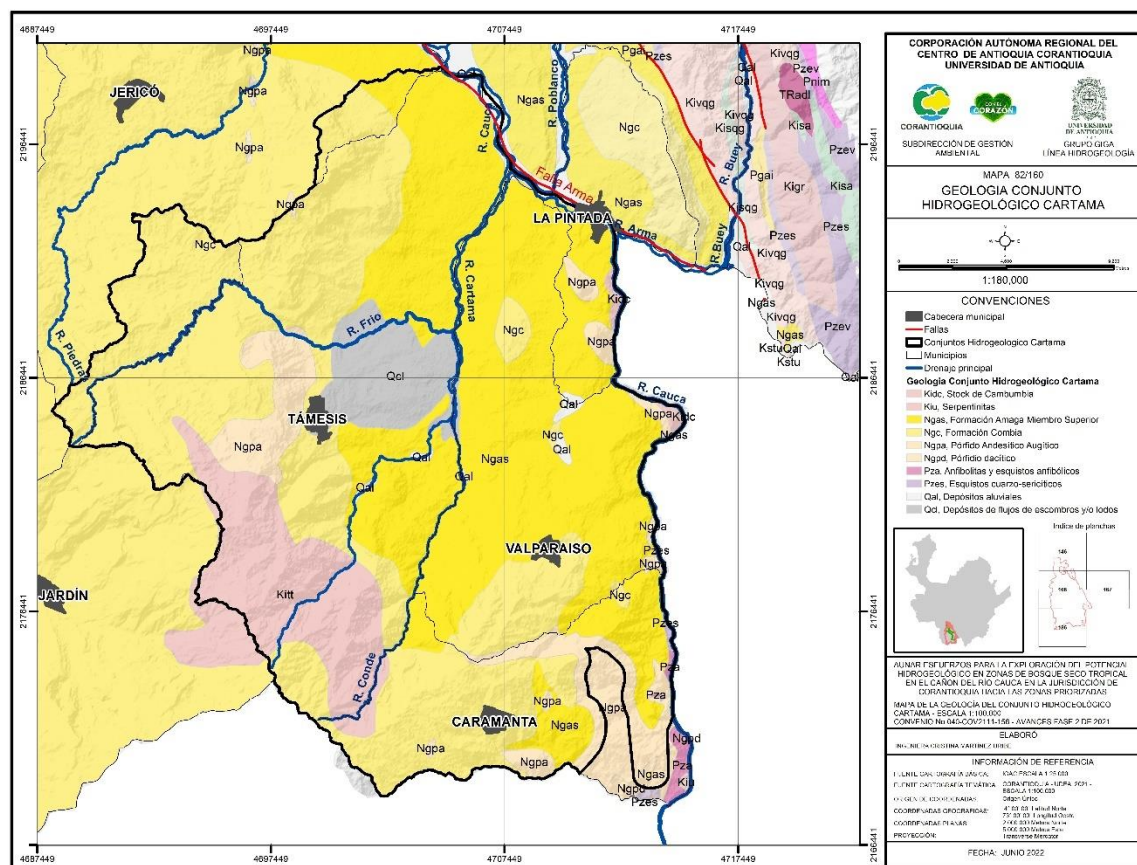
Los principales usos dados al agua subterránea en este conjunto son el uso doméstico, agropecuario y para abastecimiento público. Según análisis de calidad, el agua subterránea de esta región posee condiciones adecuadas para usos agrícola e industrial, no así para consumo humano.



**Figura 68. Principales usos del agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Fredonia (Fuente: Elaboración propia).**

## 8.2.4 Conjunto hidrogeológico Cartama

El conjunto hidrogeológico Cartama está ubicado en el Sureste de la zona de estudio, dentro de él se localizan los cascos urbanos de los municipios de La Pintada, Támesis, Valparaíso y Caramanta; se incluyen dentro de él los corregimientos de Palermo y San Pablo en Támesis y Sucre, Alegrías y Barro Blanco en Caramanta. Este conjunto limita en el Este con el Río Cauca, al noreste con la falla Arma y al Noroeste su límite es con la divisoria de aguas de las cuencas de los ríos Piedra y Frio; el límite Oeste, que es a su vez el límite municipal corresponde con la divisoria de la cuenca del San Juan.



**Figura 69. Delimitación del conjunto hidrogeológico Cartama y las unidades geológicas prioritizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000).**

El ejercicio de correlación contó, para este conjunto con información de las columnas estratigráficas que se presentan en la Figura 70, en ella se reúnen descripciones procedentes de estudios geológicos, perforaciones y pruebas geofísicas.

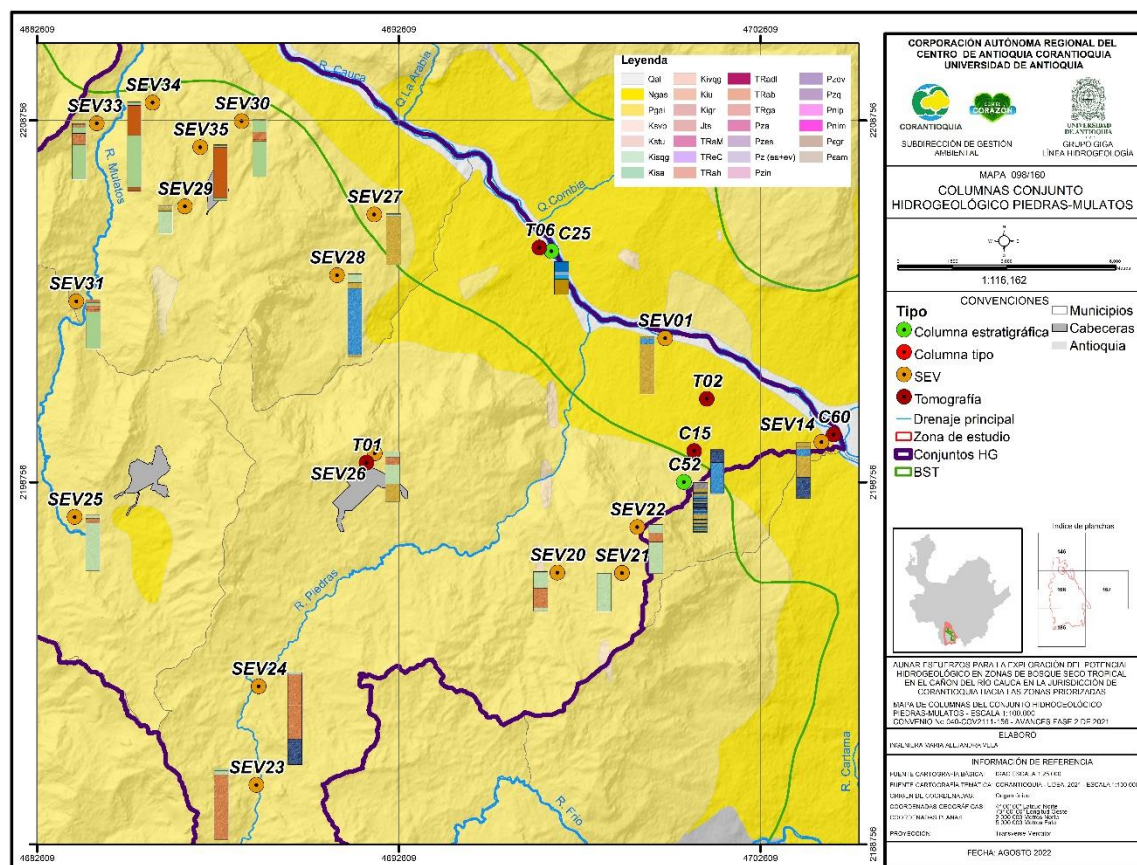


Figura 70. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Piedras – Mulatos.

#### 8.2.4.1 Formación Amagá

El Miembro Superior de la Formación Amagá aflora en una extensión de 249 km<sup>2</sup>.

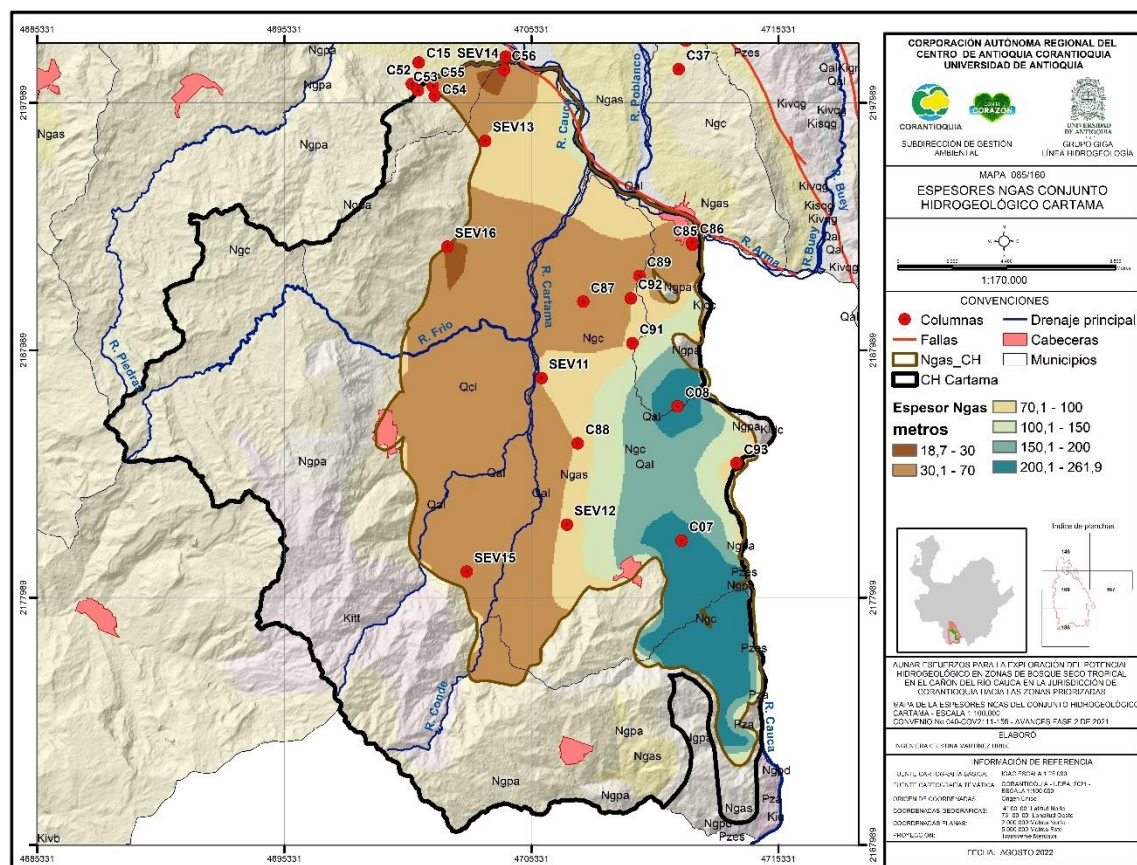
La interpretación hidroestratigráfica de la Formación Amagá fue obtenida de catorce columnas geológicas y cinco sondeos geoelectrónicos (Tabla 23). El Miembro Superior de la Formación Amagá en este conjunto está formado por intercalación de capas de areniscas, lodolitas y arcillas de diferente espesor. El número de niveles permeables identificados varía desde una capa hasta tres capas, en casi ningún caso se llegó al límite con la unidad que subyace. Hay columnas con espesores que alcanzan 257 m, mientras que otras llegan apenas a 18 m de profundidad. Por su parte, el espesor promedio de capas permeables, según la información disponible sería de 69 m (Tabla 23).

Tabla 23. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible y SEV (realizados para este estudio) en el conjunto Cartama.

Columna	Espesor Columna	Espesor Acumulado Ngas Mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngas
C7	237,9	228	2
C8	257,8	207,2	4
C53	44,4	25,8	3
C54	86	54,7	3
C55	60,18	42,68	2
C56	18	18	1

Columna	Espesor Columna	Espesor Acumulado Ngas Mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngas
C85	41	17	1
C86	44	44	1
C87	68	53	1
C88	68	68	1
C89	68	68	1
C91	68	68	1
C92	68	68	1
C93	94	72	3
SEV11	75	10,9	2
SEV12	80	80	1
SEV13	100	100	1
SEV15	47	15	1
SEV16	18.8	0	0

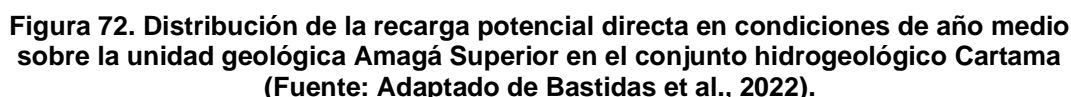
En la Figura 71 se puede observar las variaciones en espesor estimadas para al Miembro Superior de la Formación Amagá en el conjunto hidrogeológico Cartama; se puede observar que el mayor espesor se alcanza en la zona Este, conformando una especie de eje central, donde registra valores superiores a 200 m y disminuye hacia el extremo Oeste con caídas en los espesores a 100 m, 70 m y 30 m.



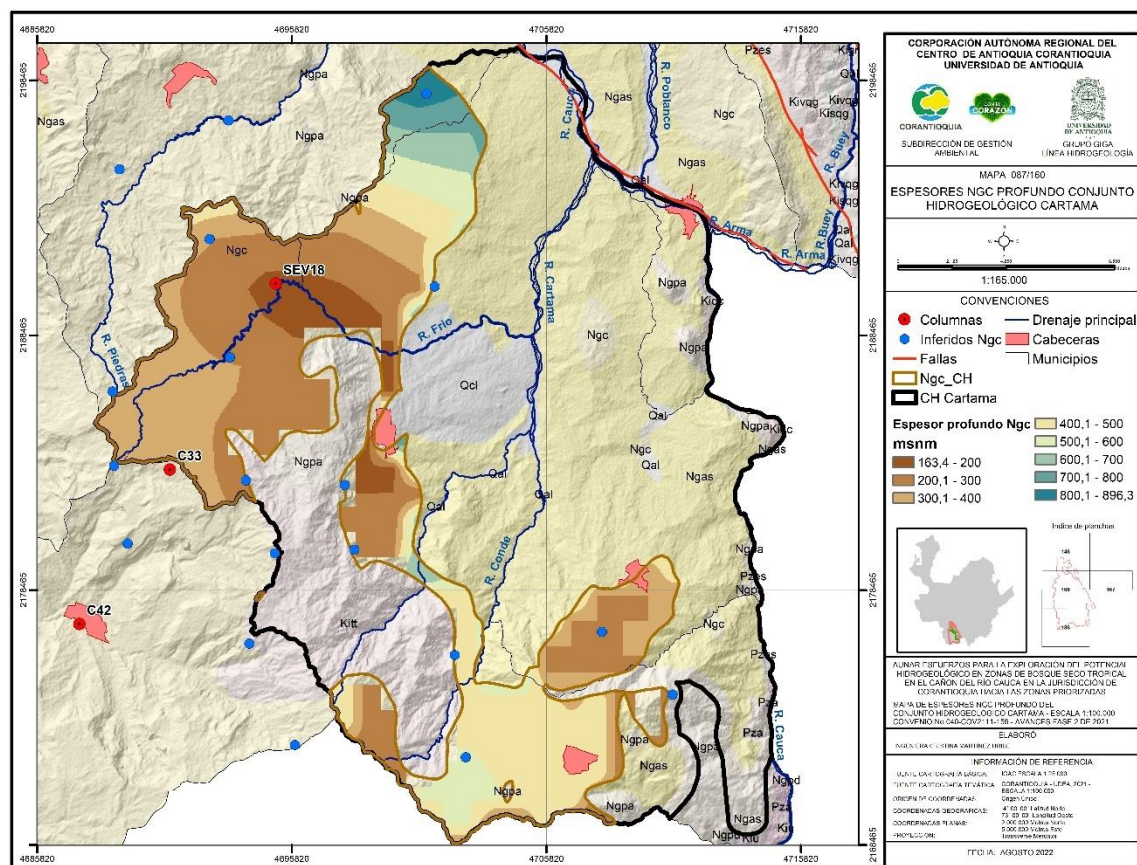
**Figura 71 . Espesor del acuífero multicapa Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia).**

Si se tienen en cuenta los espesores permeables y se consideran, según características texturales, valores de porosidad entre 5% y 20%, en esta unidad podrían almacenarse entre 1 km<sup>3</sup> y 3,9 m<sup>3</sup> de agua subterránea.

De acuerdo con los cálculos de recarga potencial directa por balance hídrico, a la Formación Amagá ingresarían anualmente, en un año medio 83,1 millones de metros cúbicos de agua; cifra que en temporada El Niño caería a 0,0035 km<sup>3</sup> de agua (3'500.000 m<sup>3</sup>). La distribución espacial de esta variable muestra en año medio se presenta en la Figura 72.



Las dimensiones regionales de la Formación Combia, soportada en la cartografía oficial del Servicio Geológico Colombiano (González, 1980), confieren a ella un espesor que puede sobrepasar los 800 m, sin embargo, no se cuenta con registros de exploración directa que permitan describir una estratigrafía detallada de esta magnitud. La estimación de espesores se sustenta en información geológica disponible en fuentes documentales ajustada con criterios geomorfológicos (Figura 73).



