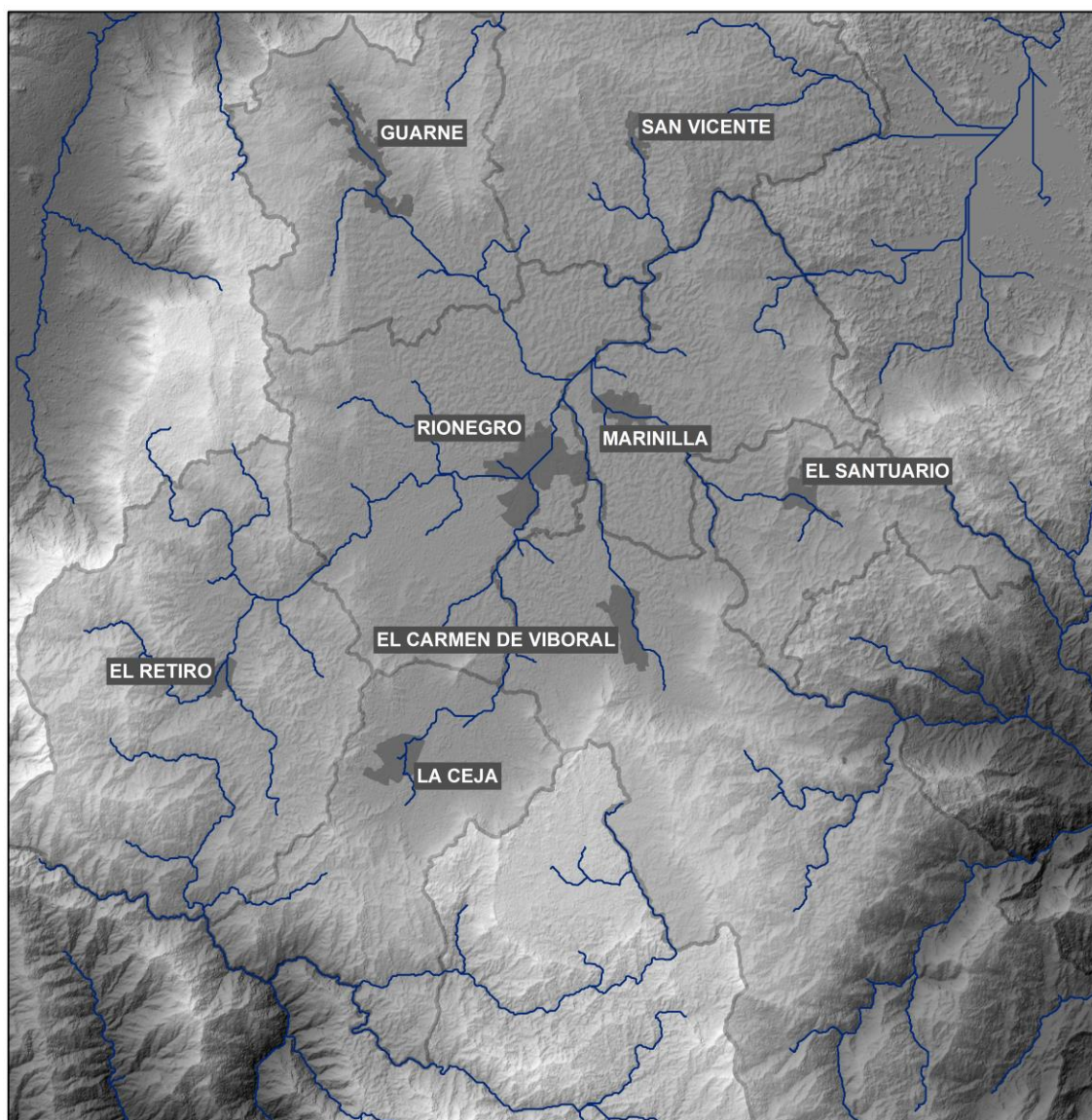

Actualización del modelo hidrogeológico conceptual en el Valle de San Nicolás

Informe final

Grupo de investigación SITE, Universidad EIA
En Convenio con Cornare
Colaboración especial de EPM.

2018



Grupo de investigación SITE, Universidad EIA

Noviembre, 2018

Autores	10
<i>Equipo de trabajo-.....</i>	<i>10</i>
<i>Agradecimientos.....</i>	<i>11</i>
capítulo 1	12
Introducción.....	12
<i>Antecedentes y localización</i>	<i>12</i>
capítulo 2.....	15
Modelo hidrogeológico conceptual.....	15
Diagnóstico y compilación de la información	16
<i>Referencias.....</i>	<i>22</i>
capítulo 3.....	23
Geometría y tipo de roca de los acuíferos	23
<i>Introducción.....</i>	<i>23</i>
<i>Marco conceptual</i>	<i>23</i>
<i>Datos y métodos</i>	<i>26</i>
Recopilación de Registros de perforación y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	29
Interpretación IPI2WIN	33
<i>Definición de acuíferos</i>	<i>35</i>
Acuífero de la Planicie aluvial	35
Acuífero de terraza aluvial.....	38
Acuífero en Superficie de erosión II de Río Negro	40
<i>Conclusiones y Discusión</i>	<i>48</i>
<i>Referencias.....</i>	<i>49</i>
capitulo 4.....	50
Recarga de acuíferos	50
<i>Recarga Potencial.....</i>	<i>50</i>
<i>Marco Conceptual</i>	<i>50</i>
<i>Datos y métodos</i>	<i>52</i>
<i>Resultados y discusión</i>	<i>59</i>
Precipitación	59

Evapotranspiración.....	62
Escorrentía	65
<i>Referencias</i>	66
capítulo 5	67
Red de flujo.....	67
<i>Modelo numérico</i>	67
<i>Introducción</i>	67
<i>Marco teórico</i>	68
Ecuación de flujo subterráneo.....	68
<i>Datos y métodos</i>	68
Implementación del modelo numérico	68
<i>Resultados</i>	72
Calibración	72
Validación.....	74
Niveles piezométricos	76
<i>Conclusiones</i>	77
<i>Referencias</i>	77
capítulo 6	79
Evaluación de la calidad de aguas subterráneas en el VSN.	79
<i>Introducción</i>	79
Localización.....	80
<i>Marco conceptual</i>	80
Variables físico-químicas.....	81
Facies hidroquímicas	84
<i>Datos y métodos</i>	85
Parámetros físicos y químicos	85
Control de calidad: Balance iónico.....	93
Facies hidroquímicas	93
<i>Análisis geoquímicos de las muestras de agua</i>	94
Resultados	94
<i>Análisis de facies hidroquímicas</i>	113
Diagramas de Piper.....	113

Diagramas de Stiff	114
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	116
<i>Referencias</i>	117
capítulo 7	118
Análisis la ocurrencia de zonas potenciales de acuíferos mediante el uso de los SIG y los sensores remotos	118
<i>Introducción</i>	118
<i>Datos y métodos</i>	118
<i>Variable dependiente: Zonificación del potencial</i>	130
Análisis estadístico de correlación de variables.....	131
Análisis multicriterio	132
Resultados	133
<i>Discusión y conclusiones</i>	137
<i>Referencias</i>	138
capítulo 8.....	139
Zonificación hidrogeológica regional del Valle San Nicolás	139
<i>Introducción</i>	139
<i>Resultados y conclusiones</i>	139

Lista de figuras

<i>Figura 1. 1. Área de estudio del proyecto.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2. 1. Componentes del modelo hidrogeológico conceptual. Adaptado del Ingeominas (2004), para este proyecto.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2. 2. Estructura de la geodatabase del proyecto</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2. 3. Mapa geológico VSN. Escala 1:100.000. Adaptado del Pomca de Rionegro (2015).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. 4. Mapa de espesor de cenizas volcánicas del VSN.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2. 5. Mapa Geomorfológico del VSN.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. 1. Mapa con localización de la zona de estudio enmarcada al interior de los polígonos que representan la geomorfología: Planicie aluvial, Terrazas aluviales y Superficie de erosión II Rionegro (mapa geomorfológico tomado del POMCA de Rionegro (2015). Ela</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3. 2. Esquema de la configuración Schlumberguer para SEV. Tomado de Auge (2008).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3. 3. Mapa con sondeos eléctricos verticales. Elaboración propia. Imagen de fondo DEM (tomado de satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y localización de SEV de Universidad Nacional de Colombia & CORNARE (1997).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3. 4. Mapa con registros de perforación disponibles (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 1997). Elaboración propia. Imagen de fondo DEM (m.s.n.m., Tomado de satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y registros de perforación de Unive</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3. 5. Mapa con sondeos eléctricos verticales escogidos. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y SEV Una (2000).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3. 6. Mapa con registros de perforación escogidos para la calibración geoeléctrica. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y registros de perforación del estudio Universidad Nacional de Colombia & C CORNARE (1997).</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3. 7. Mapa con registros de perforación escogidos con sus respectivos sondeos eléctricos verticales. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC. Las cruces representan la ubicación de los registros de perforación y los puntos, los SEV. Los colores de los puntos SEV representan con cual registro estratigráfico fueron calibrados. La información primaria fue tomada del estudio Universidad Nacional de Colombia & CORNARE (1997,2000), autorizado por Cornare.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3. 8. Curva de resistividad aparente del sondeo S63 en planicie aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación de la estratigrafía en el SEV S 63 calibrada con registro de perforación.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3. 9. Curva de resistividad aparente del sondeo S53 en planicie aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.....</i>	<i>37</i>

Figura 3. 10. Curva de resistividad aparente del sondeo S197 en planicie sobre terraza aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.	38
Figura 3. 11. Curva de resistividad aparente del sondeo S119 en planicie sobre terraza aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.	39
Figura 3. 12. Curva de resistividad aparente del sondeo S206 en planicie sobre terraza aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.	39
Figura 3. 13. Curva de resistividad aparente del sondeo S216 en superficie de erosión II de Río Negro. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.	40
Figura 3. 14. Curva de resistividad aparente del sondeo S233 en superficie de erosión II de Río Negro. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.	41
Figura 3. 15. Curva de resistividad aparente del sondeo S244 en superficie de erosión II de Río Negro. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.	41
Figura 3. 16. Mapa de distribución lateral de los tres acuíferos. Elaboración propia....	43
Figura 3. 17. Mapa a la Base [msnm] del sistema acuífero. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptado del IGAC.	44
Figura 3. 18. Mapa al Basamento [msnm] del Valle de San Nicolás. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptado del IGAC.	45
Figura 3. 19. Mapa isorresistivo de los tres acuíferos a la cota de 2110. [msnm]. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptado del IGAC.....	47
Figura 4. 1. Estaciones con registros de precipitación (IDEAM y EPM . Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptada del IGAC.....	54
Figura 4. 2. Mapa de precipitación anual [mm/año] para el escenario promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.....	61
Figura 4. 3. Mapa de anomalía de precipitación anual [mm/año] para el escenario El Niño con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.....	61
Figura 4. 4. Mapa de anomalía de precipitación anual [mm/año] para el escenario La Niña con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.....	62
Figura 4. 5. Mapa de evapotranspiración real anual [mm/año] para el escenario promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.	63
Figura 4. 6. Mapa de evapotranspiración real anual [mm/año] para el escenario El Niño con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.....	64
Figura 4. 7. Mapa de evapotranspiración real anual [mm/año] para el escenario La Niña con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.....	64

Figura 5. 1. Flujograma para modelos numéricos. (Adaptado de Anderson et al., 2015, modificado de Kohn, 1996).	67
Figura 5. 2. Mapa de ubicación del modelo numérico del VSN. Adaptado del satélite ALOS PALSAR, información base del IGAC y el POMCA en la jurisdicción de Cornare.	70
Figura 5. 3. Dominio del modelo numérico del VSN realizado en el software ModelMuse.	71
Figura 5. 4. Geometría del modelo numérico del VSN realizado en el software ModelMuse.	71
Figura 5. 5. Diagrama de dispersión de calibración para el modelo numérico del VSN.	73
Figura 5. 6. Histograma de residuales de calibración para el modelo numérico del VSN.	74
Figura 5. 7. Diagrama de dispersión de validación para el modelo numérico del VSN.	75
Figura 5. 8. Histograma de residuales de validación para el modelo numérico del VSN.	76
Figura 5. 9. Resultado de los niveles piezométricos [msnm] en el VSN simulados en la capa superior del modelo.	76
Figura 6. 1. Localización de los puntos de muestreo empleados en este estudio.	81
Figura 6. 2. Configuración de los ejes de diagramas Stiff utilizados en el análisis.	94
Figura 6. 3. Mapa de isolíneas de temperatura del agua subterránea.	95
Figura 6. 4. Mapa de variación del pH del agua subterránea del VSN.	96
Figura 6. 5. Mapa de concentraciones de Turbiedad de las aguas subterráneas.	97
Figura 6. 6. Mapa de concentraciones de Dureza de las aguas subterráneas.	98
Figura 6. 7. Mapa de concentración del hierro.	99
Figura 6. 8. Mapa de concentración de Nitratos.	100
Figura 6. 9. Mapa de concentración de Potasio.	101
Figura 6. 10. Mapa de concentración del Sodio (Na).	102
Figura 6. 11. Mapa de distribución espacial de valores de bicarbonatos en las aguas subterráneas.	103
Figura 6. 12. Mapa de concentración de sulfatos.	104
Figura 6. 13. Mapas de concentración de Cloruros.	105
Figura 6. 14. Mapa de concentración del Calcio.	106
Figura 6. 15. Mapa de concentración de magnesio.	107
Figura 6. 16. Mapa de concentración de manganeso.	108
Figura 6. 17. Mapa de concentración de Cobre.	109
Figura 6. 18. Mapa de concentración de Plomo. (Unidades en microgramo por litro).	110
Figura 6. 19. Mapa de concentración de Cadmio.	111
Figura 6. 20. Mapa de concentración de coliformes fecales.	112
Figura 6. 21. Mapa de Coliformes totales.	113
Figura 6. 22. Diagrama de Piper para las muestras colectadas.	114
Figura 6. 23. Mapa con diagramas de Stiff para las muestras de agua subterráneas.	115
Figura 7. 1. Mapa de suelos. Escala 1:100.000. Adaptado del POMCA de Rionegro (2015).	121
Figura 7. 2. Mapa de distancia a lineamientos.	122
Figura 7. 3. Mapa de densidad de lineamientos.	123
Figura 7. 4. Pendientes.	124
Figura 7. 5. Densidad de drenaje.	126
Figura 7. 6. Distancia a drenajes.	127
Figura 7. 7. Coberturas del suelo.	129
Figura 7. 8. Mapa de conductividades a partir de la calibración del modelo numérico de flujo del Valle de San Nicolás.	130
Figura 7. 9. Distancia mínima para la generación de puntos aleatorios no continuos considerando la regla de los 8 vecinos.	131

<i>Figura 7. 10. Matriz de correlación de variables</i>	<i>132</i>
<i>Figura 7. 11. Resultado de la ponderación con los pesos de MCH</i>	<i>133</i>
<i>Figura 7. 12. Regresión lineal multivariada</i>	<i>136</i>
<i>Figura 7. 13. Histograma de frecuencias del potencial de ocurrencia de aguas subterráneas con análisis multicriterio MCH.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 7. 14. Histograma de frecuencias del potencial de ocurrencia de aguas subterráneas con OLS.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 8. 1. Figura 8.1. Zonificación del potencial hidrogeológico del VSN mediante modelamiento numérico. Las Celdas en Azul oscuro corresponden con.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 8. 2. Zonificación del potencial hidrogeológico del Valle de San Nicolás a partir de la regresión multivariada (variables consideradas en la Tabla 8.1). Los Colores azules indican muy alto potencial y se concentran principalmente en el área del acuífero de la llanura de inundación. Azules menos intensos se concentran en el área de el acuífero de las Terrazas aluviales. En color amarillo crema se ubican las áreas de potencial hidrogeológico intermedio, acuífero de la superficie de erosión II de Rionegro. Finalmente, en Rojo, áreas de potencial hidrogeológico bajo.</i>	<i>142</i>
<i>Figura 8. 3. Zonificación del potencial hidrogeológico del Valle de San Nicolás a partir de los resultados del modelamiento numérico (área más interna, modelada a escala 1:600.000). En la parte externa, zonificación lograda a partir de la regresión multivariada (modelada a escala 1:25.000). (variables empleadas para la regresión en la Tabla 8.1). Los Colores azules indican muy alto potencial y se concentran principalmente en el área del acuífero de la llanura de inundación. Azules menos intensos se concentran en el área de el acuífero de las Terrazas aluviales. En color amarillo-crema se ubican las áreas de potencial hidrogeológico intermedio, correspondiente principalmente con el acuífero de la superficie de erosión II de Rionegro. Finalmente, en Rojo, áreas de potencial hidrogeológico bajo.....</i>	<i>143</i>

Autores

Equipo de trabajo-

Dirección técnica, Edición Final

Isabel Restrepo-Correa

Ingeniera geóloga, MSc.

Co-investigadores U. EIA

Martha I. Posada Posada, Sensores remotos y SIG.

Ingeniera Ambiental, MSc.

Daniel Ruiz-Carrascal, Recarga acuíferos.

Ingeniero Civil, PhD.