**Figura 73. Espesor estimado para la Formación Combia profundo en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia)**

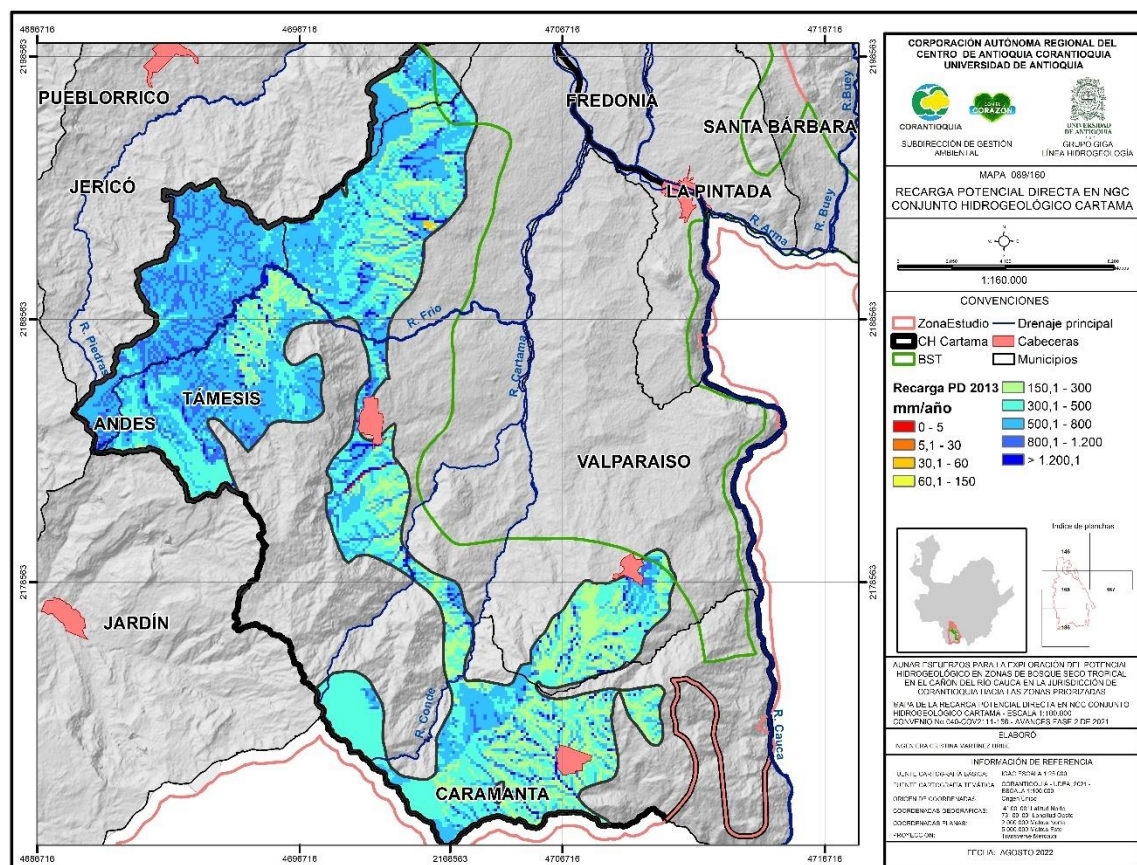
Los únicos detalles de correlación hidroestratigráfica de la formación Combia se obtuvieron a partir del estudio de cuatro sondeos geoelectricos (Tabla 24); entre estos el espesor máximo alcanzado fue de 81 m. Un ensayo de correlación a este nivel, pese al alto nivel de incertidumbre, sugiere que los mayores espesores estarían asociados a la cuenca del río Frio, disminuyendo hacia Támesis y Valparaíso (Figura 74). En límites someros se identifican dos niveles permeables que asumiendo condiciones de porosidad entre 5% y 15% y según características texturales de los materiales presentes, se calcula un volumen de capacidad de almacenamiento de agua del orden de entre 0,28 m<sup>3</sup> y 0,9 km<sup>3</sup>.

**Tabla 24. Síntesis sobre características hidroestratigráficas de la Formación Combia, según información disponible en el conjunto Cartama**

Columna	Espesor columna	Espesor acumulado Ngc mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngc
SEV10	70	70	1
SEV16	81,2	58,1	2
SEV17	23,45	23,4	1
SEV19	80	12,93	2



134

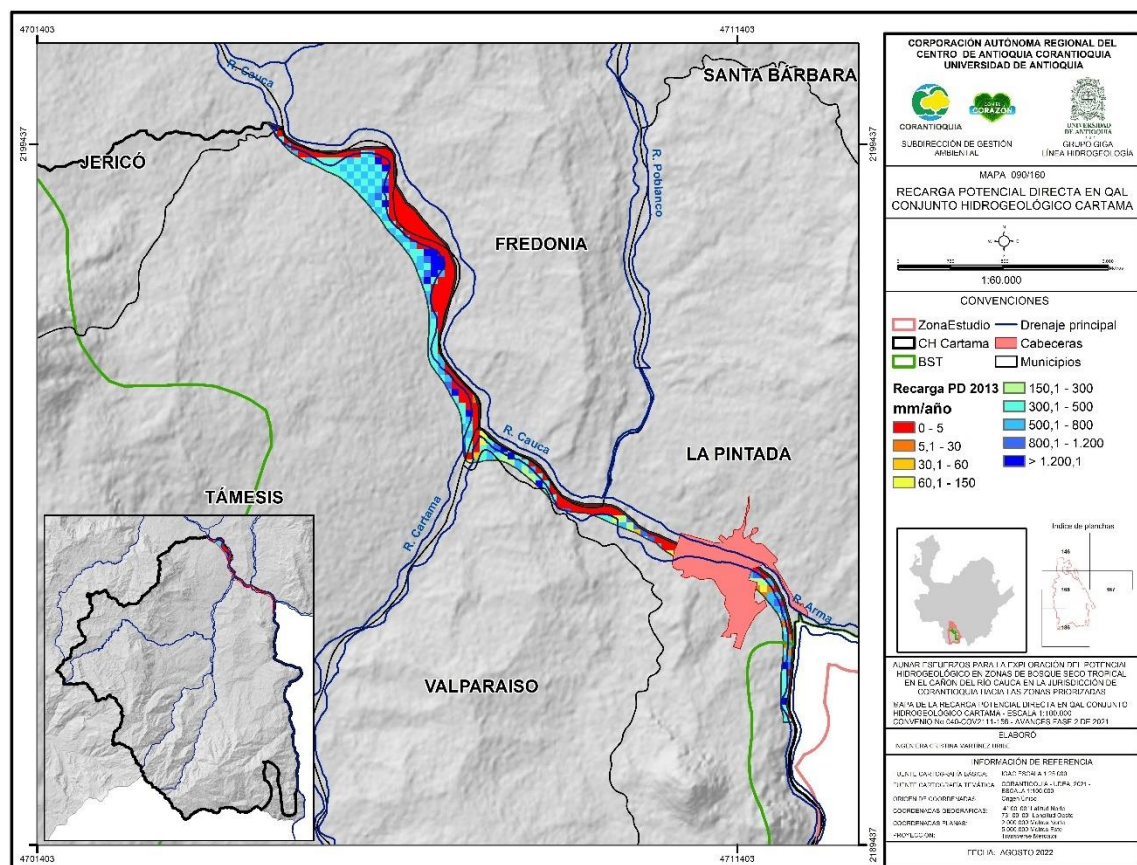


**Figura 75. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

De acuerdo con la interpretación registrada a partir de los análisis de las pruebas geofísicas, se han asignado límites de conductividad hidráulica cercanos a 0,5 m/día.

#### 8.2.4.3 Depósitos aluviales

La extensión de los depósitos aluviales en el conjunto Cartama es de 3,4 km<sup>2</sup>. La localización que se tiene de las columnas disponibles no ofrece condiciones adecuadas para efectuar una interpolación espacial que muestre los espesores de la unidad acuífera dentro de los límites en que se conoce su espesor. Sin embargo, seis columnas estratigráficas con las que se cuenta reportan espesores alrededor de los 60 m; lo cual permite reconocer condiciones favorables de porosidad y permeabilidad para designarlo como un acuífero libre. Las condiciones de recarga potencial directa para un año medio (Figura 76) obtenidas por Bastidas et al., (2022), reportan volúmenes de 1,2 millones de metros cúbicos; en un año seco solo llegaría a 16.000 m<sup>3</sup>.



**Figura 76. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

#### 8.2.4.4 Superficie piezométrica y aprovechamiento de agua subterránea

La conformación de la superficie piezométrica modelada a partir de la información de puntos de agua levantada durante el inventario revela un sentido de flujo de aguas subterráneas. En el conjunto hidrogeológico Cartama se han inventariado 214 puntos de agua: 172 manantiales, 41 aljibes y 1 pozo. La mayor cantidad de puntos se localiza sobre la formación Combia: 113 manantiales; sobre la formación Amagá: 42 manantiales, 28 aljibes y un pozo; y sobre los depósitos aluviales: 1 manantial y 11 aljibes. Los volúmenes de aforo y extracción están, en promedio cercanos a los 0,25 l/s, llegando, en algunos casos, en Combia a 1,0 l/s. La interpretación geofísica indica que en algunos puntos es posible alcanzar niveles de extracción de más de 30 l/s de Combia y entre 1 y 10 l/s de Amagá.

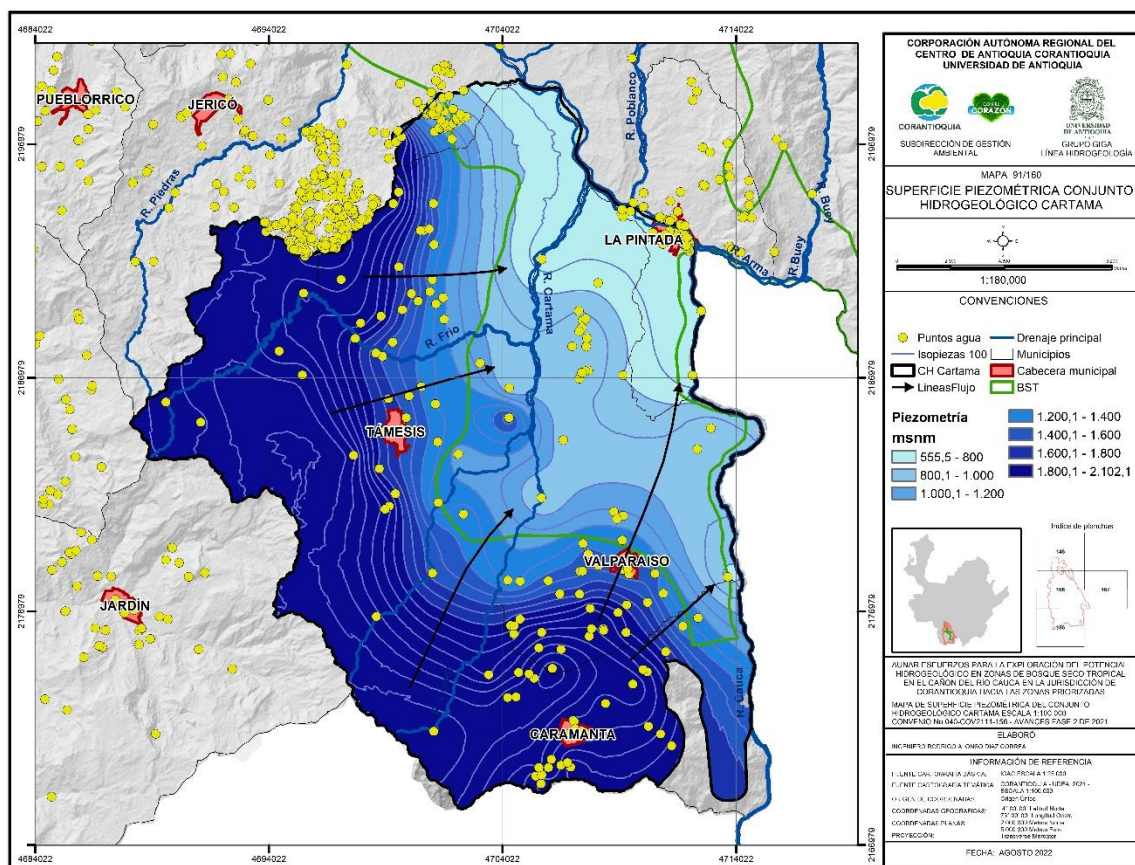
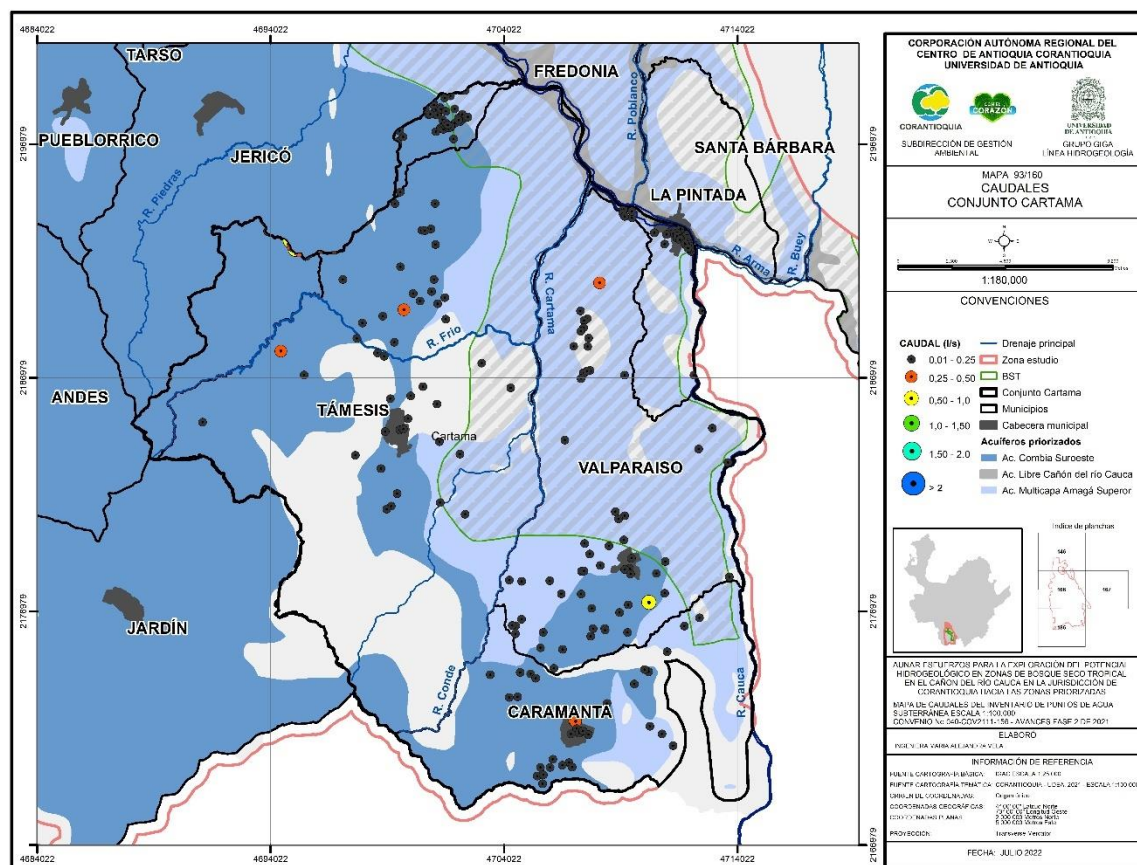


Figura 77. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia).

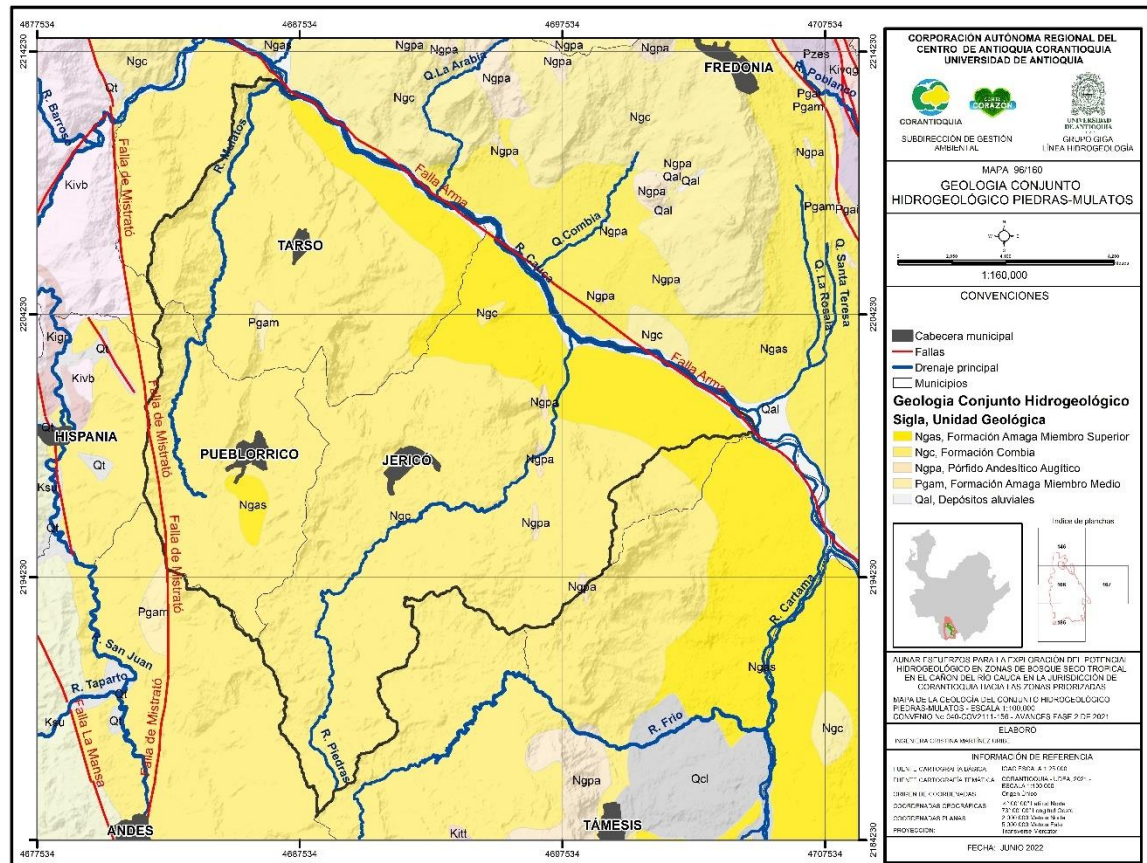


**Figura 78. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Cartama (Fuente: Elaboración propia).**

Los principales usos dados al agua subterránea en este conjunto, son el uso doméstico, agropecuario y para abastecimiento público. Según análisis de calidad, el agua subterránea de esta región posee condiciones adecuadas para usos agrícola e industrial, no así para consumo humano.

### 8.2.5 Conjunto hidrogeológico Piedras – Mulatos

El conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos se localiza en la vertiente izquierda del río Cauca, en la parte central de la zona de estudio, dentro de él se encuentran los cascos urbanos de los municipios de Tarso, Pueblo Rico y Jericó, de este último municipio también se incluye el corregimiento de Palo Cabildo. Los límites hidrogeológicos fueron definidos por la falla Arma y el Cauca al Noreste; la divisoria de las cuencas del río Piedras y el río Frio, al Sureste; y la divisoria de las cuencas de los ríos Mulatos y San Juan, al Oeste (Figura 79).



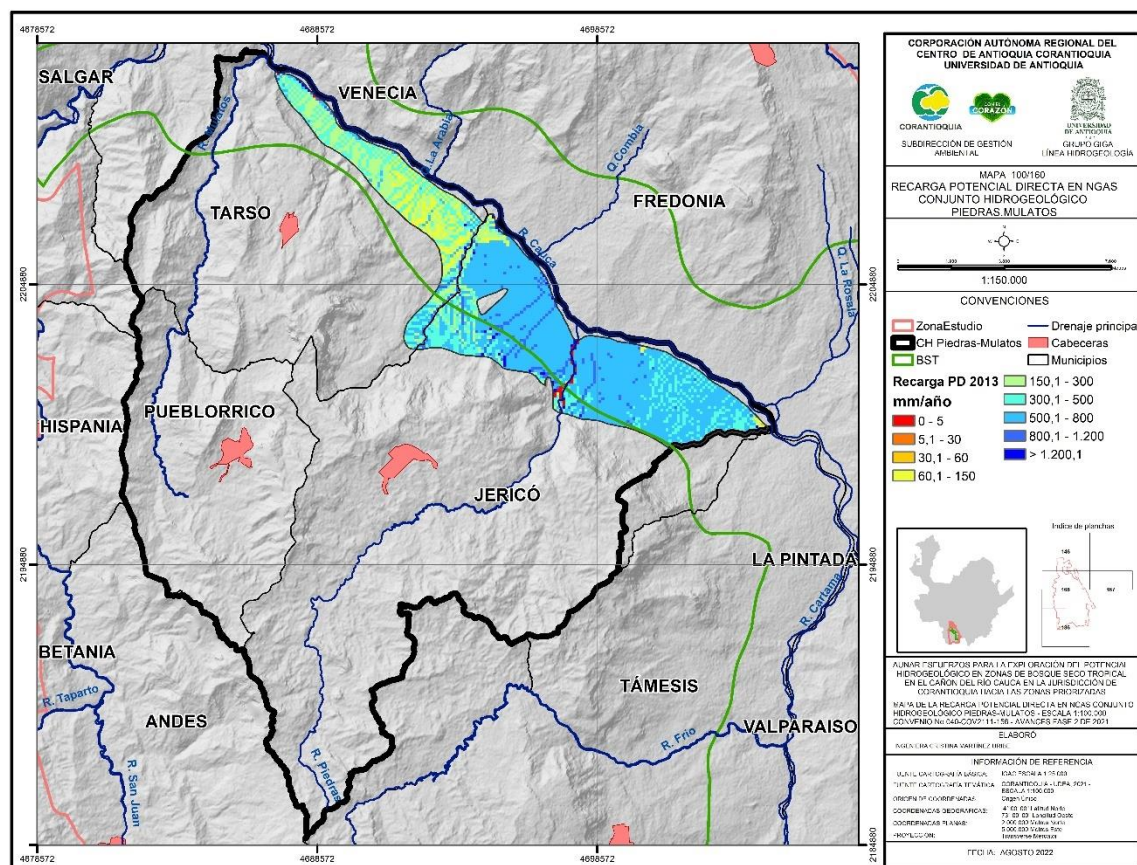
**Figura 79. Delimitación del conjunto hidrogeológico Piedras-Mulatos y las unidades geológicas prioritizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000).**

El ejercicio de correlación contó, para este conjunto con información de las columnas estratigráficas que se presentan en la Figura 80, en ella se reúnen descripciones procedentes de estudios geológicos, perforaciones y pruebas geofísicas.

**Figura 80. Localización de columnas estratigráficas para el conjunto Piedras – Mulatos.**

[illegible]

De acuerdo con los cálculos de recarga obtenidos mediante balance hídrico distribuido (Bastidas et al., 2022) en un año medio, el volumen de agua que ingresaría a esta unidad anualmente sería de cerca de 25,1 millones de metros cúbicos (Figura 82); sin embargo, en condiciones de gran sequía, como las que se presentaron en 2016, estos valores podrían caer a 0.0004 km<sup>3</sup> (411.000 m<sup>3</sup>).

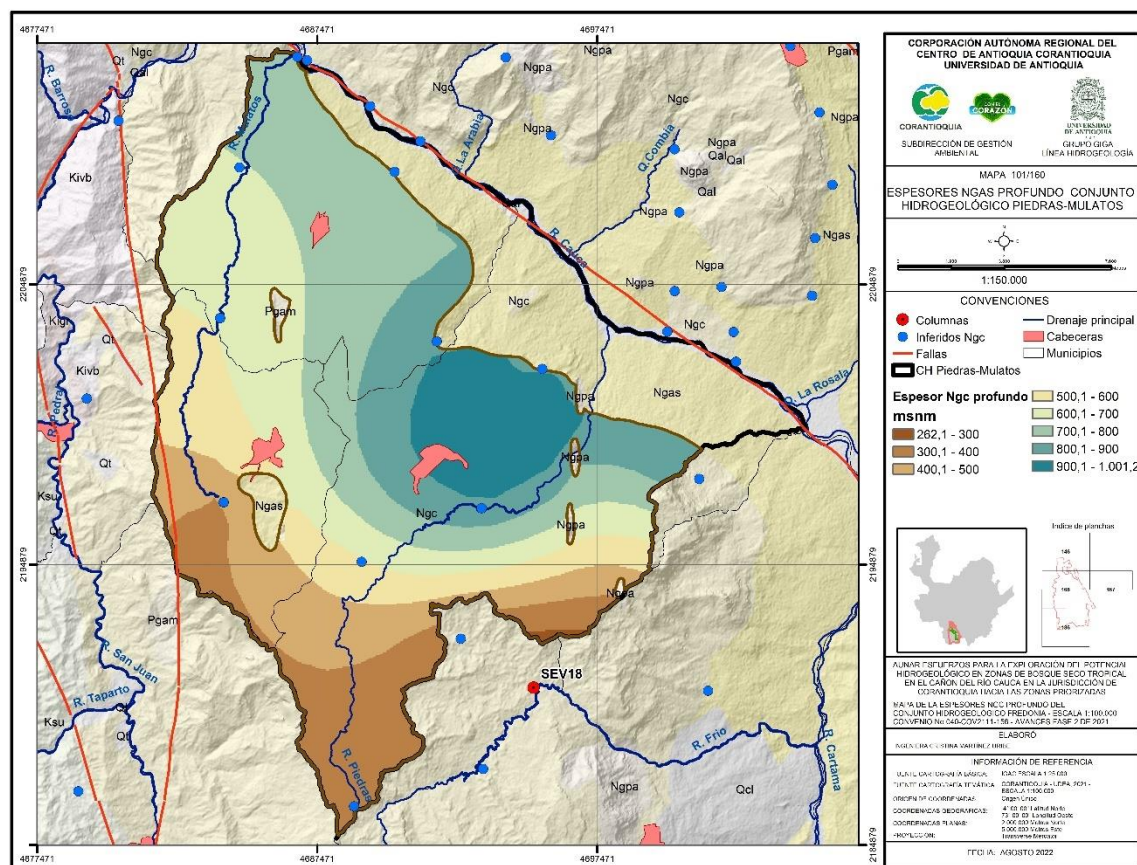


**Figura 82. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año (medio sobre la unidad geológica Amagá Superior en el conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 20221).**

Al Miembro Superior de la Formación Amagá en el Conjunto Piedras – Mulatos, a partir de información secundaria, se le asocia una conductividad hidráulica de 0,0247 m/día. Mediante estudios geofísicos realizados durante este estudio, se obtuvieron valores promedio de permeabilidad de 0,07 m/día, y entre 0,1 y 5,8 m<sup>2</sup>/día para la transividad.

### 8.2.5.2 Formación Combia

La Formación Combia, en el conjunto Piedras-Mulatos, cubre un área de 259 km<sup>2</sup>. Se infieren espesores mayores a 500 m, llegando probablemente a 1.000 m. Los máximos valores tendrían una clara expresión geomorfológica en el escarpe Noreste de la unidad geológica, hacia el límite con el Miembro Superior de la Formación Amagá (Figura 83).



**Figura 83. Espesores regionales de la Formación Combia profundo en el conjunto Piedras – Mulatos (Fuente: Elaboración propia).**

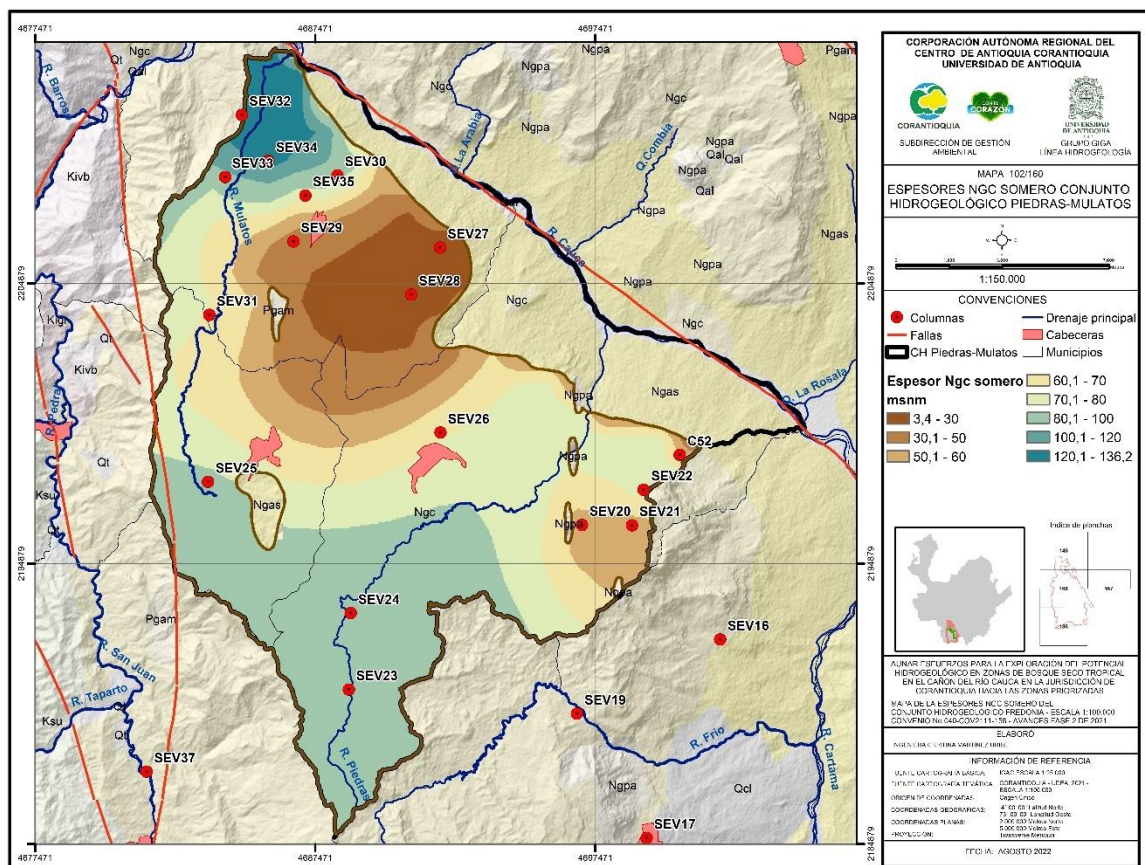
Para este estudio aún no se cuenta con registros de perforación del subsuelo que describan el espesor completo de Combia sobre la margen izquierda del río Cauca; los datos de exploración indirecta no sobrepasan más de 130 m de profundidad y, así, en ellos solo se identifican entre una y dos capas de material permeable. En promedio el espesor de capas permeables, según información disponible, sería de 40,17 m; en los niveles hasta los cuales se alcanzó a realizar exploración geofísica, se registra la presencia de, entre 1 y dos capas de material con textura permeable propicia para el almacenamiento y flujo de agua subterránea. En la Tabla 26, se presenta una síntesis de la información hidroestratigráfica asociada a este conjunto, esta fue obtenida en este estudio a partir de la realización de 15 SEV, una columna estratigráfica y una tomografía, datos que se integran a otros registros regionales.

**Tabla 26. Síntesis sobre características hidroestratigráficas de la Formación Combia, según información disponible en el conjunto Piedras – Mulatos.**

Columna	Espesor columna	Espesor acumulado Ngc mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngc
C52	9,6	9,6	1
SEV20	55	27,4	2
SEV21	55	55	1
SEV22	70	57,3	2
SEV23	100	8,72	1
SEV24	94	2,5	1
SEV25	80	80	1

Columna	Espesor columna	Espesor acumulado Ngc mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngc
SEV26	70	34,8	2
SEV27	3,1	3,1	1
SEV28	11,9	11,9	1
SEV29	40	40	1
SEV30	80	66,8	2
SEV31	70	61,8	2
SEV33	80	64	2
SEV34	130	81,1	2
SEV35	80	8,2	2
Tomografía 1	60	60	1

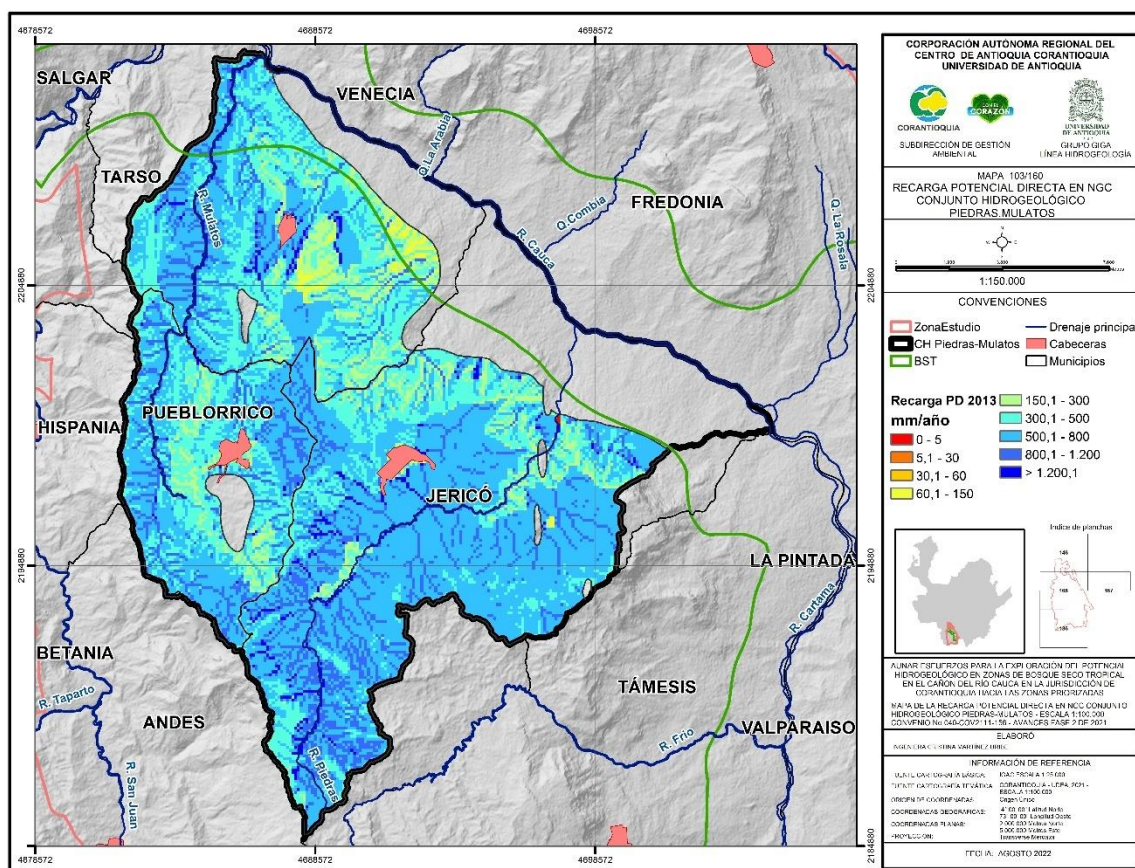
Efectuando la interpolación espacial que considera solo las profundidades de exploración alcanzada con estos registros, en la Figura 84 se presentan los espesores de la Formación Combia en el conjunto hidrogeológico Piedras – Mulatos; los valores menores conocidos se registran hacia los SEV 27 y SEV 28, donde las condiciones del terreno no permitieron mayor profundidad de exploración, sin embargo, estas zonas son las que tendrían una mayor potencia para la unidad a escala regional. Hacia el Norte y Sur la exploración llego a mayores profundidades, registrando dimensiones de hasta 100 y 130 m, correspondientes a los SEV 23 y SEV 34.



**Figura 84. Espesor del acuífero asociado a la Formación Combia somero en el conjunto hidrogeológico Piedras – Mulatos.**

Si se tienen en cuenta las características texturales que se derivan de la descripción de la geología en las columnas localizadas en este conjunto; asumiendo una porosidad

De acuerdo con los cálculos del balance hídrico distribuido en un año medio (Bastidas et al., 2022), la recarga anual estimada sobre la Formación Combia sería de 155 millones de metros cúbicos (Figura 85); sin embargo, en épocas de drástica sequía como las reportadas en 2016 esos valores podrían ser no mayores a 0,0105 km<sup>3</sup> de agua (10'500.000 m<sup>3</sup>).



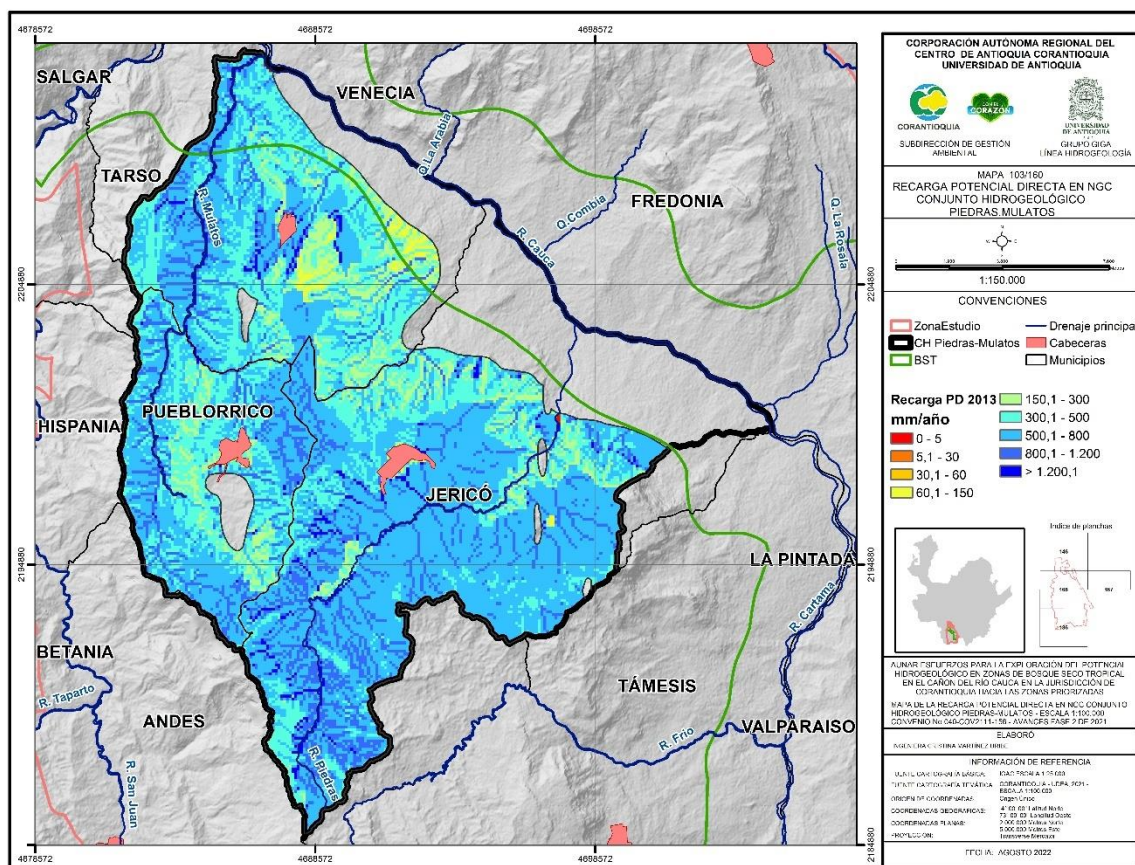
**Figura 85. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

Las propiedades hidráulicas disponibles para esta Formación en este conjunto y a partir de información secundaria, es una permeabilidad de 0,014 m/día. Los datos obtenidos a partir del estudio geofísico realizado en este estudio corresponden a conductividades mayores a 0,06, localmente pueden alcanzar valores de 12,52 m/día (SEV 21) y 4,6 m/día (SEV 26).