Asesores externos

Oscar D. Alvarez-Villa, Modelo numérico flujo subterráneo.

Ingeniero Civil, PhD.

Paola Palacio Buitriago, Calidad agua subterránea.

Ingeniera geóloga, PhD.

Auxiliares de investigación:

Estudiantes de Ingeniería geológica

Carolina Castaño Uribe, Base de datos, Cartografía, Sensores Remotos, SIG, Recarga, Calidad de aguas, Modelo hidrogeológico conceptual.

David Garcés Mesa, Flujo Subterráneo, Modelo hidrogeológico conceptual.

David Santiago Gómez Camargo, Geometría, Recarga, Modelo hidrogeológico conceptual.

Para citaciones referirse a :

Restrepo-Correa I., Alvarez-Villa O., Ruiz-Carrascal D., Palacio P., Posada-Posada M., Castaño C., Garcés D., Gómez D. (2018). Actualización modelo hidrogeológico Valle de San Nicolás. Informe final, Universidad EIA.

Equipo Soporte Cornare, EPM:

Luz Stella Vélez

Ingeniera Civil, Grupo recurso hídrico Cornare

Diana Carolina Martinez

Ingeniera Ambiental, EPM.

Agradecimientos

El grupo de trabajo agradece a CORNARE y EPM por la información suministrada para el óptimo desarrollo del proyecto. A la Dirección de investigación de la Universidad EIA por la aprobación y administración de esta investigación. Al Centro de Pensamiento de la Universidad EIA por incluir este proyecto para darle proyección social.

Así mismo, agradecemos a los estudiantes del semillero de geofísica aplicada (2017-2018) de la Universidad EIA por su apoyo en actividades de digitalización. Al estudiante Camilo Sabogal por sus aportes en el capítulo de Calidad de Aguas subterráneas. Al Ing. Ambiental Daniel Gonzalez por su soporte técnico (e incondicional) en tantos temas.

A todos, Gracias!

Introducción

Antecedentes y localización

El agua subterránea es un recurso natural que constituye la principal reserva de agua dulce del planeta (30%). Ésta, cada vez es más empleada como forma de abastecimiento de agua potable para el consumo humano, uso en regiones agrícolas y otras actividades productivas en regiones urbanas y rurales (Schneider & Hare, 1996). Esta reserva de agua dulce juega un papel fundamental en la vida de los seres humanos y en algunos ecosistemas a nivel mundial. Adicionalmente, se prevé que las reservas de agua subterránea serán cada vez más necesarias como una estrategia de adaptación en regiones donde el cambio climático restrinja la disponibilidad de agua superficial.

Recientemente se han desarrollado estudios nacionales, tales como el Estudio Nacional del Agua - ENA - (IDEAM, 2015), en el que se han realizado caracterizaciones y cuantificaciones de este recurso a escala nacional a partir de la identificación y delimitación de provincias hidrogeológicas. De acuerdo con el ENA, “Colombia está compuesta por 16 provincias hidrogeológicas distribuidas en cinco áreas hidrográficas, en las cuales se han identificado a la fecha 61 sistemas acuíferos de carácter local y regional y cinco transfronterizos” (IDEAM, 2015). En este estudio, la región del Valle de San Nicolás queda definida dentro de la provincia hidrogeológica PM6 la cual, está asociada con sistemas acuíferos montanos e intramontanos de las Cordilleras Central y Occidental. En esta provincia se definen varios sistemas acuíferos. Entre ellos, el sistema acuífero Valle de San Nicolás y la Unión (código SAM 6.7), para el que reportan una profundidad máxima de 250 m, conductividades $K=0.2$ y 8 m/d, y una zonificación preliminar a escala muy gruesa.

El sistema acuífero del Valle de San Nicolás se desarrolla tanto en depósitos aluviales como en las colinas saprolíticas, según resultado del convenio de la Universidad Nacional de Colombia & CORNARE desarrollado en dos fases: 1997 y 2000. En este estudio, se generó una primera zonificación del recurso hidrogeológico para la región del Oriente Antioqueño cercano. (escala 1:25.000). No obstante, es de anotar que este estudio, no ha sido actualizado en los últimos 20 años, época en donde se han generado significativas transformaciones territoriales que generan impacto directo sobre el suelo (y el subsuelo incluido los acuíferos) y donde se han aumentado las captaciones de agua subterránea.

El consumo de agua potable en el Oriente Antioqueño cercano se ha acelerado en la última década debido al desarrollo urbano, agrícola e industrial; de manera particular en la subregión del Valle de San Nicolás (VSN) (que incluye los municipios de: El Carmen de Viboral, El Retiro, El Santuario, Guarne, La Ceja, Marinilla, Rionegro y San Vicente, ver Figura 1.1). (En este estudio no se incluye el municipio de la Unión).

En esta región, se han generado procesos acelerados de cambios en los usos del suelo, los cuales han dejado su vocación predominantemente agrícola, para darle paso a una vocación mixta que incluye también viviendas campestres, empresas e industrias (Álvarez Correa, 2016). Estos cambios en los usos del suelo tienen como consecuencia, una mayor demanda de agua potable para suplir tanto las necesidades asociadas con la nueva dinámica territorial. Además, estas modificaciones ponen en riesgo la riqueza ambiental y el equilibrio de los recursos hídricos, por la posible contaminación proveniente de pozos sépticos y desechos industriales, si no se cuenta con un modelo regulado para su explotación. Estos antecedentes hacen parte de la motivación para realizar una actualización del modelo hidrogeológico conceptual para la región del Valle de San Nicolás (VSN).

Adicionalmente se tiene identificado que el crecimiento urbanístico y productivo del Oriente Antioqueño, ha presentado dificultades a la hora de suministrar los recursos hídricos. Según la información correspondiente a los 23 municipios del Oriente, la oferta hídrica se estima en 12,24 km³/año, lo que corresponde a 19.855 m³/año por habitante. Dicha oferta se ve reducida a 9.927 m³/año por habitante, cuando se aplican los factores de reducción por calidad y estiaje (Cornare, 2017). Estas problemáticas también hacen necesaria la integración del componente de agua subterránea en la planeación del recurso hídrico en el Valle de San Nicolás. Todo ello encaminado a tener la base técnica necesaria para pensar a mediano plazo en una estrategia de uso conjunto para el recurso hídrico.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, investigadores del Grupo SITE de la Universidad EIA, decidieron proponer una investigación que permitiera hacer una “Actualización al modelo hidrogeológico conceptual del Valle San Nicolás”, el cual fue aprobado por la dirección de investigaciones de la Universidad EIA. Adicionalmente, establecieron contacto con la dirección de Recurso Hídrico de CORNARE, quienes mostraron todo el interés en este proyecto y se comprometieron a brindar toda la información necesaria para su desarrollo. Adicionalmente, se hizo contacto con la Gerencia de aguas de EPM quienes suministraron información hidrológica empleada para la estimación de la recarga. Este libro contiene los resultados de esta investigación y su estructura se explica a continuación.

El Capítulo 1, corresponde con los antecedentes y justificaciones presentados en esta introducción. El capítulo 2, expone la conceptualización del modelo hidrogeológico regional, el Capítulo 3 versa sobre la definición de la geometría del acuífero (profundidad y extensión lateral); el Capítulo 4, comprende la estimación de la Recarga; el Capítulo 5 enuncia el modelamiento numérico del flujo subterráneo; el Capítulo 6 presenta un análisis de la calidad del Agua Subterránea; el Capítulo 7 contiene una metodología desarrollada con el fin de generar una zonificación preliminar a partir de sensores remotos, metodología que permitió lograr una zonificación para el VSN en aquellos lugares en donde por ausencia de información, no fue posible realizar el modelamiento numérico.

Finalmente, el Capítulo 8 contiene una zonificación regional del potencial acuífero que combina para la parte central del VSN una interpretación a partir del modelamiento numérico y un análisis multicriterio que incluye tanto variables superficiales como del subsuelo, para el área restante. Dado que este es el capítulo que integra los resultados de los capítulos previos, se enuncian también las conclusiones generales al estudio logrado.

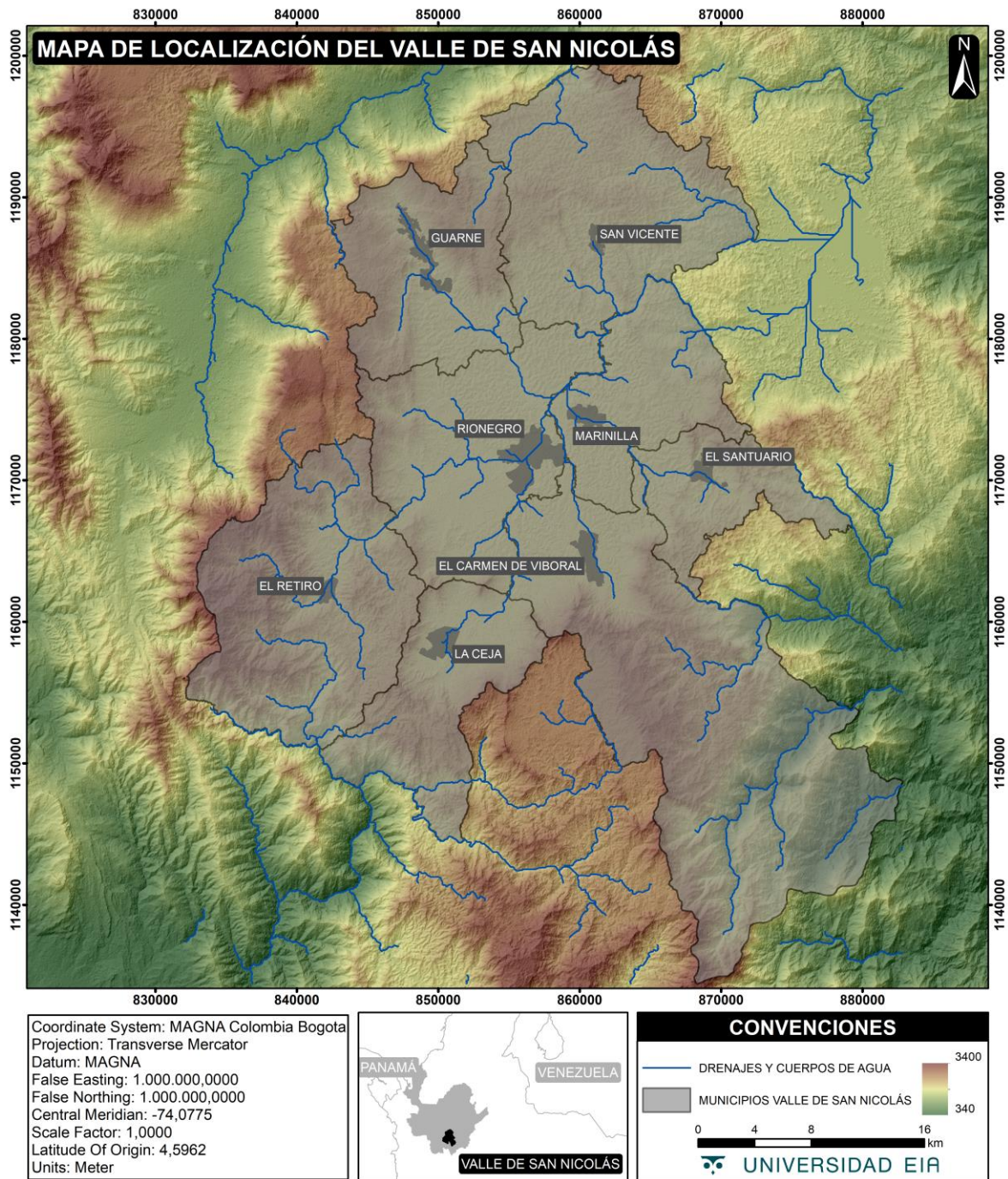


Figura 1. 1. Área de estudio del proyecto

Modelo hidrogeológico conceptual

Introducción

Un modelo hidrogeológico conceptual (MHC) es una hipótesis o planteamiento de cómo funciona el sistema hídrico de una zona a partir de sus características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas. Además, es una representación cualitativa del sistema de agua subterránea que se ajusta a los principios hidrogeológicos basados en información geológica, geofísica, hidrológica, hidrogeoquímica e hidráulica (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015).

En la Figura 2. 1. se muestra la metodología seguida en este proyecto para realizar el MHC. Esta metodología, fue adaptada a partir de la metodología propuesta por Ingeominas (2004) para estudios de esta naturaleza. La información de entrada que requiere y las evaluaciones y caracterizaciones que se realizan a partir de esta información, se explican a continuación. El desarrollo metodológico detallado de cada componente, se describe en cada uno de los capítulos de este libro.

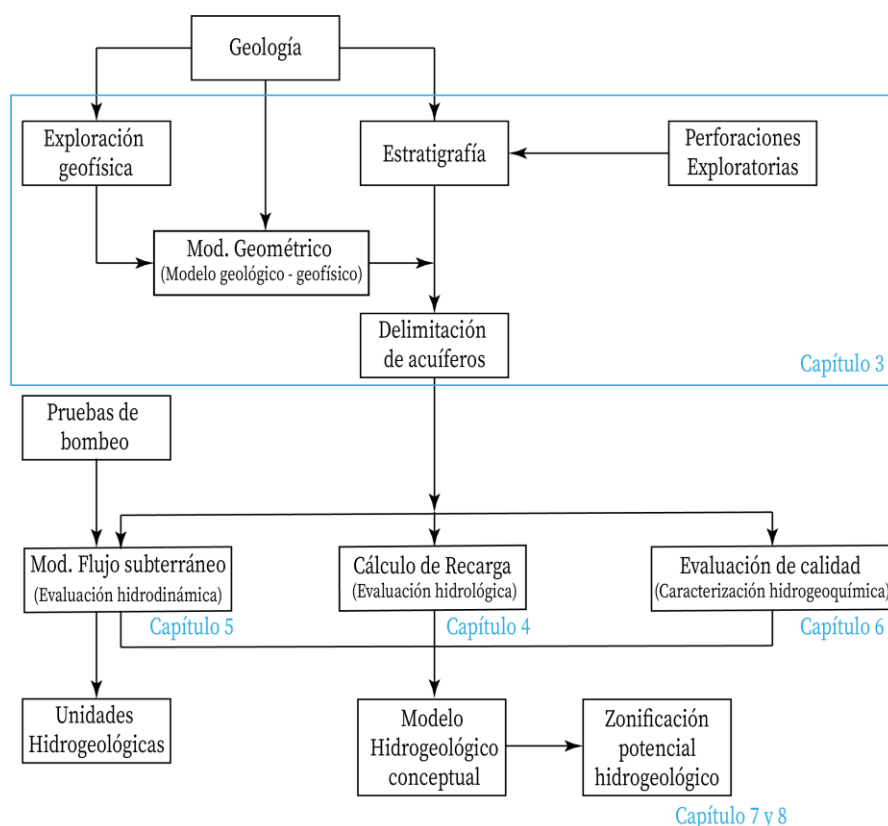


Figura 2. 1. Componentes del modelo hidrogeológico conceptual. Adaptado del Ingeominas (2004), para este proyecto.

Metodología general

-construcción modelo hidrogeológico conceptual

Diagnóstico y compilación de la información

En primera instancia, se realizó la recopilación de información disponible en diversas universidades y en Cornare. El proceso de sistematización, depuración y compilación de toda la información secundaria se integró en una Geodatabase la cual soporta toda la información geoespacial de este estudio: cartografía básica, información hidrometeorológica, mapas y estudios geológicos, geomorfológicos, mapas de tipos suelos, cobertura vegetal y usos del suelo, estudios hidrogeológicos previos, fotos aéreas o imágenes de satélite, resultados propios del estudio, entre otros. La estructura y contenido de la geodatabase se ilustra en la Figura 2.2