### 8.2.5.3 Depósitos aluviales

Los depósitos aluviales presentes en este conjunto cubren un área de 5,4 km<sup>2</sup>; los espesores registrados en la información disponible varían entre 9 y 50 m. Según balance hídrico distribuido en año medio se ha calculado que la recarga potencial directa sobre

los depósitos aluviales alcanzaría 2,5 millones de metros cúbicos (Figura 86); cifra que para un período seco como El Niño 2016 caería a 49.000 km<sup>3</sup>.



**Figura 86. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico Piedras - Mulatos (Fuente: Adaptado Bastidas et al., 2022).**

#### 8.2.5.4 Superficie piezométrica y aprovechamiento de agua subterránea

La superficie piezométrica preliminar que se modela a partir de información del inventario de puntos de agua (Figura 87). Como evidencia del aprovechamiento del agua subterránea en este sector; en el inventario de puntos de agua se reporta la existencia de 319 manantiales y un pozo; de esta cifra 298 manantiales y el pozo están sobre la Formación Combia. Los caudales aforados durante el inventario son de hasta 1,5 l/s (Figura 88). Según se estima a partir de las propiedades geofísicas evaluadas en los SEV efectuados en este conjunto hidrogeológico de los niveles someros de la Formación Combia podrían extraerse, por punto de agua que se construya siguiendo criterios de distancia para evitar interferencia, hasta 3,0 l/s, magnitudes que pueden llegar a suplir importantes necesidades de abastecimiento básico para comunidades de la región.

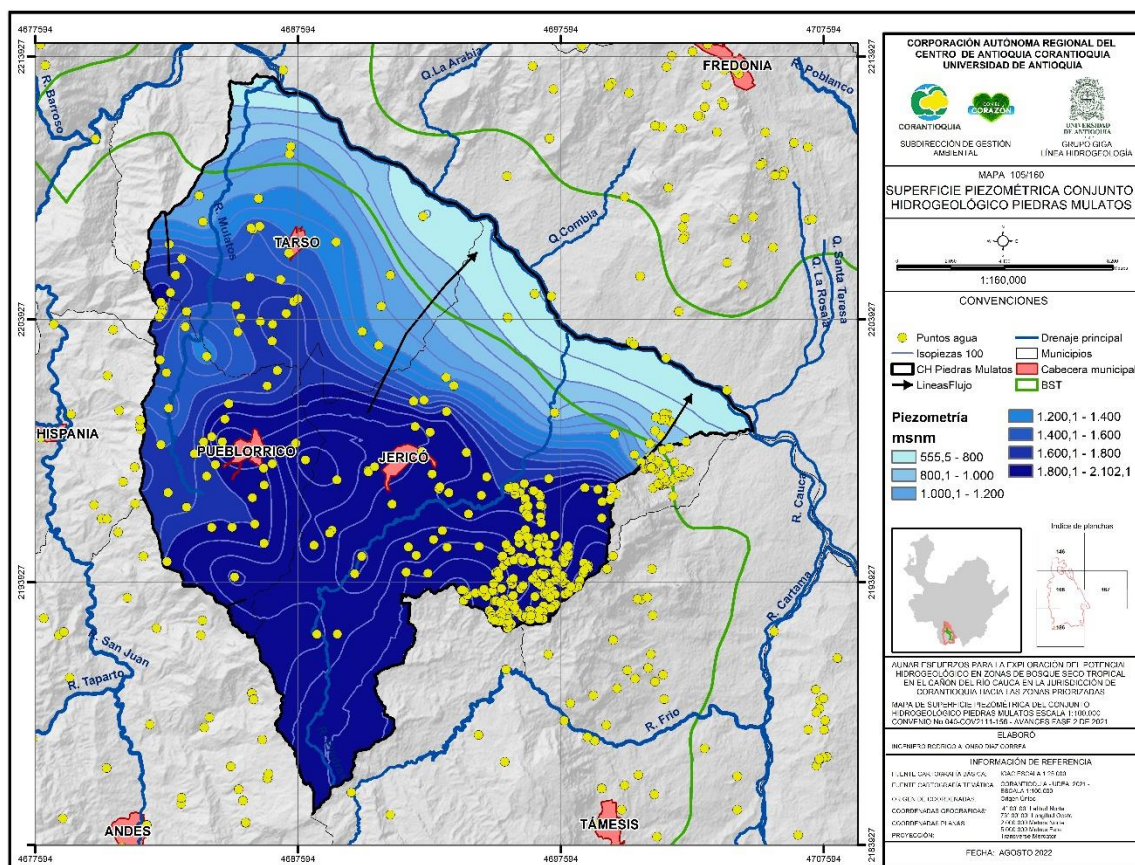
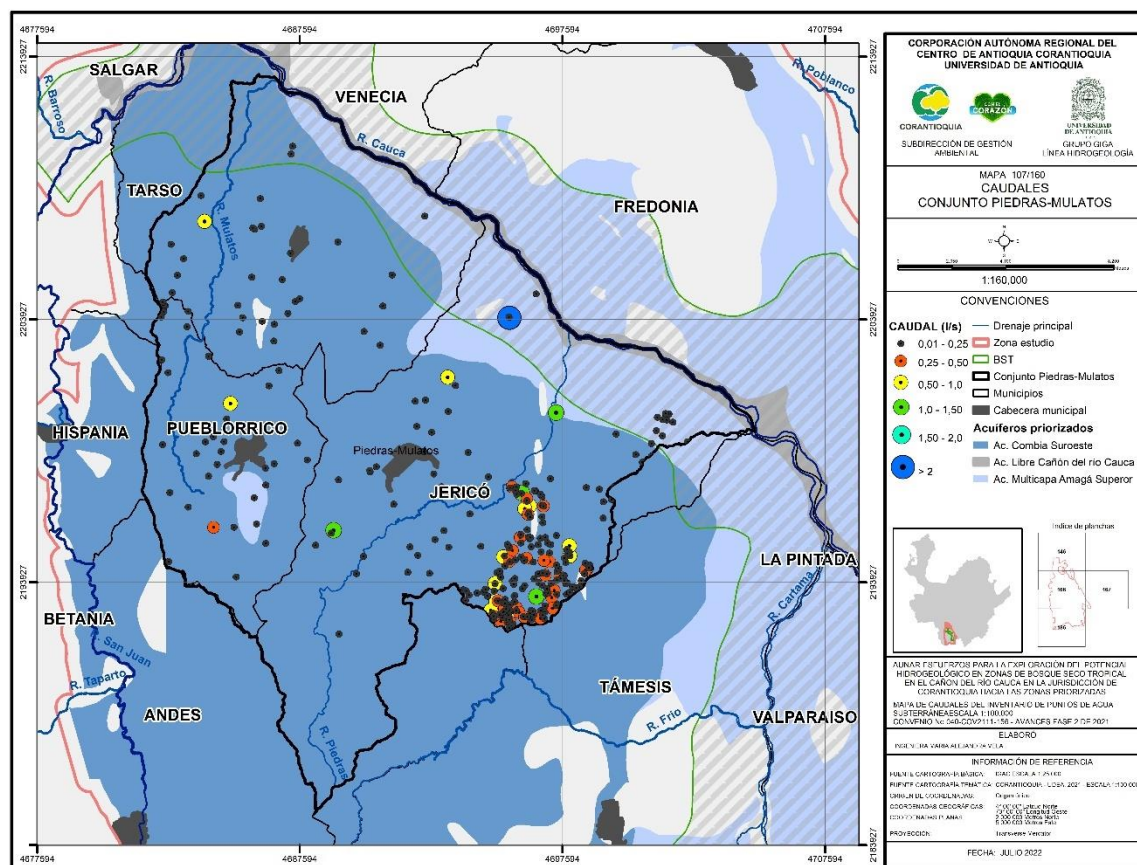


Figura 87. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Sinifaná (Fuente: Elaboración propia).



**Figura 88. Caudales aforados o captados en los puntos de agua subterránea en el conjunto hidrogeológico Piedras-Mulatos (Fuente: Elaboración propia)**

Los principales usos dados al agua subterránea en este conjunto son el uso doméstico, agropecuario y para abastecimiento público. Según análisis de calidad, el agua subterránea de esta región posee condiciones adecuadas para usos agrícola e industrial, no así para consumo humano.

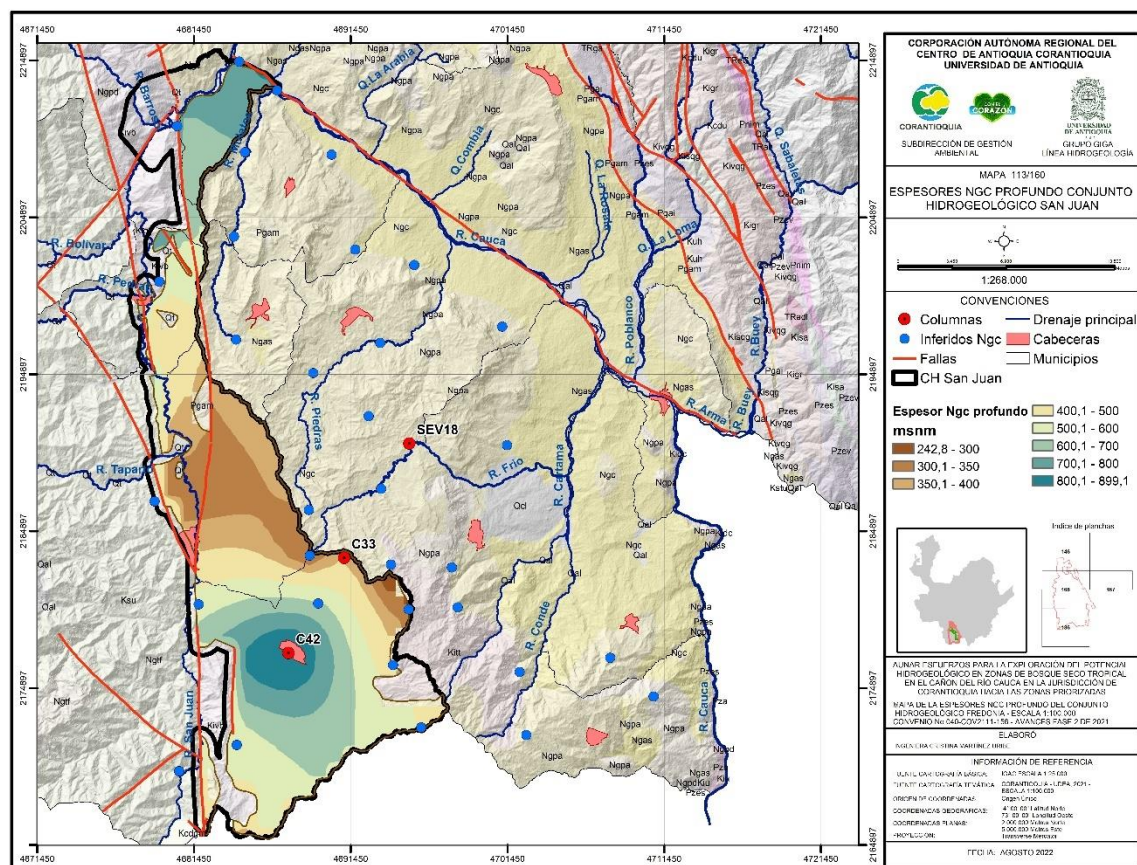
## 8.2.6 Conjunto hidrogeológico San Juan

El conjunto hidrogeológico San Juan se localiza al Occidente de la zona de estudio, dentro de él se encuentran los cascos urbanos de los municipios de Hispania, Jardín y Andes, incluyendo sus corregimientos de San José, Buenos Aires, Tapartó y Santa Rita; también incluye algunos territorios rurales de los municipios de Betania, Tarso, Pueblo Rico y Salgar. El límite occidental está marcado las riberas de la margen izquierda del río San Juan, hacia el noreste y el este está limitado por las divisorias de agua con las cuencas de los ríos Mulatos, Piedras, Frío y Cartama. Los principales drenajes en este conjunto son el río San Juan, Tapartó y Barroso (Figura 89).

149



## 150



**Figura 91. Espesores estimados para la Formación Combia profundo en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Elaboración propia).**

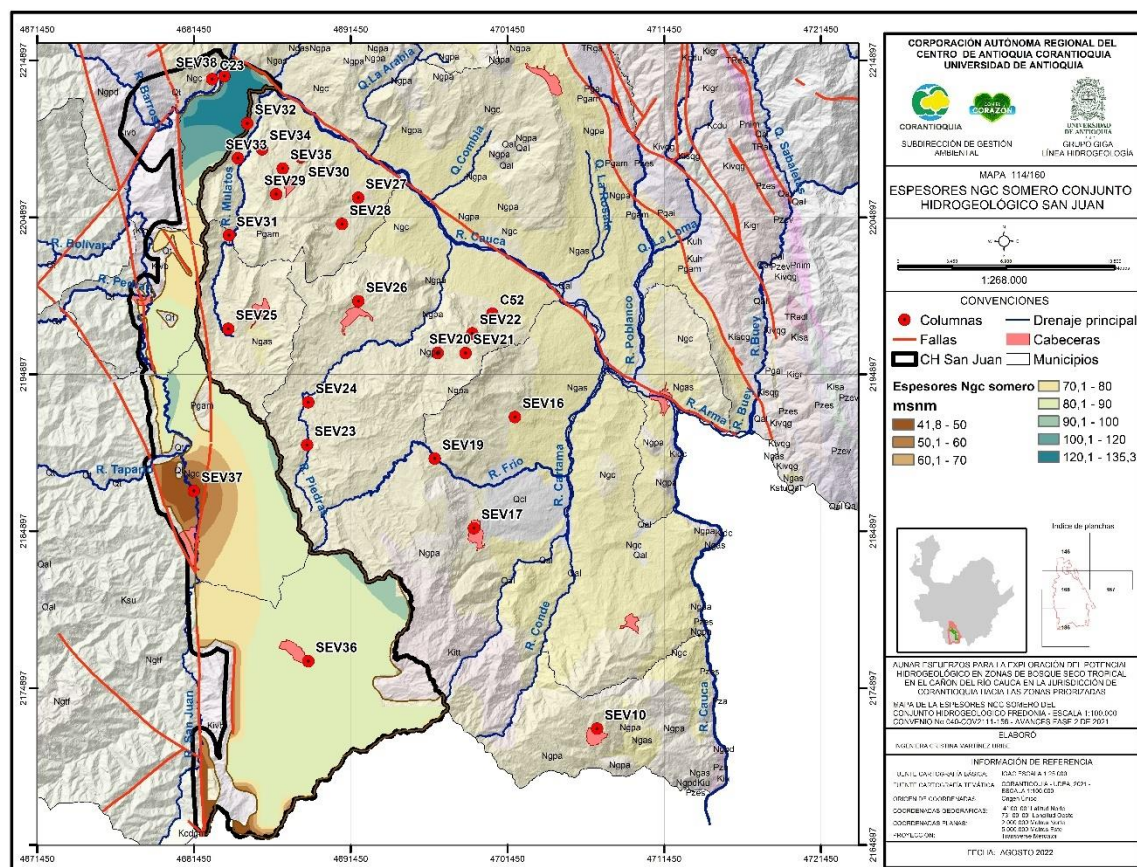
Con base en la interpretación hidroestratigráfica lograda a partir de cuatro sondeos geoelectricos, que registran las condiciones del subsuelo hasta 130 metros de profundidad (quedando los niveles más profundos sujetos a futuras exploraciones directas para corroborar la presencia de acuíferos confinados a mayor profundidad, como lo sugieren las columnas C23 y C24), se le otorga a los niveles someros de la Formación Combia en este conjunto el carácter de acuífero libre, con un posible nivel confinado. En promedio el espesor de capas permeables, según la información disponible, sería de 63 m (Tabla 27).

**Tabla 27. Síntesis de características hidroestratigráficas según información disponible y SEV (realizados para este estudio) en el conjunto San Juan.**

Columna	Espesor columna	Espesor acumulado Ngc mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngc
C23	45,7	37,9	2
SEV32	130	14,2	1
SEV36	85	2,46	1
SEV37	44,4	0	0
SEV38	80	63,2	2

De la interpolación espacial de estos registros se obtiene el mapa de espesores para los niveles superiores de la Formación Combia, que se presenta en la Figura 92; de acuerdo con este, los espesores disminuyen en sentido Este – Oeste, registrándose

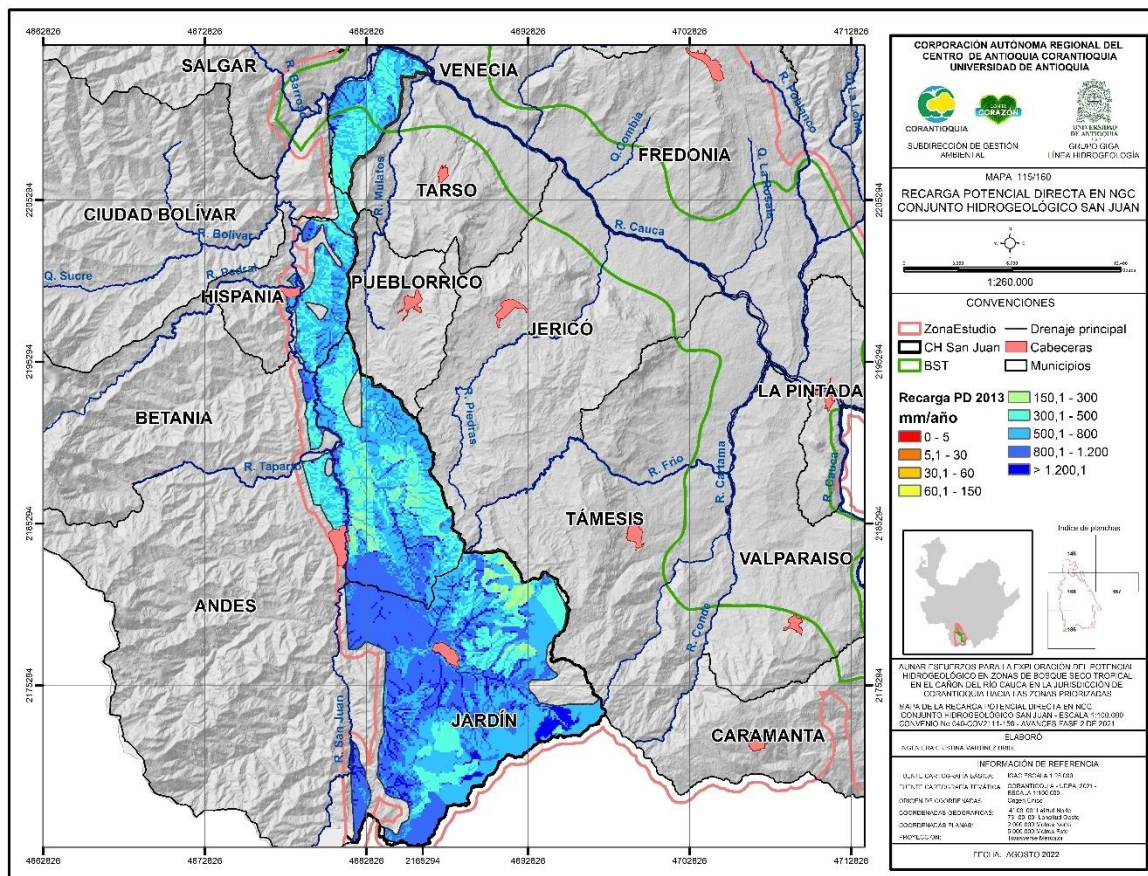
valores superiores a 120 m en el extremo Norte-Este, decayendo a magnitudes entre 42 y 50 m entre del casco urbano de Andes y la confluencia del río Tapartó al río San Juan, el rango de espesores que más se presenta en el conjunto es entre 80 y 90 m.



**Figura 92. Espesor del acuífero Combia somero en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Elaboración propia).**

Dentro de los límites de exploración que se tienen a la fecha, de acuerdo con las dimensiones de extensión y profundidad conocidas y multiplicando el área por el espesor, se calcula que el volumen sólido de la unidad hidrogeológica en consideración tendría al menos 25 km<sup>3</sup>. Si se tienen en cuenta las características texturales que se derivan de la descripción de la geología en los SEV localizados en este conjunto; asumiendo una porosidad eficaz mínima entre 5 y 20% y considerando los valores de espesores permeables; se obtendrían volúmenes de agua almacenada entre 0,3 y 1,2 km<sup>3</sup>.

De acuerdo con los cálculos de recarga obtenidos mediante balance hídrico distribuido (Bastidas et al., 2022), la recarga potencial directa en un año medio en este conjunto (Figura 93) podría llegar a más de 200 millones de metros cúbicos; sin embargo, en condiciones extremas de sequía como El Niño de 2016 podrían ser tan solo de 0,036 km<sup>3</sup> (36'000.000 m<sup>3</sup>).

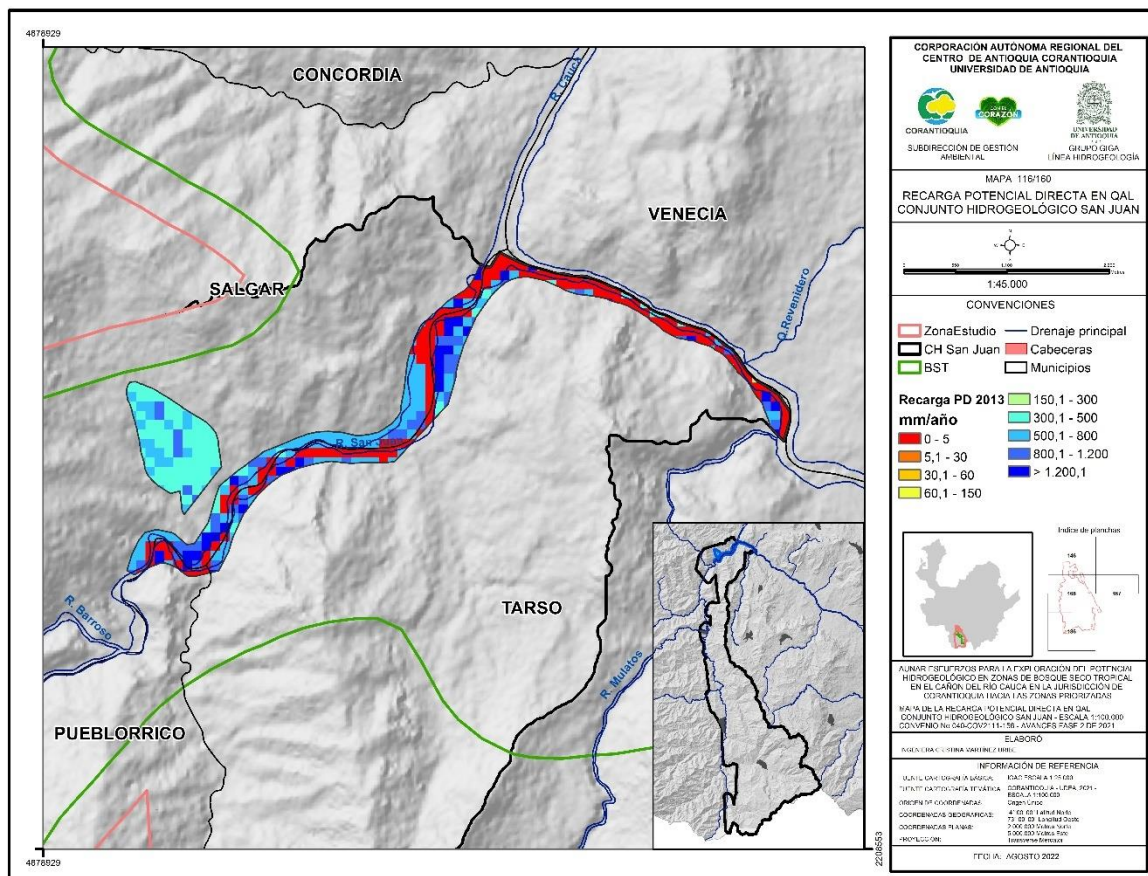


**Figura 93. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre la unidad geológica Combia en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

Las propiedades hidráulicas asociadas a la Formación Combia a partir de una prueba de bombeo realizada en el municipio de Jardín, dieron como resultado valores de transividad de 3,02 m<sup>2</sup>/día y una conductividad hidráulica de 0,031 m/día; teniendo en cuenta los resultados de los estudios geofísicos realizados la conductividad varía entre 0,06 y 0,09 m/día, con transividades que varían entre 0,77 y 4,94 m<sup>2</sup>/día.

### 1.1.1.2 Depósitos aluviales

Con respecto a la unidad hidrogeológica asociada a los depósitos aluviales del río San Juan o en su confluencia al río Cauca, en este conjunto no se cuenta con información sobre exploración directa o indirecta del subsuelo en los 3,4 km<sup>2</sup> en los que esta unidad aflora. Si se tienen en consideración los resultados del balance hídrico distribuido, realizado por Bastidas et al., (2022), estarían ingresando al subsuelo, en un año medio, alrededor 1,7 millones de metros cúbicos (Figura 94) y en un año seco tan solo 53.000 m<sup>3</sup>.



**Figura 94. Distribución de la recarga potencial directa en condiciones de año medio sobre depósitos aluviales en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Adaptado de Bastidas et al., 2022).**

### 1.1.1.3 Superficie piezométrica y aprovechamiento del agua

La superficie piezométrica preliminar (Figura 95), que se modela a partir de información del inventario de puntos de agua, insinúa un movimiento del agua. En este conjunto, el inventario permitió la identificación de 92 manantiales, 85 de ellos en Combia; 5 aljibes, 4 de ellos en Combia y 2 piezómetros, ambos en Combia; para un total de 99 puntos de agua inventariados dentro del conjunto San Juan. Los caudales aforados o que se aprovechan para satisfacer necesidades de la población llegan hasta 5,8 l/s en un punto sobre la Formación Combia, y en un caso superando dicho valor (Figura 96), según se estima a partir de las propiedades geofísicas evaluadas en los SEV 32, 36, 37 y 38, de los niveles someros de esta unidad podrían extraerse entre 1 y 10 l/s de agua.

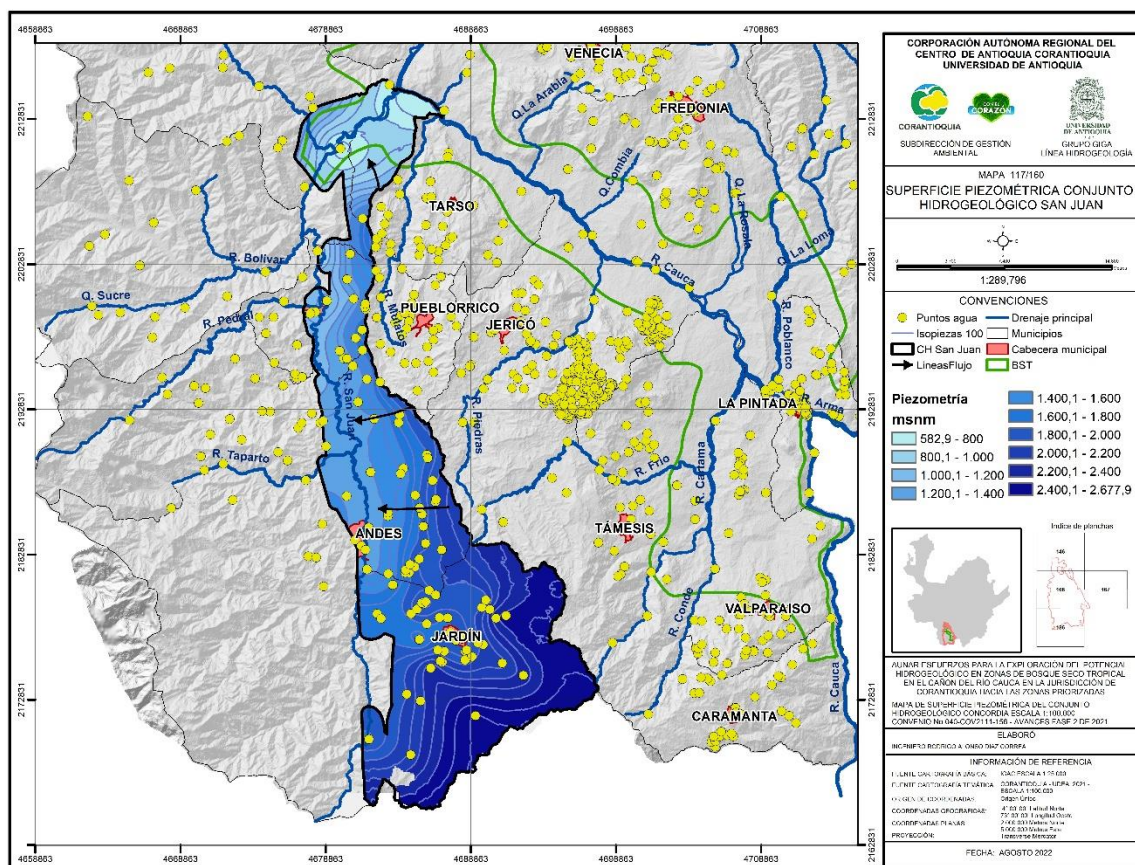
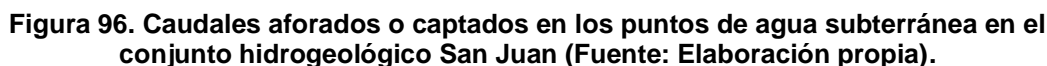
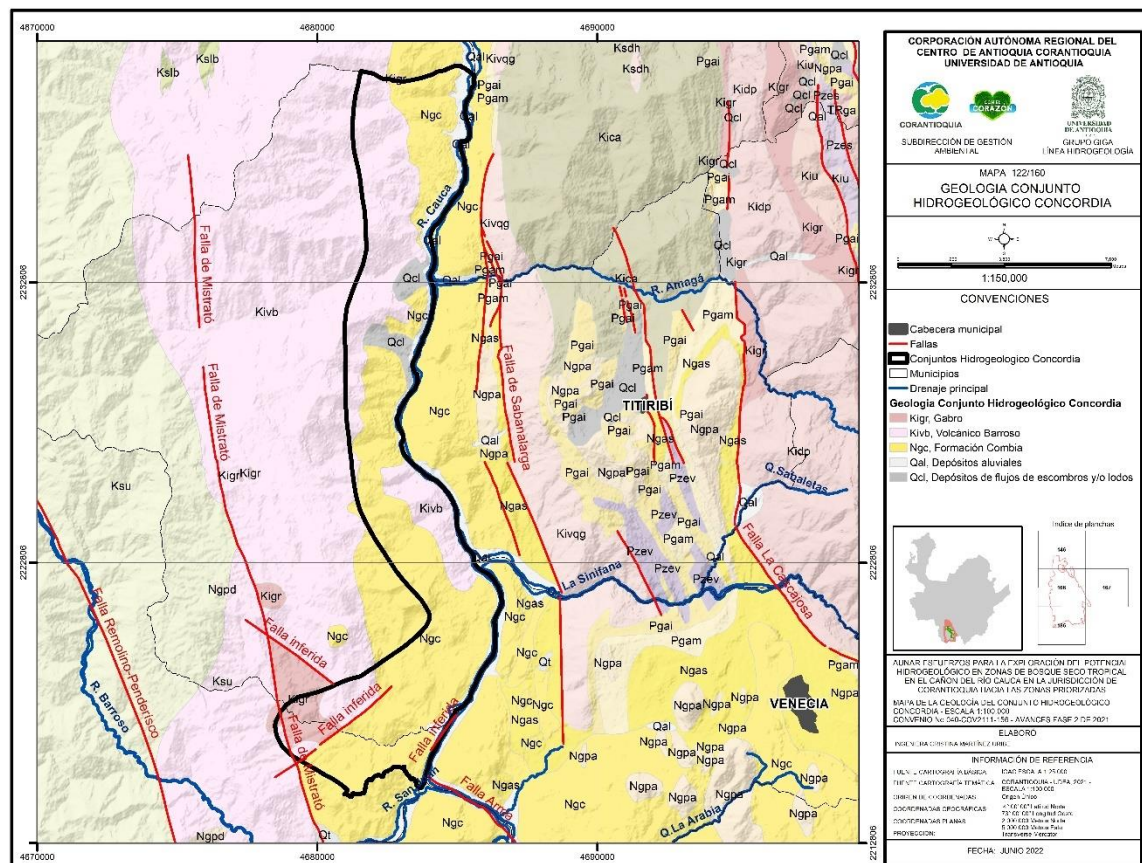


Figura 95. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico San Juan (Fuente: Elaboración propia).



### 8.2.7 Conjunto hidrogeológico Concordia

El conjunto hidrogeológico Concordia se localiza al noroeste de la zona de estudio, inmediatamente al oeste del río Cauca. Es un área con forma alargada de Norte a Sur paralelo al borde occidental del río Cauca. Las poblaciones más cercanas a este conjunto son el municipio de Concordia y su corregimiento Moritos, y el corregimiento Bolombolo de Venecia (Figura 97).



**Figura 97. Delimitación del conjunto hidrogeológico Concordia y las unidades geológicas prioritizadas por su potencial acuífero (Fuente: Adaptado de: SGC, Cartografía Geológica escala 1:100.000).**

El ejercicio de correlación contó, para este conjunto con información de las columnas estratigráficas que se presentan en la Figura 98, en ella se reúnen descripciones procedentes de estudios geológicos, perforaciones y pruebas geofísicas.



Dentro del conjunto Concordia, la Formación Combia tendría una expresión en superficie de 44,8 km<sup>2</sup>. Al no contar con información suficiente para modelar la variación espacial de sus espesores, solo puede establecerse -de los registros de las columnas C49 y C50- que su profundidad alcanzaría aproximadamente 200 m (Tabla 28); dentro de ellos existiría un acuífero libre y, posiblemente, otro confinado. De acuerdo con los resultados de cálculo de recarga, a partir de balance hídrico distribuido, se estima que a esta unidad ingresaría en promedio anualmente alrededor de 24,3 millones de metros cúbicos de agua (Figura 99); en un escenario El Niño esta cifra caería a 270.717 m<sup>3</sup>.

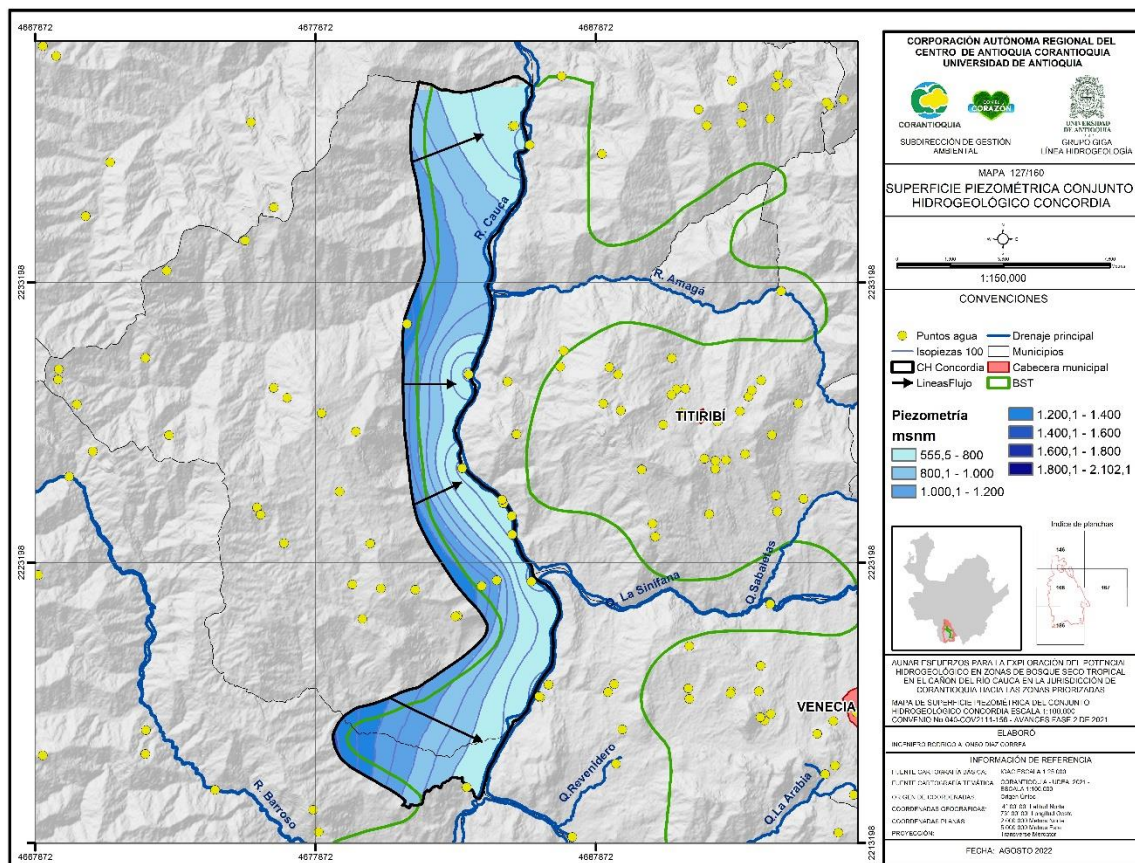
Columna	Espesor Columna	Espesor acumulado Ngc mantos permeables [m]	Número de mantos permeables en Ngc
C40	135	135	1
C49	857	284	1
C50	907	526	2



Los depósitos aluviales en la margen izquierda del río Cauca, definen una delgada franja en sentido Sur-Norte, alcanzando una manifestación superficial de 6,4 km<sup>2</sup>. No se cuenta con registros de exploración que permitan describir la composición y espesores de estos depósitos. De acuerdo con los resultados de cálculo de recarga, a partir de balance hídrico distribuido en un año medio se estima que a esta unidad ingresaría anualmente alrededor de 1,8 millones de metros cúbicos de agua (Figura 100); para un período El Niño solo alcanzaría 41.000 m<sup>3</sup> de agua. Una prueba hidráulica realizada sobre los depósitos aluviales en este conjunto reporta una conductividad hidráulica de 0,92 m/día



La superficie piezométrica (Figura 101) preliminar, que se modela a partir de información del inventario de puntos de agua, muestra claramente un sentido de flujo subterráneo hacia el río Cauca. En este conjunto, el inventario permitió la identificación de 4 manantiales sobre la Formación Combia, así como 4 manantiales y un aljibe sobre los depósitos aluviales. El agua de estos puntos es aprovechada para suplir necesidades de la población, extrayéndose caudales de hasta 0,67 l/s en Combia (Figura 102).