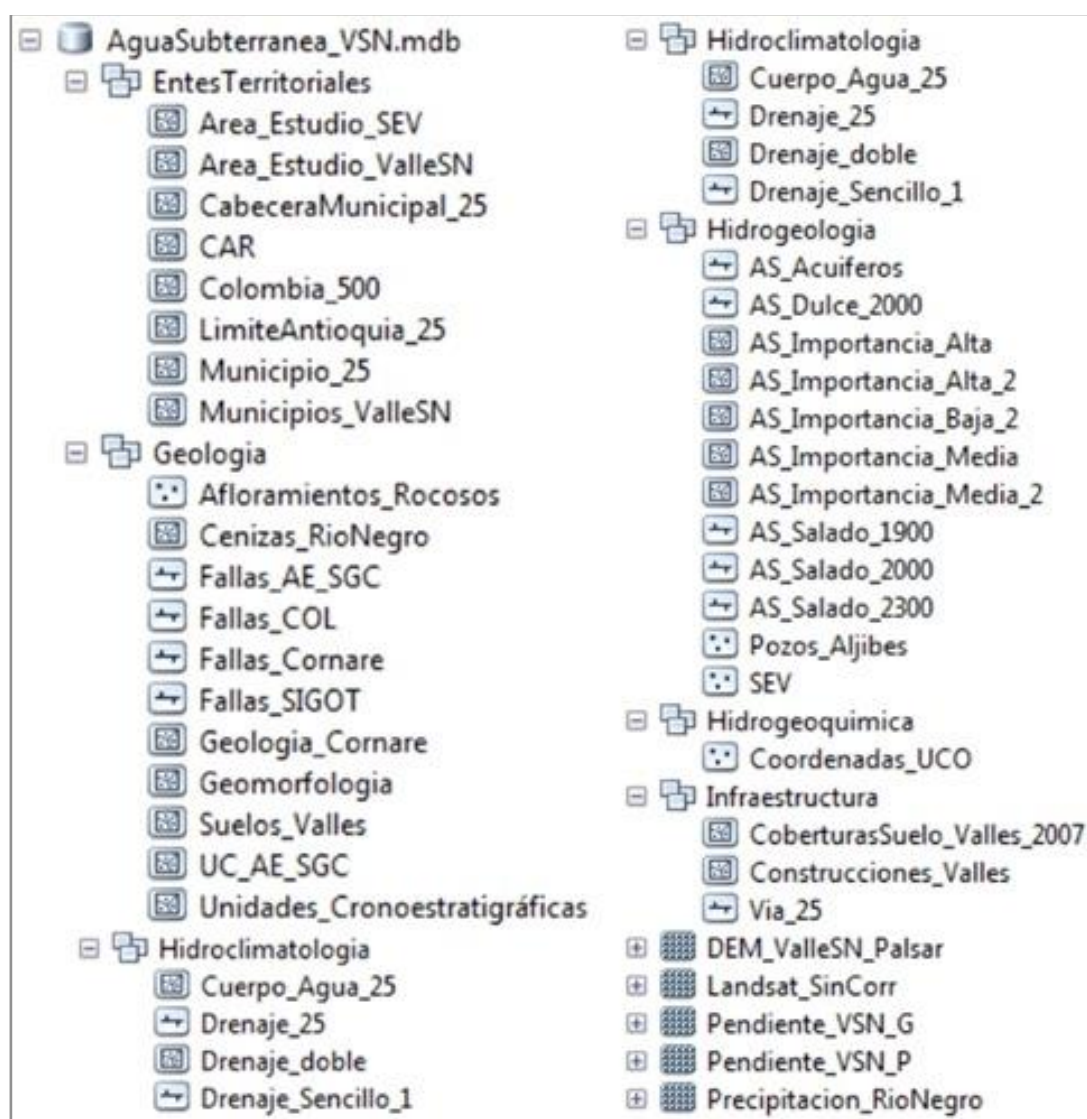


Figura 2. 2. Estructura de la geodatabase del proyecto

Configuración geológica y geomorfológica regional

La geología y la geomorfología son información base para los estudios hidrogeológicos, ya que, condicionan las propiedades hidráulicas del material, exponen la presencia de las estructuras geológicas que son aprovechadas por el fluido para su almacenamiento y movimiento, y predeterminan aquellos lugares en donde será más favorable la acumulación de agua en el subsuelo a modo de acuífero. Para este estudio se ha empleado cartografía geológica y geomorfológica secundaria, suministrada por Cornare. Dicha cartografía fue generada en el POMCA de Rionegro (2015, escala 1:25.000. Para mayor detalle referirse a dicho estudio).

El basamento rocoso en el VSN está formado por rocas cristalinas fracturadas: granitoides del Batolito Antioqueño, serpentinitas, metasedimentos y anfibolitas del Grupo Ayurá-Montebello, de acuerdo a la terminología propuesta por Botero (1963). La Figura 2. 2 ilustra el mapa geológico de la zona de estudio según el POMCA de Rionegro (2015).

En el perfil típico de meteorización se distinguen tres horizontes: un suelo residual maduro de limos de baja permeabilidad que normalmente tiene varios metros de espesor; una zona saprolítica de espesor variable que puede alcanzar decenas de metros de limos arenosos y arenas limosas con permeabilidad del orden de 10^{-5} a 10^{-6} m/s; y una zona de gruss que puede tener hasta varias decenas de metros de espesor y una permeabilidad del orden de 10^{-5} m/s (Carrillo, 1973).

Localmente, sobre los suelos residuales se han acumulado depósitos no consolidados de vertiente y depósitos aluviales, estos últimos alcanzan su mayor espesor e interés hidrogeológico en las vegas. Los depósitos de terraza ocupan una amplia extensión en la parte central del Altiplano de Rionegro, con espesor muy variables que puede ser de unos pocos decímetros hasta varias decenas de metros (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000).

En toda la extensión del área estudiada se encuentra un manto de ceniza volcánica, con un espesor medio de 1.3m que, en algunos sitios, llega a los 3m. La porosidad de este material se encuentra entre 64% y 87%, su elevada permeabilidad secundaria, su posición en superficie y su espesor, hacen de las cenizas un elemento clave en el proceso de infiltración (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000). Se puede ver la variación del espesor de la capa de ceniza en la Figura 2. 3.(Fuente: repositorio Cornare).

En cuanto a la geomorfología, la larga historia tectónica y morfogenética de la región ha dado lugar a la formación de dos niveles de superficies de erosión que en esta zona corresponden al Altiplano de Rionegro, que coincide con la superficie de erosión II, y al Valle de la Unión que corresponde a la superficie de erosión I descrita por Page & James (1981). La superficie de Erosión II corresponde con colinas saprolitizadas, en algunas ocasiones con perfil de meteorización avanzado, condición que le confiere permeabilidad y porosidad a la roca, propiedades requeridas para el flujo y la acumulación de las aguas subterráneas.

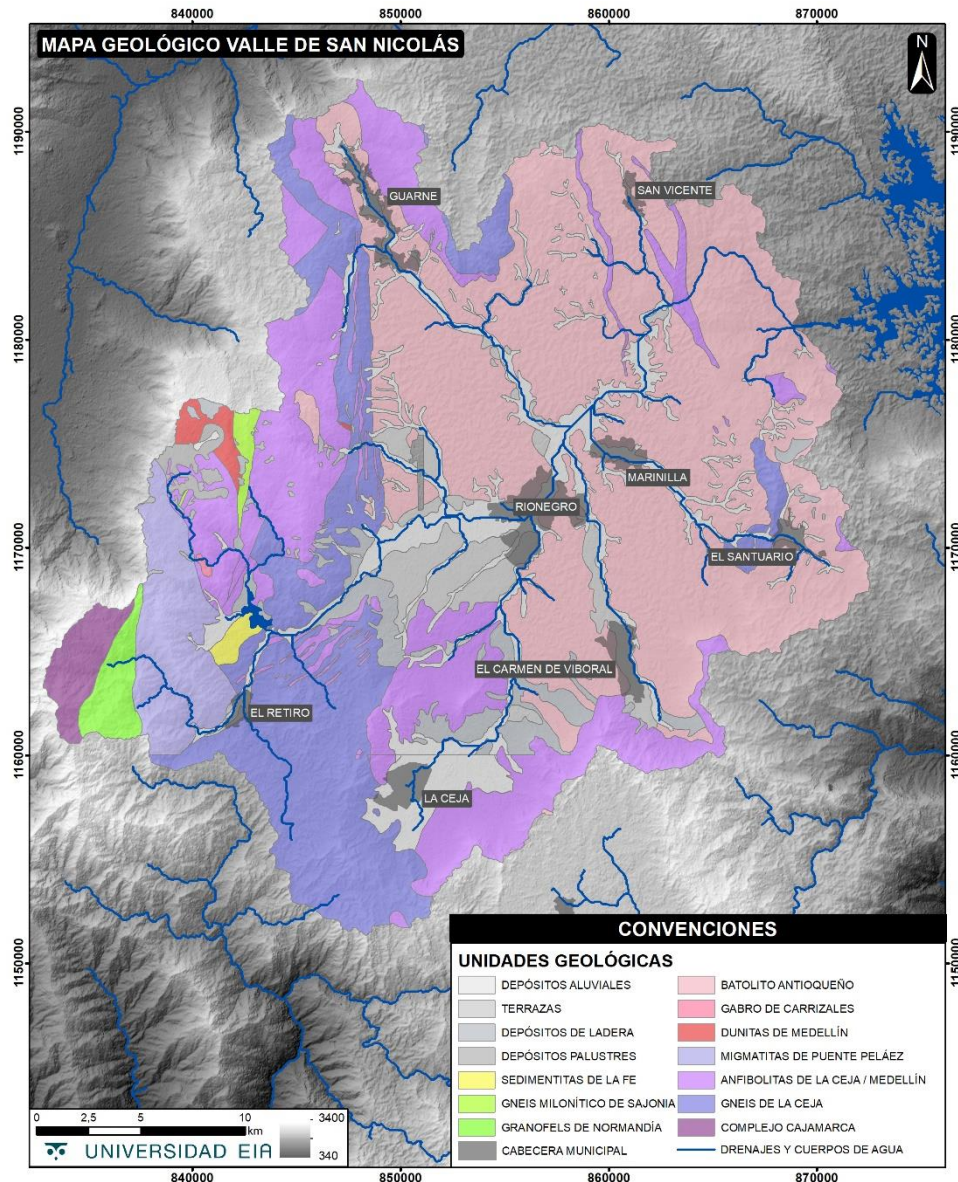


Figura 2. 3. Mapa geológico VSN. Escala 1:100.000. Adaptado del Pomca de Rionegro (2015)

La Figura 2. 4 ilustra el mapa geomorfológico de la zona de estudio. La superficie de erosión I forma en esta área una penillanura caracterizada por un conjunto de colinas bajas cuyo relieve local, del orden de 50m, ha sido suavizada por los depósitos de terraza en extensiones relativamente amplias (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000). La superficie plana de las terrazas, y los depósitos coluviales en las colinas llegan a dominar la morfología local.

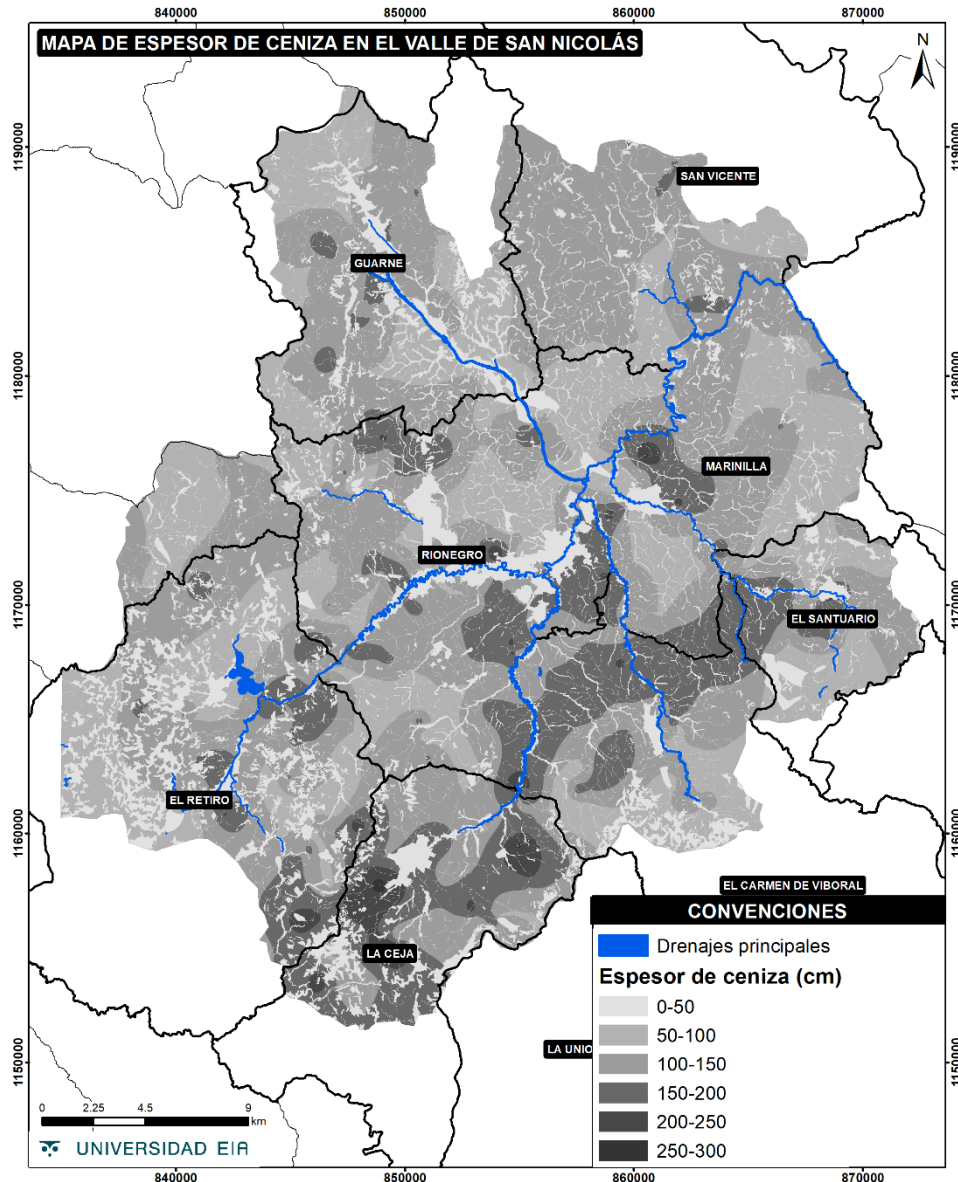


Figura 2. 4. Mapa de espesor de cenizas volcánicas del VSN.

Además de estas unidades geomorfológicas mayores se encuentran otras unidades menores de interés, pero de gran relevancia para este proyecto: las vegas y terrazas aluviales.

En el altiplano del Rionegro se han formado un conjunto de terrazas aluviales, en las cuales predominan la acumulación de sedimentos de arenas gruesas y gravas, adicionalmente predominan en primeros niveles depósitos de arenas intercalados con lentes de limos, cubiertos por mantos de cenizas volcánicas (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 1997). Las vegas aluviales están caracterizadas por una superficie plana en dirección de las corrientes. La vega aluvial es más amplia en el río Negro, cerca de la población de La Ceja y en el área de confluencia de las quebradas La Mosca y Marinilla con el río Negro.

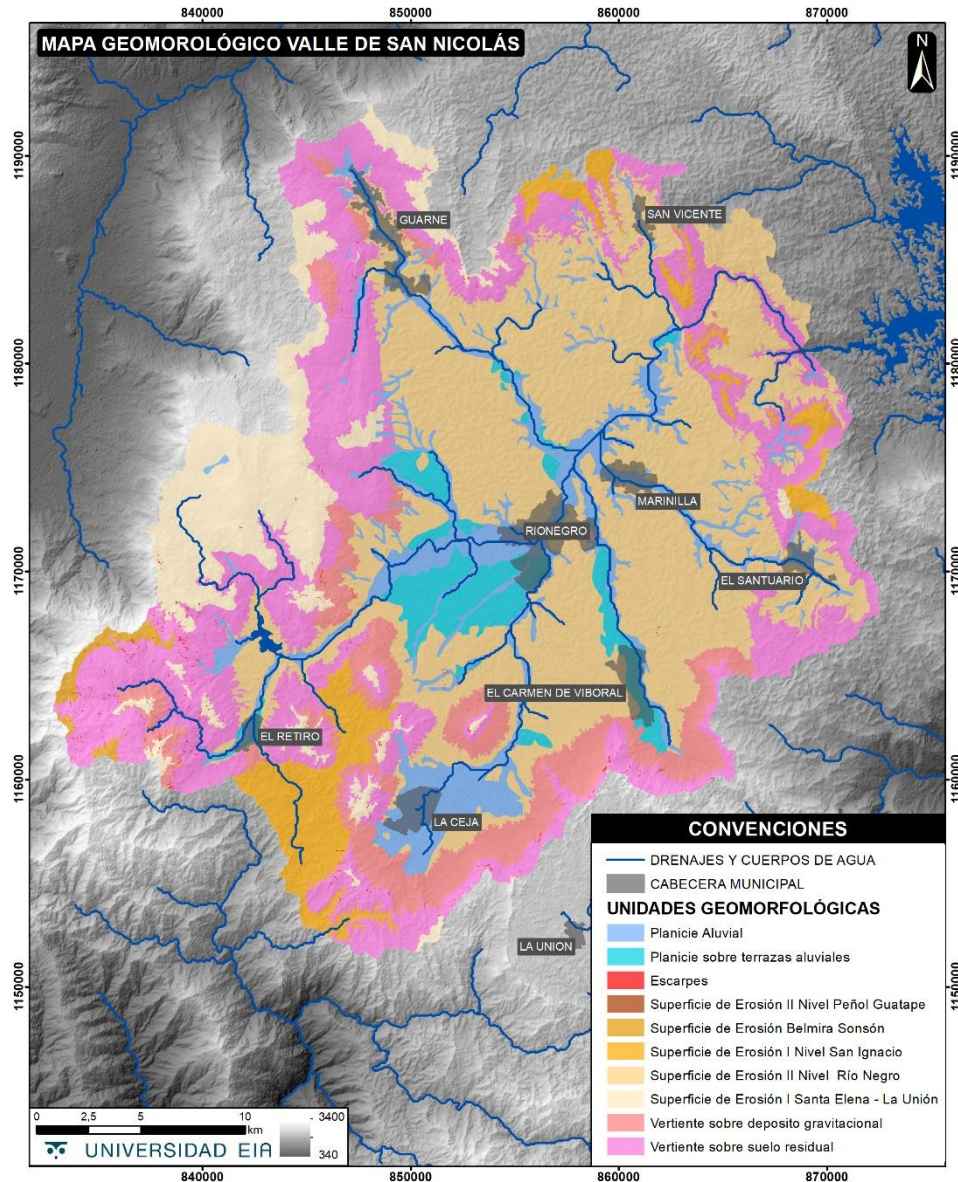


Figura 2. 5. Mapa Geomorfológico del VSN

La información estratigráfica de estas unidades geomorfológicas se presenta de manera detallada en el Capítulo 3 de este libro. Conceptualmente se parte de la hipótesis que los límites geomorfológicos superficiales, los cuales tienen respectivamente su configuración estratigráfica tipificada por columnas estratigráficas (levantadas con registros de perforación), corresponden en el subuelo, con los límites de propiedades con similar comportamiento hidráulico. Esta hipótesis fue sometida a prueba en el modelo numérico de Flujo subterráneo en donde los resultados de validación del modelo de flujo sugieren que si es válida esta hipótesis (detalles en el Capítulo 5).