**Figura 101. Superficie piezométrica y líneas de flujo hidrogeológico en el conjunto hidrogeológico Concordia (Fuente: Elaboración propia)**



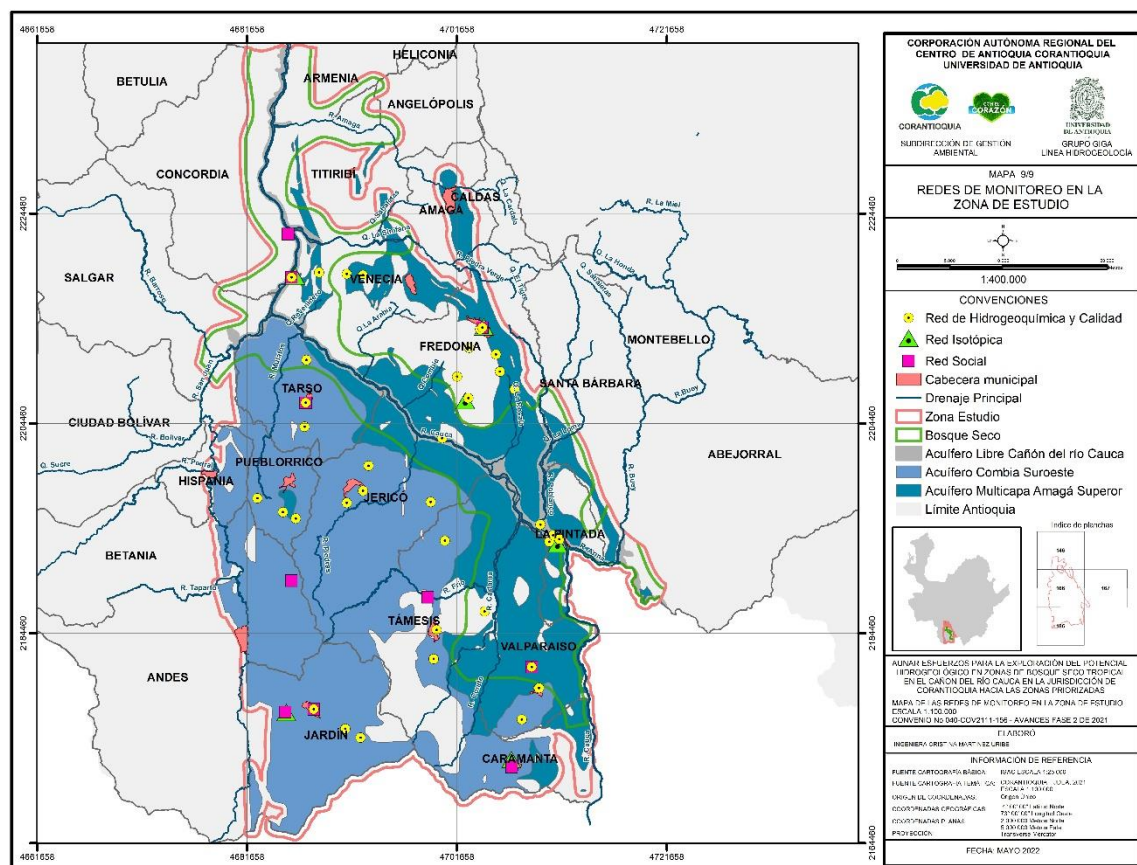


Figura 103. Puntos que conforman las redes de monitoreo hidrogeológico.



## 9.1 RED SOCIAL DE MONITOREO

Tiene como objetivo: medir y observar entre todos para el cuidado de un recurso común.

El papel de la participación ciudadana en la gestión del conocimiento y manejo del agua en diversos países y regiones con necesidades específicas ha sido creciente y las instituciones académicas y gubernamentales han incluido los monitoreos participativos, con el fin de buscar democratizar la ciencia, hacerla accesible a diversos públicos y, sobre todo, cercana para la resolución y gestión de problemas reales de contaminación y escasez del agua.

Es aquí, donde se retoma la importancia de reconocer el diálogo entre los saberes locales y territoriales y el conocimiento científico, ampliando las posibilidades de construcción colectiva de alianzas, acuerdos y escenarios deseables para hacerle frente a las problemáticas y amenazas a las que están expuestas las fuentes hídricas.

En el marco del proyecto de exploración hidrogeológica en zona de Bosque Seco, en la conformación de una red de monitoreo piloto hidrogeológica, con participación de actores sociales, se comprende el monitoreo como el seguimiento de unos parámetros de interés del agua subterránea, siguiendo un orden y metodología y con el fin de

	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	
---	---	---

conocer, a partir de la medición periódica por partes de dichos los en sus puntos de agua, variaciones en cantidad y algunas variables ambientales que podrían afectar dicho parámetro.

Producto del trabajo y del ajuste de modos de operar, hoy se cuenta con una red conformada por varios actores clave que miden y registran datos hidrológicos e hidrogeológicos (Tabla 29), sirviéndose de algunos instrumentos de medición de los que han sido provistos. En el documento soporte y los anexos del Alcance 5 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, se pueden consultar los detalles de la operación de la red social de monitoreo en el suroeste de Antioquia.

**Tabla 29. Actores participantes en la Red de Monitoreos Social.**

Municipio	Entidad/Organización	Actor	Rol
Támesis	Agua de la Peña	Pequeños productores o propietarios de fincas	Que dentro de sus actividades productivas y/o domésticas hace uso del agua subterránea
Venecia	Jugos Don Lalo		
Andes	Finca Villa Elvira		
Caramanta	Finca El Pocito		
Jardín	Dulces del Jardín		
Tarso	Finca Filo Seco		
Valparaiso	Finca Villa Laura		
Jardín	Institución Educativa Miguel Valencia	Instituciones Educativas Básicas y Secundarias	Actor con competencias de conocimiento apoyo o asesoría
Concordia	Acueducto Corregimiento San José del Golpe	Juntas Administradoras del Acueducto	Que los puntos de agua reconocidos funcionan como fuente de abastecimiento público o gestión geológica
Fredonia	Galerías del Cerro Combia	Sector Institucional y Comunitario	

Como estrategia de fortalecimiento de la Red de Monitoreo se realizó el diseño de mecanismos de instrumentación (Fotografías 10), con los cuales los actores clave participantes del proceso puedan tomar las medidas de nivel, caudal y donde se incluyó la variable de la lluvia, a través de la instalación de pluviómetros con el fin de encontrar una correlación entre la precipitación y la recarga de los acuíferos. Para este fin se construyeron fichas de caracterización por punto de agua, que contaba con los datos obtenidos del inventario y de acuerdo a los acercamientos desarrollados con los participantes de la red en los puntos priorizados, así como con los recorridos en campo ejecutados para verificar las condiciones del punto y las necesidades de instrumentación y conocimiento.

De acuerdo a las condiciones de los puntos, así como a la disposición, nivel de acceso y conocimiento a herramientas digitales y análogas por parte de los actores se determinaron las siguientes herramientas

- **Sonda para medición de niveles en aljibes y pozos:** para la medición del nivel freático en aljibes, pozos y piezómetros que no superen los 30 metros de profundidad. La sonda es un prototipo electrónico alimentado por un batería de 9V adosado a una cinta métrica tipo lienzo. En el momento en que la punta de la

lienza entre en contacto con el agua emitirá una señal auditiva y luminosa que te indicará el punto exacto para medir el nivel freático de tu captación de agua.

- **Piezómetros:** con el objetivo de facilitar la medición de niveles en puntos que tienen cerca un manantial
- **Cronómetros:** con el fin de facilitar a los actores participantes la toma de muestra de caudal en los manantiales.
- **Recipiente para la toma de muestra de agua:** en manantiales donde se mide caudal
- **Linternas:** con el fin de apoyar la observación en piezómetros
- **Flexómetros:** con el objetivo de medir los niveles de agua en los piezómetros
- **Pluviómetros:** con el propósito de medir la cantidad de lluvia en un día



**Fotografías 10. Instrumentación Red de Monitoreo Social en los municipios de Andes, Concordia y Jardín.**



Fotografías 11. Entrega de resultados en el municipio de La Pintada.

## 9.2 RED DE MONITOREO HIDROGEOQUÍMICO

El monitoreo hidrogeoquímico tiene como propósito explorar los procesos que controlan la composición química del agua subterránea, así como interpretar el origen y modo de recarga, identificar las posibles interacciones agua superficial-agua subterránea, validar las direcciones de flujo del agua obtenidas mediante las superficies piezométricas, e identificar relaciones existentes con otros sistemas acuíferos; soportado en que la composición química del agua subterránea es el resultado combinado de la composición del agua que ingresa al acuífero, y sus reacciones con los minerales presentes en la roca a través de la cual circula, o con la que ha estado almacenada, el contacto con aguas de diferente origen o composición, o con sustancias contaminantes que afectan su calidad (Appelo, C. A., & Postma, 2005).

Un cambio en el comportamiento de la hidrogeoquímica del acuífero permite identificar cuando existen modificaciones en las condiciones de flujo, cuando ha cambiado la calidad del recurso y/o existen cambios en la entrada de agua al sistema que alteran su composición natural. Además, la hidrogeoquímica es una herramienta que ayuda a responder preguntas específicas que se tienen del modelo hidrogeológico conceptual y del funcionamiento del acuífero. También puede ayudar a identificar los impactos o relaciones que tienen algunas actividades económicas y productivas que pueden modificar el funcionamiento del acuífero.

Para este estudio se diseñó una red de monitoreo hidrogeoquímica que tuvo en cuenta aspectos como el conocimiento que a la fecha se tiene de las unidades hidrogeológicas, la geología, las direcciones de flujo, las características hidráulicas, las zonas de recarga del sistema, la información levantada del inventario de puntos de agua subterránea y la interpretación de los datos hidrogeoquímicos y de calidad disponibles en la zona de estudio. Los 37 puntos de monitoreo seleccionados hacen parte del inventario de puntos de agua.

Es importante mencionar que las redes de monitoreo hidrogeoquímico y de calidad son dinámicas en el tiempo y podrán incluir nuevos puntos y parámetros a medir en el futuro. Dado que esta es la primera vez que se realiza un monitoreo hidrogeoquímico en la zona de estudio, a partir de este primer análisis hidrogeoquímico podrán generarse

nuevas hipótesis para la validación del modelo conceptual. Para este estudio se diseñó una red de monitoreo hidrogeoquímico y se llevó a cabo la toma de muestras para la primera caracterización, los detalles se incluyen en el documento soporte del Alcance 4 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA.

### 9.3 RED DE MONITOREO ISOTÓPICO DE LA LLUVIA

La utilización de los isótopos estables del agua, como deuterio  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ , es muy útil para identificar las diferentes fuentes de recarga de agua subterráneas y distinguir aguas con una composición química similar, ya que son trazadores ideales porque son parte de la molécula de agua y no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua (Dickinson, y otros, 2006 citado en IDEAM e INVEMAR, 2018). Éstos también pueden conjuntamente con la hidroquímica se utilizan frecuentemente para identificar las trayectorias de flujo, conexión entre aguas subterráneas-aguas superficiales (ríos, quebradas, humedales, lagunas), mezcla de aguas, intrusión marina, evaporación en ríos, lagunas” (Mook, 2002).

En las fases de evaporación y condensación del agua, la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en una molécula de agua sufre pequeños cambios. Como resultado de ello, en diferentes etapas del ciclo hidrológico el agua queda marcada, de manera natural, con huellas isotópicas que varían en función del historial de una masa de agua en particular y de su recorrido por el ciclo hidrológico. En cada etapa del ciclo hidrológico, se registra un pequeño cambio consistente en una diferencia en la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en el agua que es tan singular como una huella dactilar. Estos cambios pueden identificarse a partir de la espectrometría de masas, que nos indica la diferencia en peso de las composiciones isotópicas (Mook, 2002).

La isotopía debe considerar siempre la integralidad del ciclo hidrológico, y el primer paso es caracterizar el agua lluvia (entrada de agua al sistema hidrogeológico). Por esta razón se diseñó la red de monitoreo isotópica de agua lluvia que se fundamentó en 3 aspectos principales: i) considerar las direcciones de flujo del agua subterránea que quisieran validarse a partir del monitoreo isotópico, ii) identificar las diferencias en altura que se presentan en la zona de estudio, dentro de esto deberán ubicarse con una separación superior a 500 m para observar diferencias significativas, iii) variaciones en la precipitación en la zona de estudio. La red definida está conformada por 6 totalizadores de agua lluvia.

Los primeros resultados de análisis isotópicos se encuentran en el documento soporte del Alcance 3 del convenio entre la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA.

## 10 CONSIDERACIONES FINALES

El territorio sobre el que se localiza el suroeste de Antioquia está marcado por una historia de evolución que se cuenta en millones de años: La configuración de las rocas; la fisiografía; la red de drenaje; la variabilidad del clima desde las riberas del Cauca, a lo largo de los escarpes y hasta las cúspides de las cordilleras; los ecosistemas naturales y el incidir de la presencia humana, son todos factores que hoy conjugan una complejidad determinante de la presencia y, con ella, del potencial del agua subterránea.

Se ha priorizado el ecosistema Bosque Seco Tropical dada su fragilidad y el hecho de que casi ha desaparecido. Se ha entendido que, más allá de definir los límites que

enmarcan ese bioma, es necesario entender las transiciones e identificar las rutas del agua y de la sociedad que tiene incidencia en su presencia y en la posible recuperación.

La caracterización socioeconómica de la zona de estudio revela una marcada diferencia en las condiciones de vida entre las zonas urbanas y las áreas rurales, viéndose que en estas últimas suelen presentarse más carencias y dificultades, especialmente en relación a las coberturas de servicios públicos. También las condiciones por municipio revelen desigualdad, reportándose mayores índices de necesidades básicas insatisfechas y condiciones de pobreza en Pueblo Rico, Tarso, La Pintada. La presión sobre el recurso hídrico superficial, según los estudios nacional y regionales del agua alertan sobre la alta presión que se registra por uso y calidad en Caramanta, Valparaíso, Pueblo Rico.

La suma de más de 850 puntos de agua subterránea, los registros de usos y caudales de extracción en más de 400 y los cálculos de unos volúmenes -cerca de 0,9 millones de metros cúbicos al año- de demanda soportados en solo esos registros, ponen en evidencia la dependencia que del agua subterránea se tiene en la región, para suplir necesidades básicas de la población.

Las 42 pruebas geofísicas ejecutadas permitieron afinar la visión de los niveles más someros de las unidades geológicas priorizadas y arrojaron claras luces sobre las áreas que podrían revestir mayor interés, desde el punto de vista de sus propiedades de porosidad y permeabilidad inferidas.

Por otra parte, la modelación de una primera superficie piezométrica pone en clara evidencia las rutas de flujo del agua subterránea, dirigiendo desde las zonas de recarga el agua hacia los dominios de la zona demarcada como BsT, aportando caudal base a las corrientes principales, demarcando claras divisorias de agua y zonas privilegiadas para la recarga.

Con el fin de tener una mejor comprensión de la variabilidad espacial de las unidades acuíferas identificadas y teniendo en cuenta criterios de extensión, complejidad estructural, características geomorfológicas, direcciones de flujo del agua subterránea e interacciones con aguas superficiales según cuencas hidrográficas, se segmentó la zona de estudio en siete de sistemas a los cuales se les llamó conjuntos hidrogeológicos.

En la Tabla 30 se presenta una síntesis comprensiva de las principales características que describen los elementos empleados para la correlación de los siete conjuntos hidrogeológicos; siguiendo la misma disposición presentada antes, se efectúa la presentación considerando, de forma separada, las tres unidades geológicas priorizadas.