Modelo geométrico del acuífero: Evaluación geofísica (Capítulo 3)

La evaluación geofísica ayuda a estimar propiedades físicas del subsuelo y correlacionarlas con la geología, por medio de métodos indirectos. Para el VSN se realiza el re-procesamiento de 109 de los 276 sondeos eléctricos verticales (SEV) del trabajo “Investigación de aguas subterráneas región Valle de San Nicolás. Fase II” realizado por la Universidad Nacional y Cornare (2000). La interpretación hidrogeológica se realiza con 9 registros de perforación que permitieron calibrar los valores de resistividad y proponer niveles hidroestratigráficos.

Estimación de la Recarga: Evaluación hidrológica (Capítulo 4)

En la superficie terrestre las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas hacen parte del mismo ciclo hidrológico y se encuentran en constante interacción. Por lo tanto, una evaluación hidrológica es aquella que analiza la distribución espacio temporal del balance hídrico (precipitación, evaporación, evapotranspiración, etc.); construida a partir de información hidroclimatológica, trazadores e inventarios de puntos de agua (pozos, aljibes y manantiales) y permite estimar la cantidad de agua que está recargando el sistema hidrogeológico (IDEAM, 2013).

La recarga del acuífero del VSN fue calculada mediante un balance hídrico de la cuenca Río Negro – Nare. Esto implica la recopilación y procesamiento de información hidrometeorológica como precipitación, además temperatura, radiación y caudales. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial y real se utilizan las ecuaciones de Turc modificada y la de Budyko, luego se realiza un álgebra de mapas para obtener el valor de recarga medio de la cuenca.

Modelo hidrodinámico: Modelo de Flujo subterráneo (Capítulo 5)

La representación de un modelo numérico de flujo incluye: la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con su potencial de almacenar y transmitir agua, propiedades hidráulicas, posición de niveles piezométricos, condiciones del flujo y su relación con los componentes del ciclo hidrológico (IDEAM, 2014). Se resuelve con base en la ecuación de flujo para aguas subterráneas, que representa cómo se mueve el agua en un medio poroso.

Evaluación de calidad del agua (Capítulo 6)

Esta evaluación es una herramienta que permite analizar el origen, los procesos y la evolución de la composición del agua almacenada en las unidades hidrogeológicas; y con la capacidad de determinar la calidad del agua, mediante análisis fisicoquímicos.

Para el VSN se analizan los iones mayoritarios, se determinan las facies hidrogeoquímicas y se comparan las concentraciones de los iones y coliformes con los valores aceptados para el consumo de agua según la legislación colombiana, a partir de los datos del muestreo realizado por la Universidad Católica de Oriente (UCO).

Evaluación del potencial con Sensores remotos (Capítulo 7)

En este capítulo se busca determinar zonas con potencial hidrogeológico usando rutinas que involucran SIG e información de sensores remotos. Estas rutinas son la base metodológica ampliamente usado en la literatura científica (Krishnamurthy, Mani, Jayaraman, & Manivel, 2000; Magesh, Chandrasekar, & Soundranayagam, 2012; Oikonomidis, Dimogianni, Kazakis, & Voudouris, 2015)

Esta metodología no solo permite el estudio de zonas más extensas gracias a las observaciones espacio temporales, sino que también ahorran tiempo y dinero. En primera instancia, se aplicó la metodología empleando únicamente información espacial de variables que se relacionan con la ocurrencia de zonas acuíferas, pero únicamente aquellas superficiales, sin incluir información subsuperficial. Como resultado se obtiene una zonificación de potencial hidrogeológico medido de forma indirecta que bien podría ser una buena aproximación para áreas con poca información y que permita hacer una planeación exploratoria más efectiva. Posteriormente, se emplea la misma metodología incluyendo resultados de mapeo del subsuelo para lograr una Zonificación hidrogeológica actualizada. (Resultados en el Capítulo 8),

Actualización zonificación hidrogeológica VSN (Capítulo 8)

Con base en todos los productos generados en este proyecto (Capítulos anteriores) se aplicaron metodologías de análisis multi-criterio para la determinación de las zonas de alto, mediano y bajo potencial hidrogeológico, lo que permitirá generar el modelo hidrogeológico actualizado del Valle de San Nicolás (VSN) que sea de utilidad para la gestión de las aguas subterráneas en esta subregión del Oriente Antioqueño.

Referencias

- CORNARE. (2017). Reserva Forestal Protectora Regional Cuchillas de El Tigre, El Calón y La Osa. Plan de Manejo Ambiental. El Santuario. Retrieved from <https://www.cornare.gov.co/SIAR/Plan-de-manejo/plan-de-manejo-cuchillas/Plan-de-Manejo-RFPR-Cuchillas-de-El-Tigre-El-Calón-y-La-Osa.pdf>
- Anderson, M., Woessner, W. W., & Hunt, R. (2015). *Applied Groundwater Modeling, Second Edition: Simulation of Flow and Advective Transport*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091638-5.00001-8>
- Hoyos, F., Vélez, M. V., Múnera, J. C., & Arias, D. E. (2001). Sistema Hidrogeológico del Altiplano de Rionegro y del Valle de la Unión en la Zona Central de Antioquia. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 8, 77–89.
- IDEAM. (2013). *Aguas subterráneas en Colombia : una visión general*. Bogotá: IDEAM.

Geometría y tipo de roca de los acuíferos

Introducción

La definición geométrica de un acuífero, implica conocer su extensión lateral y profundidad en el subsuelo, condición que está controlada principalmente por la distribución de los sedimentos o rocas potencialmente reservorios de agua subterránea, y por el control que ejerce la configuración del basamento (nivel de roca impermeable) como condición de frontera tanto en profundidad como lateralmente. La definición de la geometría y tipo de roca de los acuíferos en una región de interés hidrogeológico, es fundamental porque es la información del medio físico donde el modelo hidrogeológico conceptual es construido. Para lograr hacer la definición geométrica y la determinación del tipo de roca, se requiere información geológica y geofísica que provea tal información. La información del tipo de roca se reconstruye a partir de columnas estratigráficas bien sean colectadas en afloramientos o bien sea mediante núcleos de roca producto de perforación. La información sobre la geometría se logra mediante la interpretación e integración de registros geofísicos. Este capítulo presenta los datos, métodos y resultados obtenidos para lograr definir la geometría y los tipos de rocas que constituyen los acuíferos presentes en el Valle de San Nicolás. La Figura 3.1 presenta el área de estudio cubierta por esta componente, enmarcada por las unidades geomorfológicas de Llanura o planicie aluvial, terrazas aluviales y la superficie de erosión II de Rionegro. El área de estudio comprende una extensión aproximada de 935 km²

Marco conceptual

Los métodos geofísicos tienen como principio medir las propiedades de los materiales de la corteza terrestre, cuya interpretación permite preparar modelos de las características del subsuelo, que se encuentra por fuera de la observación directa, y de la distribución espacial de estas propiedades. En el caso de los sondeos geoléctricos se analiza la resistividad del subsuelo, habitualmente mediante métodos que operan por corriente continua, utilizando un dispositivo de diversos electrodos que se sitúan sobre el terreno en contacto eléctrico con el medio rocoso a estudiar (Arias Salguero, 2002).

De las posibles configuraciones de electrodos en los sondeos geoléctricos se encuentra comúnmente la configuración Schlumberguer, ilustrada esquemáticamente en la Figura 3.2, que, en general, da resultados más confiables, especialmente en sondeos profundos ya que los electrodos permanecen en una posición fija y los cambios adyacentes de resistividad en el registro de campo permanecen similares en toda la curva (Jha, Kumar, & Chowdhury, 2008).