**Tabla 30. Síntesis de las principales características de los conjuntos hidrogeológicos de la zona de análisis**

Característica	Sinifaná	Poblanco	Fredonia	Cartama	Piedras-Mulatos	San Juan	Concordia
Ngas	80 km <sup>2</sup>	142 km <sup>2</sup>	167 km <sup>2</sup>	249 km <sup>2</sup>	59 km <sup>2</sup>		
Vol Ngas	0,4 y 1,6 km <sup>3</sup>	0,6 y 2,2 km <sup>3</sup>	0,4 y 1,8 km <sup>3</sup>	1,0 y 3,9 km <sup>3</sup>	0,2 y 0,5 km <sup>3</sup>		
Recarga (seco)	623.000 m <sup>3</sup>	430.000 m <sup>3</sup>	500.000 m <sup>3</sup>	3.500.000 m <sup>3</sup>	411.000 m <sup>3</sup>		
Recarga (Medio)	18,5 m <sup>3</sup>	29,5 m <sup>3</sup>	16,0 m <sup>3</sup>	83,1 m <sup>3</sup>	25,1 m <sup>3</sup>		
K (pruebas)				0,3 m/día	0,2m/día		
K (SEV)	0,06 m/día		0,06 m/día	0,1 m/día	0,07 m/día		
# Manantiales	38	18	10	42	18		

Característica	Sinifaná	Poblanco	Fredonia	Cartama	Piedras-Mulatos	San Juan	Concordia
# Aljibes	4	3		28			
# Galerías							
# Pozos o piezómetro	1	2		1			
Ngc	9 km <sup>2</sup>	29 km <sup>2</sup>	103 km <sup>2</sup>	185 km <sup>2</sup>	259 km <sup>2</sup>	302 km <sup>2</sup>	44,8 km <sup>2</sup>
Vol Ngc				0,28 y 0,9 km <sup>3</sup>	0,5 y 1,9 km <sup>3</sup>	0,3 y 1,2 km <sup>3</sup>	
Recarga (seco)	62.400 m <sup>3</sup> /año	132.000 m <sup>3</sup> /año	1.800.000 m <sup>3</sup> /año	4.700.000 m <sup>3</sup> /año	10.500.000 m <sup>3</sup> /año	36.000.000 m <sup>3</sup> /año	270.700 m <sup>3</sup> /año
Recarga (Medio)	17,7 m <sup>3</sup> /año	6,9 m <sup>3</sup> /año	34,7 m <sup>3</sup> /año	102,6 m <sup>3</sup> /año	155,5 m <sup>3</sup> /año	212,9 m <sup>3</sup> /año	24,12 m <sup>3</sup> /año
K (pruebas)					0,014 m/día	0,031 m/día	
K (SEV)		5,92 m/día	0,27 m/día	0,5 m/día	12 m/día SEV21 y 4,6 m/día SEV26	0,07 m/día	
# galerías	7	6					
# manantiales	7	20	30	113	298	85	4
# aljibes			3			4	
# pozos o piezómetros					1	2	
Qal	4 km <sup>2</sup>	12,61 km <sup>2</sup>	8 km <sup>2</sup>	3,4 km <sup>2</sup>	5,24 km <sup>2</sup>	3,4 km <sup>2</sup>	6,4 km <sup>2</sup>
Vol Qal							
Recarga (seco)	50.000 m <sup>3</sup> /año	66.800 m <sup>3</sup> /año	52.000 m <sup>3</sup> /año	16.000 m <sup>3</sup> /año	49.000 m <sup>3</sup> /año	53.000 m <sup>3</sup> /año	40.732 m <sup>3</sup> /año
Recarga (Medio)	2,2 m <sup>3</sup> /año	5,5 m <sup>3</sup> /año	3,7 m <sup>3</sup> /año	1,2 m <sup>3</sup> /año	2,5 m <sup>3</sup> /año	1,7 m <sup>3</sup> /año	1,8 m <sup>3</sup> /año
K (pruebas)		3,7 m/día		21,4 m/día			0,92 m/día
K (SEV)	0,08 m/día		0,07 m/día		0,09 m/día		
# manantiales	1		2	1			4
# aljibes		10	5	11		1	1
# pozos		1					
Q SEV Ngas	Menor a 1 l/s	10-50 l/s	Menor a 1 l/s	1 - 10 l/s	1 - 10 50 l/s		
Q SEV Ngc			1 -10 l/s	10 – 30 l/s	Hasta más de 50 l/s	1 – 10 l/s	
Q SEV Q	1 – 10 l/seg		1 -10 l/s		Menos a 1 l/s		
Aforo	1.77 l/s (Ngc)	5,68 l/s (Ngas)	2.84 l/s (Ngas)	1,0 l/s (Ngc)	3,0 l/s (Ngc)	5.8 l/s (Ngc)	0,67 7/s (Ngc)
Usos del agua subterránea	Doméstico, agropecuario, abastecimiento público. Geotécnia	Doméstico, agropecuario. Geotécnia	Doméstico, agropecuario, abastecimiento público	Doméstico, agropecuario, abastecimiento público	Doméstico, agropecuario, abastecimiento público	Doméstico, agropecuario	Doméstico, agropecuario, abastecimiento público
Calidad	Mala para consumo humano, adecuada para agricultura o industria	Mala para consumo humano, adecuada para agricultura o industria	Mala para consumo humano, adecuada para agricultura o industria	Mala para consumo humano, adecuada para agricultura o industria	Mala para consumo humano, adecuada para agricultura o industria	Mala para consumo humano, adecuada para agricultura o industria	

El acuífero multicapa asociado al Miembro Superior de la Formación Amagá, con un área cercana a 700 km<sup>2</sup>, estaría disectado por la Falla Arma que tiene su traza paralela al río Cauca. El 55% de su extensión se ubica sobre la margen derecha del Río y el 45% hacia la margen izquierda. Asumiendo condiciones de porosidad relacionadas con las características texturales de las capas permeables, el volumen medio de agua subterránea que podría almacenarse en esta formación sería de unos 6,5 km<sup>3</sup>. Según los cálculos de balance hídrico para año medio, a la formación Amagá podrían ingresar 172 millones de metros cúbicos de agua, lo que corresponde a un 2,7% del agua total que allí podría almacenarse. En un año crítico como lo fue 2016, esta cifra puede reducirse a niveles de 5,5 millones de metros cúbicos, valor que es inferior al 0,1% de la capacidad de almacenamiento. Lo poco que se tiene registrado en términos de conductividad hidráulica, revela valores inferiores a 0,5 m/día. Se tienen registros levantados para casi 170 puntos de agua desde los cuales se toma agua para satisfacer necesidades locales de m

La unidad hidrogeológica asociada a la Formación Combia tiene una extensión cercana a los 1.000 km<sup>2</sup>, con el 85% de sus afloramientos hacia la margen izquierda del Río Cauca. De acuerdo con los datos de exploración directa e indirecta disponible para esta

margen del río, se estiman espesores que pueden llegar a alcanzar valores cercanos a 800 m sin tener registro del basamento. A lo largo de esta unidad se tendría la presencia de al menos dos importantes capas permeables; no obstante, los registros de mayor detalle son de naturaleza indirecta y rara vez sobrepasan los 200 m. Asumiendo condiciones de porosidad relacionadas con las características texturales de las capas permeables el volumen medio de agua subterránea que podría almacenarse en los niveles más someros de esta formación sería de unos 2,0 km<sup>3</sup> de agua subterránea. Según los cálculos de balance hídrico para año medio, a la formación Combia podrían ingresar más de 300 millones de metros cúbicos de agua, lo que corresponde a cerca del 17 % del agua que en las capas más permeables podría almacenarse. En un año crítico, como lo fue 2016, esta cifra puede reducirse a niveles de 17,2 millones de metros cúbicos valor que es inferior al 1% de la capacidad de almacenamiento. Pese al poco conocimiento de las características hidráulicas locales, se han inferido magnitudes de 6 m/día a 8 m/día. Se tienen registros levantados para más de 580 puntos desde los cuales se toma agua para satisfacer necesidades locales de moradores de la región; los caudales de aprovechamiento pueden llegar a 5,8 l/s.

Depósitos cuaternarios que por sus dimensiones han sido reportados en la cartografía regional y que abarcan un área aproximada de 43 km<sup>2</sup>, son representativos en todos los conjuntos hidrogeológicos y están asociados a depósitos aluviales, aluviotorrenciales y de vertiente, siendo los más representativos los asociados a los cauces de agua principales; ellos, como ya se mencionó, albergarían al menos un acuífero libre. La recarga en condiciones promedio puede superar los 18 millones de m<sup>3</sup>, sin embargo, en un año con presencia del fenómeno de El Niño, puede caer a menos de 330 millones. El inventario de que se dispone para el acuífero aluvial es escaso, reportándose a la fecha 31 puntos de agua.

En términos de los hallazgos de este estudio, habría varios aspectos a destacar:

- Si se efectúa un cruce de las condiciones hidrogeológicas con las características socioeconómicas y el estado de uso y presión sobre el recurso hídrico superficial en los municipios que tienen representatividad en la zona de estudio, se puede evidenciar que para todos ellos el agua subterránea está constituyendo un recurso que, quizá de forma no tangible, está supliendo las necesidades vitales de muchas comunidades rurales, siendo este el sector poblacional más vulnerable y para el cual se reportan las condiciones menos favorables en relación con la calidad de vida; pese a las variaciones espaciales en las magnitudes de extensión, volumen, recarga y conductividad, en toda la zona de estudio es evidente la presencia e importancia del agua subterránea.
- Es significativo evidenciar como las zonas que aquí se han agrupado en los conjuntos Cartama y Piedras-Mulatos, reúnen una serie de características que hacen especialmente importante ahondar en el estudio de las reales reservas de agua subterránea. En ese orden de ideas, la Formación Combia tiene un papel fundamental al identificarse en ella excepcionales posibilidades de fuente de abastecimiento para satisfacer necesidades de la población y al concentrar en las partes más altas zonas con alto potencial acuífero y en términos regionales al representar una zona de recarga que encausa el agua hacia las partes bajas del escarpe, con una influencia por evaluar sobre el Miembro Superior de la Formación Amagá.

- Las líneas de flujo que se definen con base en la superficie piezométrica, en ambas vertientes del río Cauca, muestran de manera contundente la relación hidráulica que existiría entre las tres unidades hidrogeológicas definidas en este estudio: el acuífero multicapa del Miembro Superior de la Formación Amagá, el conjunto de al menos, dos capas acuíferas relacionadas con la Formación Combia, y el acuífero dispuesto sobre los depósitos aluviales.
- Desde ambas vertientes del río Cauca, el flujo de aguas subterráneas tiene una tendencia clara hacia las áreas en las que se localiza el polígono que envuelve las zonas con potencialidad para albergar el Bosque Seco tropical –BsT-, ello constituye una evidencia irrefutable del rol que los flujos subterráneos regionales tiene en términos del propósito de recuperar este ecosistema y de conservar los fragmentos que de él aún sobreviven.
- Todos estos hallazgos se traducen en argumentos para guiar la ruta a seguir, con el fin de completar el conocimiento que oriente las decisiones e intervenciones que el territorio requiere. Se revelan con claridad las zonas en las que se precisa exploración directa mediante perforaciones; es clara la necesidad de formular nuevos planes de manejo ambiental de acuíferos; es indispensable mantener la operación de las redes diseñadas y puestas en operación: la red social de monitoreo, la red hidrogeoquímica y la red de isotopía.

Para cerrar, vale la pena volver al inicio y mantener clara, de acuerdo con los propósitos de este estudio, que la idea de potencial hidrogeológico va más allá de la concepción de la hidrogeología clásica que concibe los acuíferos en virtud, principalmente, de la rentabilidad asociada al beneficio del agua subterránea para fines productivos. El potencial hidrogeológico radica en la presencia de agua subterránea, en la posibilidad de satisfacer, a partir de ellas, las necesidades básicas del ser humano y en el mantenimiento de su función para suministrar a los ecosistemas vulnerables la humedad que, desde el suelo, necesitan para mantener su existencia.

## 11 CITAS Y BIBLIOGRAFÍA

Akanmu, T. O., & Adewumi, A. J. (2016). Geophysical characterization of aquifer parameters within basement complex rocks using electrical sounding data from the polytechnic, Ibadan, Southwestern Nigeria. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, 4(5), 112-126.

Álvarez, A. J. (1983). Geología de la Cordillera Central y el Occidente Colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenoicos. *Boletín Geológico*, 26(2), 1-175.

Álvarez, J. J. R. (1982). Guía para la geología del flanco noroccidental de la cordillera central: Carretera Medellín-Amagá-Albania-Bolombolo. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (7-8), 168-187.

Álvarez-Gutiérrez, Y, Montoya-Cañola, S, Rendón-Giraldo, D y Caballero Acosta, J. (2015). Analysis and diagnosis of the instability affecting "La Bonita" área, Amagá, Antioquia, Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

AngloGold Ashanti. (2019). Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Minera de Cobre Quebradona por capítulos. <https://www.anglogoldashanticolombia.com/portfolio/quebradona/>

Appelo, C. A. & J. and Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*.

Arboleda, G., Celada, C., Forero, S., Montealegre, V., PADILLA, J.C., Carmona, J. Y Medina, E. (UTAGS-GE), 2009. Cartografía Geológica y muestreo geoquímico en la parte norte de la Cordillera Occidental, planchas 165 y 185 (396 kilómetros cuadrados) Contrato No. 392 de 2007 INGEOMINAS- UTAGS-GE. Bogotá. 172p. Bogotá. 178 p.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA, Universidad de Antioquia, (2013). Determinación de las Potenciales Zonas de Recarga en el Centro y Sur del Valle de Aburrá

ASF DAAC. (2015). ALOSPALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Co-rrected\_high\_res; Includes Material © JAXA/METI 2007.

Bastidas, B. D., Ossa, J., Martínez, C., Vela, M. A., Betancur, T., & Osorio, A. (2022). Region-scale estimation of potential groundwater recharge in soft and hard rock formations through a distributed water balance in the area of influence of the tropical dry forest in the Cauca River canyon, Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, 49(1), 77–101. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.1.2022.625>

Bastidas, B. (2019). Modelo conceptual de la recarga de aguas subterráneas en el nivel somero del Sistema Hidrogeológico Golfo de Urabá, evaluando su magnitud y variabilidad espacio-temporal [Bachelor Thesis]. Universidad de Antioquia.

Bedoya, R. Salazar, G. (1980). Estudio geológico y gravimétrico de la sección Amagá - Albania - Bolombolo -Antioquia – Colombia.

Bernet, M., Garcia, J. M., Chauvel, C., Londoño, M. J. R., & Marín-Cerón, M. I. (2020). Thermochronological, petrographic and geochemical characteristics of the Combia Formation, Amagá basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102897.

Betancur, T. (2008). Una aproximación al conocimiento de un Sistema acuífero tropical. Caso de estudio: Bajo Cauca antioqueño, Tesis doctoral, Universidad de Antioquia, Medellín

Betancur, T., & Martínez-Urbe, C., (2022). Potencial y perspectivas de exploración hidrogeológica en Antioquia según criterios litoestructurales. *Boletín Geológico*. Aceptado y en proceso de publicación.

Betancur, T., Duque, C., Martínez, C., García, D., Villegas, P., et al. (2018). Aplicación de una metodología para la delimitación de zonas potenciales de recarga. caso de estudio: Eje Bananero del Urabá Antioqueño-Colombia. *Hidrogeología Regional Volumen I en memorias, XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología*. Salta, Argentina, 183-189.

Betancur, T., Duque, J. C. D., Uribe, C. M., Giraldo, D. G., Yepes, P. P. V., & Zuñiga, V. P. (2020). Delimitación de las potenciales zonas de recarga-caso de estudio: acuífero multicapa del eje bananero del Urabá Antioqueño-Colombia. *Revista Politécnica*, 16(32), 41-55.

Betancur, T., Martínez-Urbe, C., García-Aristizábal, E. F., & Escobar-Martínez, J. F. (2017). Identification and characterization of regional water flows contributing to the recharge of an unconfined aquifer. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (85), 70-85.

Blandón Montes, A y Gorin, G. (2007). Variación vertical de la calidad y correlación de los mantos de carbón del miembro Sabaletas de la formación Amagá. *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales*.



Borchert, R. (1994). Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology*, 75(5), 1437-1449.

Botero, G. (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales de la Escuela Nacional de Minas*.

Brkić, Ž., Kuhta, M., Larva, O., & Gottstein, S. (2019). Groundwater and connected ecosystems: an overview of groundwater body status assessment in Croatia. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0261-6>

Bullock, S. H., Mooney, H. A., & Medina, E. (Eds.). (1995). *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge University Press.

Bustamante Arias, S. (2011). Interpretación de registros eléctricos en los pozos Venecia-1, el Cinco-1b y Rincón Santo para la evaluación del gas asociado al carbón (CBM) en la cuenca Amagá.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803</p>	<p>Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA hacia las zonas priorizadas</p>	 <p>CORANTIOQUIA</p>
--	---	---

Calle, B. Gonzalez, H. (1980). Geología y Geoquímica de la plancha 166, Jericó. Memoria explicativa. Instituto Colombiano de geología y minería - INGEOMINAS.

Calle, B. Gonzalez, H. (1982). Geología y Geoquímica de la plancha 186, Riosucio. Informe No I-1878, Instituto Colombiano de geología y minería - INGEOMINAS.

Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia. (2019). Perfiles socioeconómicos de las subregiones de Antioquia. Recuperado de <https://www.camaramedellin.com.co/DesktopModules/EasyDNNNews/DocumentDownload.ashx?portalid=0&moduleid=569&articleid=480&documentid=149>

Campuzano, J. (1977). Facies en los pisos inferior y medio del Terciario Carbonífero Titiribí Antioquia. Boletín de Ciencias de la Tierra. Medellín. 2:123-146.

Chapelle, F. H., Bradley, P. M., McMahon, P. B., & Lindsey, B. D. (2009). What does “water quality” mean?. Groundwater, 47(6), 752-754.

Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). Tracing the carbon cycle. Environmental isotopes in hydrogeology, 111-134.

Clark, I.D. & Fritz, P., (1997). Environmental isotopes in hydrogeology, CRC press.

Consejo Mundial del Agua. (2022). IX Foro Mundial del Agua “Seguridad hídrica para la paz y el desarrollo” del 21 al 26 de marzo de 2022. Dakar – Senegal.

Corantioquia (2016). Jericó, Vereda Cauca, Hacienda Sevino (Hidrogema LTDA). Expediente eSIRENA CA1-2016-229

Corantioquia (2018). Industrial Hullera, Ubicada la carrera vía a la Ferrería, Sector casa Vieja, Potrero Grande, Amagá. Expediente eSIRENA ASI-2018-986

Corantioquia (2018). Prospección geológica para definir la viabilidad técnica de la construcción de un pozo de aguas subterráneas en la planta de Cueros Vélez, Amagá. Expediente eSIRENA ASI-2018-986.

Corantioquia (2019). Columna pozo predio la Florida, Corregimiento Marsella – Fredonia. Expediente eSIRENA CA1-2019-501.

Corantioquia, SHI. (2014). Evaluación hidrogeológica en los municipios de La Pintada y Valparaíso, jurisdicción de la dirección territorial Cartama Corantioquia.

Corantioquia, Universidad de Antioquia. (2021). Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco en el cañón del río Cauca en la jurisdicción de Corantioquia, Medellín.

Corena Sandoval, C. A., & Moreno Martínez, E. (2019). Reconstrucción paleoambiental de las formaciones Amagá y Combia en la sección quebrada la Táparo, suroccidente antioqueño (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

Cuellar, A. y Diaz, A. (2017). Estratigrafía, geología estructural y geocronología de la formación Combia a lo largo de la sección Bolombolo - Concordia.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). Hidrología subterránea. Barcelona: Omega.

DANE, editor. Estimaciones y proyecciones de la población. Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE); (2019). Available from: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.

De Vries, J. J., & Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5-17.

Decreto 2811 de 1974 [con fuerza de ley]. Por medio del cual se expide el Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. 18 de diciembre de 1974. D.O. No. 34243.

Delsant, B., Tejada, E. (1987). Utilización de análisis litoestratigráficos detallados para correlación de mantos de carbón en la Formación Amagá (Antioquia). *Boletín de Geología*, 1987, vol. 17, no 31, p. 3-13.

Díaz Navarro, M. K., & Monsalve Martínez, J. L. (2019). Contexto tectónico durante la acumulación de las formaciones Amagá y Combia (Mioceno tardío) en el suroccidente Antioqueño—sección de la quebrada La Táparo, a partir de análisis de proveniencia sedimentaria (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

Dickinson, J. E., Land, M., Faunt, C. C., Leake, S. A., Reichard, E. G., Fleming, J. B., & Pool, D. R. (2006). Hydrogeologic framework refinement, ground-water flow and storage, water-chemistry analyses, and water-budget components of the Yuma area, southwestern Arizona and southeastern California. U. S. Geological Survey.

Echeverry, J. González, J. Duran, J. (1967). Estudio de la cuenca carbonífera entre Venecia y Bolombolo.

Emergente Energía Sostenibles SAS & COMFAMA (2019). Estudio de disponibilidad conjunta hídrica para las cuencas La Guamo y Quebradona en el municipio de Jericó, Antioquia - Informe Final Modelo hidrogeológico conceptual y modelamiento numérico de flujo subterráneo.

Errázuriz-Henao, C., Gómez-Tuena, A., Duque-Trujillo, J., & Weber, M. (2019). The role of subducted sediments in the formation of intermediate mantle-derived magmas from the Northern Colombian Andes. *Lithos*, 336, 151-168.

Escobar, J., Betancur, T., Palacio, P., & Martínez, C. (2017). Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos, *Revista Politécnica*, 13(24), 37-48.

Escobar, L. E. (1982). Estudio palinológico de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (7-8), 117-129.

Fajardo Cuartas, D. F. (2013). Análisis de las creencias ambientales y su relación con el comportamiento proambiental.

FAO-ADR. (2019). Plan integral de desarrollo agropecuario y rural con enfoque territorial. Departamento de Antioquia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Social.

[https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/ANTIOQUIA-TOMO-1\\_compressed.pdf](https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/ANTIOQUIA-TOMO-1_compressed.pdf)

Fernandez Parada, N. J., & Solano Ortega, F. (2005). Indices de Calidad de Agua (ICAs) e Indices de Contaminación (ICOs) de Importancia Mundial. Universidad de Pamplona.

Foster, S. S., & Gomes, D. C. (1989). Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas; una evaluación de métodos y costos. In Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas; una evaluación de métodos y costos (pp. 111-111).

Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979). Groundwater, Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs, N.J.

García Chinchilla, D. (2011). Caracterización de la deformación y metamorfismo de los Esquistos de Sabaletas, parte norte de la Cordillera Central de Colombia.

Gelves Diaz, J. (2017). Zeolitas naturales colombianas de la formación Combia, municipio de La Pintada: mineralogía, caracterización y aplicaciones.

GEMI SAS., GOTTA., & SHI. (2019). Realización de un estudio hidrogeológico en parte de la cuenca del Sinifaná que caracterice la situación actual del sistema acuífero del área seleccionada. Asociación Colombiana de Minería.

GEOFÍSICA SAS. (2022). Contrato de prestación de servicios No 21340005-CV25170152\_10097781\_2022, para la elaboración de 38 Sondeos Eléctricos Verticales SEV y 6 Tomografías Eléctricas, para caracterizar el recurso hídrico subterráneo desde el punto de vista geofísico, en el marco del Convenio 040-cov2111-156. Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco tropical en el cañón del río Cauca en la jurisdicción de CORANTIOQUIA en Unidades Hidrogeológicas priorizadas.

Giraldo Arroyave, M. (2010). Esquema geodinámico de la parte noroccidental de la Cordillera Central de Colombia.

Giraldo Gómez, J. D. (2021). Petrofacies cuantitativas a partir de análisis multivariado en la formación Amagá (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

Gobernación de Antioquia. (2015). Anuario estadístico de Antioquia 2015. Recuperado de <https://antioquia.gov.co/planeacion/ANUARIO%202015/index.html>

Gobernación de Antioquia. (2019). Anuario estadístico de Antioquia 2019. Recuperado de <http://www.antioquiadatos.gov.co/index.php/anuario-estadistico-2019>

Gobernación de Antioquia. (2021). Planilla agua potable Antioquia 2021. Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. [https://www.dssa.gov.co/images/programas-y-proyectos/factores-de-riesgo/vigilancia-agua/Planilla\\_Agua\\_Potable\\_Antioquia\\_2021\\_BERNARDO%20ALEXANDER\\_A.xls](https://www.dssa.gov.co/images/programas-y-proyectos/factores-de-riesgo/vigilancia-agua/Planilla_Agua_Potable_Antioquia_2021_BERNARDO%20ALEXANDER_A.xls)

González Londoño, J., & López González, J. C. (2019). Identificación de canales de tubificación por medio de tomografía eléctrica y su relación con el hundimiento superficial en el área urbana del Municipio de Concordia Antioquia (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

González, H. (1977). Conceptos de metamorfismo dinámico y su aplicación a la zona de falla de Romeral. Boletín de Ciencias de la Tierra, (2), 81-106.

González, H. (2001). Mapa geológico del departamento de Antioquia, escala 1:400.000, memoria explicativa. INGEOMINAS, 240p.

González, H. (2003). Geología del Flanco Occidental de la Cordillera Central y del Oriental de la Cordillera Occidental entre Medellín, Ciudad Bolívar y el río Arquía. Departamento de Antioquia. IX Congreso Colombiano de Geología. Excursión pre - Congreso. Medellín

González, H., (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 168 (Salamina): Boletín Geológico, Vol. 23, 174 P.

Grosse, E. (1926). Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia. Dietrich Reimer, 361p. Berlín.

Guman, C. (1991). Condiciones de depositación de la formación Amagá entre Amagá y Angelópolis

Guzmán, C., & Sierra, G. (1984). Ambientes sedimentarios en la Formación Amagá. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 303p.

Guzmán, C.G. (2007). Estudio de la deformación andina entre los 32° y los 39° latitud sur mediante el análisis de breakout de pozos. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inérita), 241 p., Buenos Aires.

Harlow, J., & Hagedorn, B. (2018). SWB modeling of groundwater recharge on Catalina Island, California, during a period of severe drought. Water, 11(1), 58.

Harter, T. (2003). Basic concepts of groundwater hydrology. UCANR Publications.

Henao Betancur, J. E. (2012). Estratigrafía y petrografía de las areniscas de la secuencia quebrada La Naranjala—Municipio de Fredonia miembro inferior de la formación Amagá (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

Herrera, H. M., & Mejía, J. C. (1989). Estudio geomorfológico y estructural de la Cuenca del Río Poblano. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Hincapie, G. I., Martínez, J. F. (1985). Geología estructural de la cuenca del Sinclinal de Amagá entre la vereda Palomos y Angelópolis Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín).

Holdridge, L. R. (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data. Science, 105(2727), 367-368.

Hoque, M. A., Burgess, W. G., & Ahmed, K. M. (2017). Integration of aquifer geology, groundwater flow and arsenic distribution in deltaic aquifers—A unifying concept. Hydrological Processes, 31(11), 2095-2109.

Hounslow, A. W. (1995). Water Quality Data: Analysis and interpretation; Lewis Publisher, 397p.

Hurley, T., Sadiq, R., & Mazumder, A. (2012). Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water Research*, 46(11), 3544-3552.

IDEAM,. INVEMAR. (2018.) Protocolo de monitoreo del agua.

IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua 2013. Bogotá, D.C.

IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá: Ideam: 496 pp.

IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp.

Instituto Alexander von Humboldt, (IAvH). (2014). Fortalecimiento al Conocimiento, Conservación y uso sostenible de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos del bosque seco tropical en la jurisdicción de CORANTIOQUIA: Informe Final; Instituto Alexander von Humboldt (IAvH): Medellín, Colombia.

Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS). (2009). Geología de la Plancha 167 Sonsón y Plancha 187 Salamina. Escala 1:100.000. Versión año 1980. Versión digital 2009

Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS). (2009). Geología de la Plancha 166 Jericó. Escala 1:100.000. Versión año 1980. Versión digital 2009

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) & Gobernación de Antioquia. (2007). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia.

Janzen, D. (1998). Gardenification of wildland nature and the human footprint. *Science*, 279(5355), 1312-1313.

Jaramillo, J. M. (1977). Rocas volcánicas de la formación Combia. *Bol. de Ciencias de la Tierra*. Medellín. :163-165.

Jaramillo, J. S., Cardona, A., Monsalve, G., Valencia, V., & León, S. (2019). Petrogenesis of the late Miocene Combia volcanic complex, northwestern Colombian Andes: Tectonic implication of short term and compositionally heterogeneous arc magmatism. *Lithos*, 330, 194-210.

Jiménez, H, Pulido, D, Franco, J y Patarroyo, G. (2012). Nueva localidad fosilífera de moluscos de la formación Amagá. Departamento de Geociencias.

Le Maitre, D. C., Scott, D. F., & Colvin, C. (1999). Review of information on interactions between vegetation and groundwater.

Lopera, G. M. S., Sierra, M. I., & Carranza, A. R. (2005). Registro del volcanismo neógeno y la sedimentación fluvial en el suroeste antioqueño. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (17), 135-152.

López C., A, Sierra L., G y Ramírez S., D. (2006). Vulcanismo neógeno en el suroccidente Antioqueño y sus implicaciones tectónicas. Universidad Nacional de Colombia.

López, I. C. (1997). Algunas consideraciones sobre la Petrología de la Formación Amagá. Boletín de Ciencias de la Tierra, (12), 18-38.

MADS. (2014). Caracterización de las regiones para la preparación de la ENREDD+. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, Bogotá, Colombia.

Mahecha, H., Ortiz, J., Tejada, M.L., Paniagua, F. & Weber, M. (2006). Cartografía geológica de las vulcanitas de la Formación Combia, en un área de 200 km<sup>2</sup> en los alrededores del municipio de Jardín, departamento de Antioquia, Colombia. Ingeominas, unpublished report, 27 p. Bogotá.

Martínez, D. (2006). Propuesta de Implementación de Metodologías para la Evaluación Hidrogeoquímica y de Calidad de las Aguas Subterráneas y Aplicación a la Zona del Bajo Cauca Antioqueño. Tesis de Pregrado, Universidad de Antioquia, Medellín

Mejía, M., James, M., & Arias, L. A. (1988). Evaluación de amenazas geológicas en el área Manizales-Valparaíso. INGEOMINAS, sede Medellín.

Mesa García, J. (2012). La Formación Amagá en El Pozo la Loma – 1 y la sección Sabaleticas: sucesión diagenéticamente inmadura del Eoceno – Mioceno por análisis de múltiples herramientas.

Miles, L., A.C. Newton, R.S. DeFries, C. Ravilious, I. May, S. Blyth, V. Kapos, and J.E. Gordon. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. Journal of Biogeography 33: 491–505.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial– (2010). Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en Colombia. Bogotá.

Ministerio de la Protección Social Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial República de Colombia (Junio 22, 2007). Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano

Montes, A. D. S. B., Arango, F., & Uribe, A. R. (2005). Características petrográficas, químicas y palinológicas de un manto de carbón de la Formación Amagá y su relación al paleoambiente. Boletín de Ciencias de la Tierra, (17), 125-134.

Mook, W. G. (Ed.). (2002). Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico (Vol. 1). IGME.

Moreno Quimbay, N (2011). Análisis de la petrología, área fuente y diagénesis de las areniscas de la Formación Amagá en los Pozos Venecia-1 y El Cinco-1B

Murillo, R. (1973). Investigaciones geológicas. Aspectos genéticos de la formación Combia en un área al SW de Fredonia - Antioquia.

Murphy, P. G., & Lugo, A. E. (1986). Ecology of tropical dry forest. Annual review of ecology and systematics, 67-88.

Mussa, K. R., Mjemah, I. C., & Muzuka, A. N. N. (2020). A review on the state of knowledge, conceptual and theoretical contentions of major theories and principles governing groundwater flow modeling. *Applied Water Science*, 10(6), 1-10.

OIEA. (SF). ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA DEPARTAMENTO DE COOPERACIÓN TÉCNICA SECCIÓN DE AMÉRICA LATINA.

Ospina Vásquez, T. (1911). Reseña: sobre la geología de Colombia, y especialmente del antiguo departamento de Antioquia/conferencias dictadas por Tulio Ospina, rector y profesor de geología de la Universidad de Antioquia, seguidas de unos apéndices.

Ossa, J. (2017). Nivel de Fondo Natural para un Sistema Acuífero, caso de estudio: Urabá antioqueño. Tesis de grado

Oudijk, G., & Mujica, K. (1989). Handbook for the identification, location and investigation of pollution sources affecting ground water.

Páez Acuña, L. A. (2013). Análisis estratigráfico y de proveniencia del miembro superior de la formación Amagá en los sectores de La Pintada y Valparaíso (Cuenca Amagá, Andes Noroccidentales) (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT).

Palacio B, P. A., & Betancur V, T. (2008). Identification of source and recharge zones in an aquifer system from water stable isotope. Case Study Bajo Cauca Antioqueno. *Gestion y Ambiente*, 10(4), 167-182.

Palacio, D. (2015). Redes, actores y gobernanza desde un enfoque relacional. En: Ungar, P. (ed.) (2015). Hojas de ruta. Guías para el estudio socioecológico de la alta montaña en Colombia. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Palacio, D. C. (2015). Redes, actores y gobernanza desde un enfoque relacional. Hojas de ruta.

Palacio, P. A., Díaz, R. A., Vela, M. A., & Ossa, J. (2022). Hydrogeological potential in soft formations and hard rocks: A case study in the Cauca River Canyon, Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, 49(1), 67–76. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.1.2022.620>

Parra Sánchez, L. (1997). El terciario del valle del Río Cauca al norte de la Barrera de cangrejo -borde oeste-.

Peláez Zapata, E. (2016). Obtención de paleoesfuerzos del sistema de fallas Cauca-Romeral en el sector norte de la Cuenca Amagá, entre las localidades de Titiribí y Quebrada Sinifaná (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

Pizano, C y H, García (Editores). (2014). El Bosque Seco Tropical en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D.C., Colombia.

Portillo-Quintero, C. A., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry

Posada, J. (1913). Notas sobre la Formación Carbonífera de Amagá. Anales de la Escuela Nacional de Minas. (p 286-288)

Posada, J. (1936). Bosquejo geológico de Antioquia. Anales de la Escuela Nacional de Minas.

Presidencia de la República de Colombia. (Junio 26, 1984). Decreto 1594 de 1984. (Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21.) “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.”

Presidencia de la República de Colombia. (Marzo 10, 1998). Decreto 475 de 1998 . Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable.

Presidencia de la República de Colombia. (Mayo 9, 2007). Decreto 1575 de 2007 . Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

Price, M. (2007) Agua subterránea. Editorial Limusa. México.

Ramírez Londoño, M. J. (2012). Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) del miembro superior de la formación Amagá, sección quebrada Sabaleticas, suroccidente antioqueño

Ramírez S., D, López C., A, Sierra L, G y Toro V., G. (2006). Edad y proveniencia de las rocas volcánico sedimentarias de la formación Combia en el suroccidente Antioqueño Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

Read, L., & Lawrence, D. (2003). Recovery of biomass following shifting cultivation in dry tropical forests of the Yucatan. Ecological Applications, 13(1), 85-97.

Restrepo, E. (1921). Apuntes sobre la formación Carbonífera de Antioquia. Anales de la Escuela Nacional de Minas. (p 624-627).

Rios AM, Sierra MI (2004) La Formación Combia: Registro de la relación entre el volcanismo Neógeno y la sedimentación fuvial, sección Guineales – Bolombolo, suroeste antioqueño. Undergraduate thesis. EAFIT University. 122 pp.

Saaty, T.L. (2000). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 2, 83-98.

Sánchez, L. H. (1991). Factores tectónicos que intervinieron en la configuración de la cuenca carbonífera de Amagá.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2020). The Geology of Colombia. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales, 239

Servicios Hidrogeológicos Integrales S.A.S (SHI)., AngloGold Ashanti. (2019). Estudio hidrogeológico de la zona de influencia del proyecto Quebradona para definir el modelo hidrogeológico conceptual.

Serviminas. (1990). Estudio de Factibilidad, área Amagá, Venecia Bolombolo. Fase II. Apéndice C, Hidrogeología y geotecnia.

Serviminas. (1992). Informe técnico, columna estratigráfica Alto El Nudo. Municipio de Venecia, Antioquia.

Serviminas. (1992). Informe técnico, columna estratigráfica Hacienda Samaria Occidental Extrema. Municipio de Venecia, Antioquia.

Serviminas. (1992). Informe técnico, columna estratigráfica La Mina 1 y La Mina 2. Municipio de Venecia, Antioquia.

Serviminas. (1992). Informe técnico, columnas estratigráficas Carbocol. Municipio de Venecia, Antioquia.

Serviminas. (1998). Informe técnico, columna estratigráfica Pozo 2 Friogán (Finca Cuba-Fricolsa).

Serviminas. (1998). Informe técnico, columna estratigráfica Pozo Parcelación La Cascada – Bolombolo, Antioquia.

Serviminas. (2009). Informe técnico, construcción pozo 2 Parcelación Túnez. Municipio de Fredonia, Antioquia.

Sierra, G. M., 1994. Structural and sedimentary evolution of the Irra Basin, northern Colombian Andes. Master thesis, Department of Geological Sciences, State University of New York, Binghamton, NY, 102 p

Sierra, G. M., Silva, J. C., & Correa, L. G. (2003). Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. Boletín de Ciencias de la Tierra, (15), 9-22.

Sierra, M. C. P., Sargent, K. R., Reyes, M. F., Fuenmayor, Y., Acevedo, H., Ferrer, S. C., & Montiel, A. D. (2011). Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 21(2), 5-19.

Silva-Tamayo, J. C., Lara, M., & Salazar-Franco, A. M. (2020). Oligocene-Miocene Coal-Bearing Successions of the Amagá Formation, Antioquia, Colombia: Sedimentary Environments, Stratigraphy, and Tectonic Implications. The Geology of Colombia, 3, 331-353.

Silva-Tamayo, J. C., Sierra, G. M., & Correa, L. G. (2008). Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. Journal of South American Earth Sciences, 26(4), 369-382.

Tejada, M., Betancourt, J., Nivia, A., Weber, M., & Gómez, J. (2007). Cartografía geológica y caracterización geoquímica de la Formación Combia en los alrededores de Jericó y Pueblorrico, Departamento de Antioquia-Colombia. In Memorias XI Congreso Colombiano de geología. Bucaramanga.

Toussaint, J. F., & Restrepo, J. J. (1987). Límites de placas y acortamientos recientes entre los paralelos son y son, Andes Colombianos. Andean Geology, (31), 95-100.

Van Der Hammen, T. (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes colombianos. Boletín geológico, 6(1-3), 60-116.

Van der Hammen, T. (1960). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales tectogénesis de los Andes colombianos, informe N°1279. Servicio Geológico Nacional.

Van der Hammen, T., (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos (con 7 planchas). Boletín Geológico, Vol. 6, pp. 67-128.

Vélez Meza, A. C. (2017). Modelización de la calidad de agua en el segmento norte del estero macache del Cantón Quevedo, Provincia de Los Ríos (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ).

Verma, S., Mukherjee, A., Mahanta, C., Choudhury, R., & Mitra, K. (2016). Influence of geology on groundwater-sediment interactions in arsenic enriched tectono-morphic aquifers of the Himalayan Brahmaputra river basin. Journal of Hydrology, 540, 176-195.

Wadsworth, A. B. (1947). Standard methods. The Williams and Wilkins Co., Baltimore, 226.

Water, U. N. (2022). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Aguas residuales: Groundwater, making the invisible visible

Weber, M., Duque, J. F., Hoyos, S., Cárdenas-Rozo, A. L., Gómez, J., & Wilson, R. (2020). The Combia Volcanic Province: Miocene post-collisional magmatism in the northern Andes. The Geology of Colombia, 3, 355-394.

Westenbroek, S. M., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J., & Bradbury, K. R. (2010). SWB--a modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for estimating groundwater recharge (p. 60). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey, Ground Resources Program.

Xie, Y., Cook, P. G., Simmons, C. T., Partington, D., Crosbie, R., & Batelaan, O. (2017). Uncertainty of groundwater recharge estimated from a water and energy balance model. Journal of Hydrology, 561, 1081-1093. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.08.010>

Lerner, D. N. (1990). Groundwater recharge in urban areas. Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere, 24(1), 29-33.