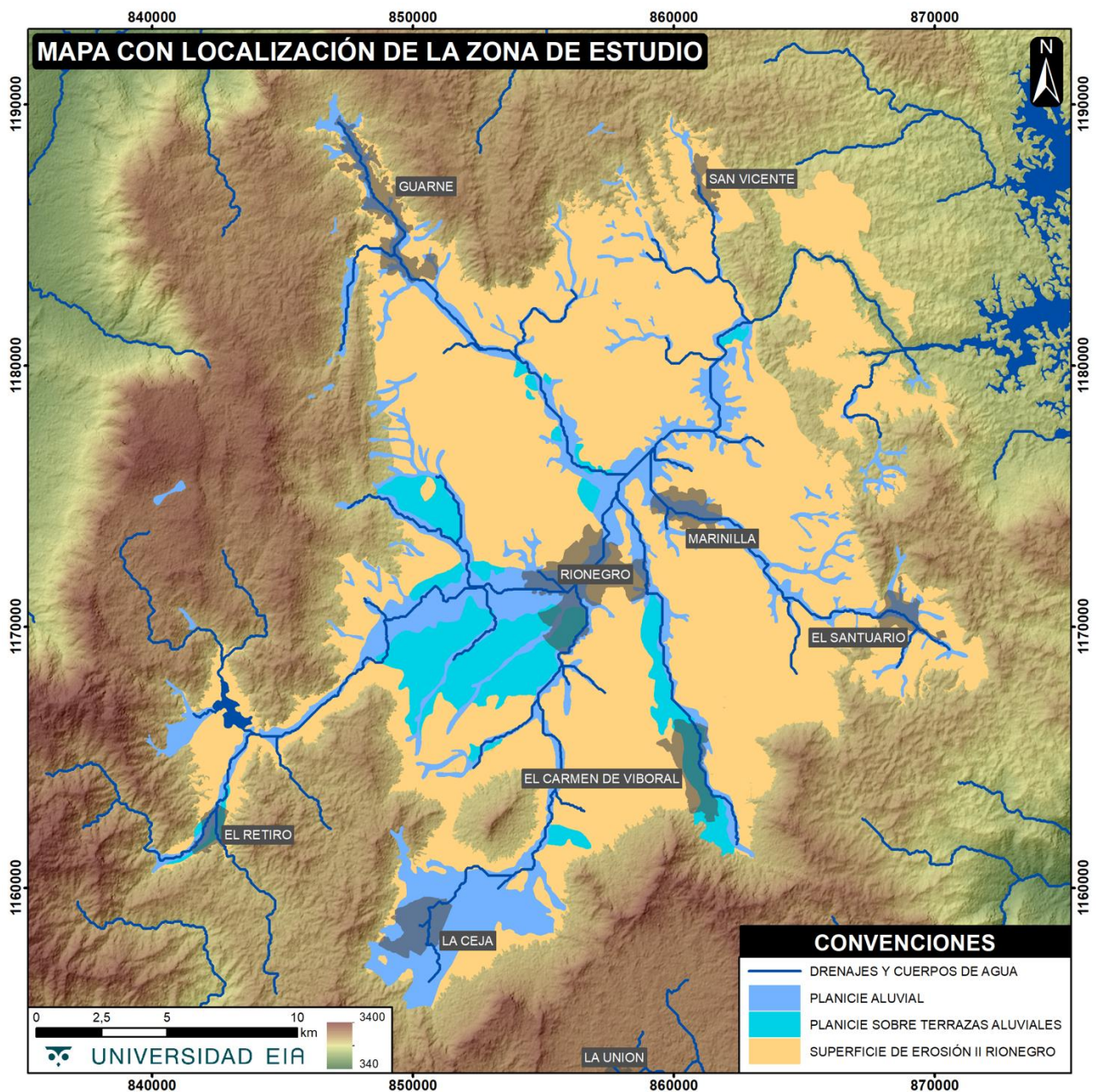


Figura 3. 1. Mapa con localización de la zona de estudio enmarcada al interior de los polígonos que representan la geomorfología: Planicie aluvial, Terrazas aluviales y Superficie de erosión II Rionegro (mapa geomorfológico tomado del POMCA de Rionegro (2015). El

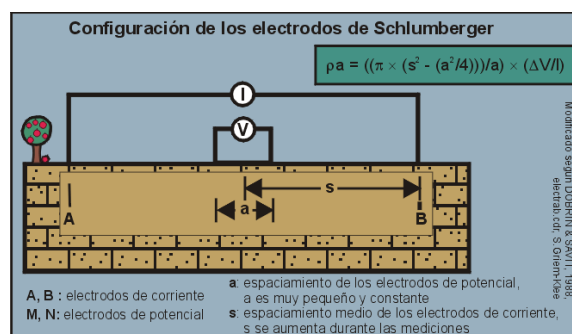


Figura 3. 2. Esquema de la configuración Schlumberger para SEV. Tomado de Auge (2008).

En los sondeos eléctricos verticales (SEV), la medición directa de la diferencia de potencial entre dos electrodos, llamados electrodos de potencial, permite calcular la resistividad media aparente del terreno hasta una cierta profundidad que es función de la distribución en superficie de los electrodos de corriente (Arias, 2011). En la interpretación geológica e hidrogeológica se combina estos modelos con la información geográfica para proponer un modelo hidrogeológico del sondeo eléctrico vertical (Shamsuddin & Sankar, 2001).

La resistividad depende de varios factores, entre estos de la litología y el grado de saturación que esta contenga, es por lo que con una apropiada calibración estratigráfica se puede restringir las soluciones e interpretar la presencia de reservorios de agua subterráneos con los datos obtenidos en campo. Como ejemplo, la Tabla 3.1 muestra los valores de resistividad real utilizados en el primer estudio hidrogeológico realizado en el Valle de San Nicolás elaborado por la Universidad Nacional de Colombia en convenio con CORNARE, la interpretación de los sondeos eléctricos verticales los define a partir de un conjunto de sondeos someros de verificación ejecutados en condiciones controladas sobre materiales y combinaciones de materiales característicos, que se encuentran en la zona de estudio.

Tabla 3. 1. Valores típicos de resistividad para el Valle de San Nicolás. Tomado del informe “Investigación de aguas subterráneas región Valles de San Nicolás. Fase II. Medellín”. (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000).

CATEGORÍA	RESISTIVIDAD
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	$> 10000\Omega m$
Basamento. Roca fracturada	1500 – $5000\Omega m$
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100 – $2000\Omega m$
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	50 – $100\Omega m$
Gruss parcialmente saturado	500 – $1000\Omega m$
Gruss saturado	40 – $60\Omega m$
Saprolito parcialmente saturado	200 – $500\Omega m$
Saprolito saturado	40 – $100\Omega m$
Gravas parcialmente saturadas	500 – $2000\Omega m$
Gravas saturadas	300 – $500\Omega m$
Arenas parcialmente saturadas	400 – $700\Omega m$
Arenas saturadas	100 – $200\Omega m$
Limos parcialmente saturados	100 – $200\Omega m$
Limos saturados	20 – $100\Omega m$

CATEGORÍA	RESISTIVIDAD
Limos saturados con agua salada	5 – 15Ωm
Ceniza volcánica	1000 – 2000Ωm
Ceniza volcánica húmeda	300 – 1000Ωm
Ceniza volcánica saturado	100 – 300Ωm

Datos y métodos

Para la definición de la geometría y tipo de roca de los acuíferos del VSN se tuvo acceso a 276 sondeos eléctricos verticales (SEV) adquiridos con configuración Schlumberger (Figura 3.3) y 19 registros de perforación (localización en Figura 3.4), disponibles en la base de datos proporcionada por CORNARE.

La información base utilizada corresponde 278 sondeos eléctricos verticales, de estos se digitalizan los registros de campo de 107 uniformemente espaciados en el área de estudio para su reinterpretación, 8 registros de perforación y el modelo de elevación digital descargado del satélite ALOS PALSAR de uso libre con 12.5m de resolución, mapa geológico y geomorfológico en escala 1:100.000 del POMCA en la jurisdicción de CORNARE.

La información generada a partir de los sondeos eléctricos verticales fue modelada e interpretada con ayuda del software de uso libre IPI2WIN. Toda la información utilizada fue georreferenciada y administrada con ArcGIS®, programa licenciado para la Universidad EIA. El Anexo 1 corresponde a la reinterpretación de todos los SEV. Para determinar la geometría de las unidades hidrogeológicas se requiere en principio validar el modelo de elevación digital descargado del satélite ALOS PALSAR, luego recopilar los registros de perforación que son usados para interpretar los sondeos eléctricos verticales en el software IPI2WIN, que posteriormente son interpolados para proponer la distribución de la base del sistema acuífero. A continuación, se describe el procedimiento empleado.

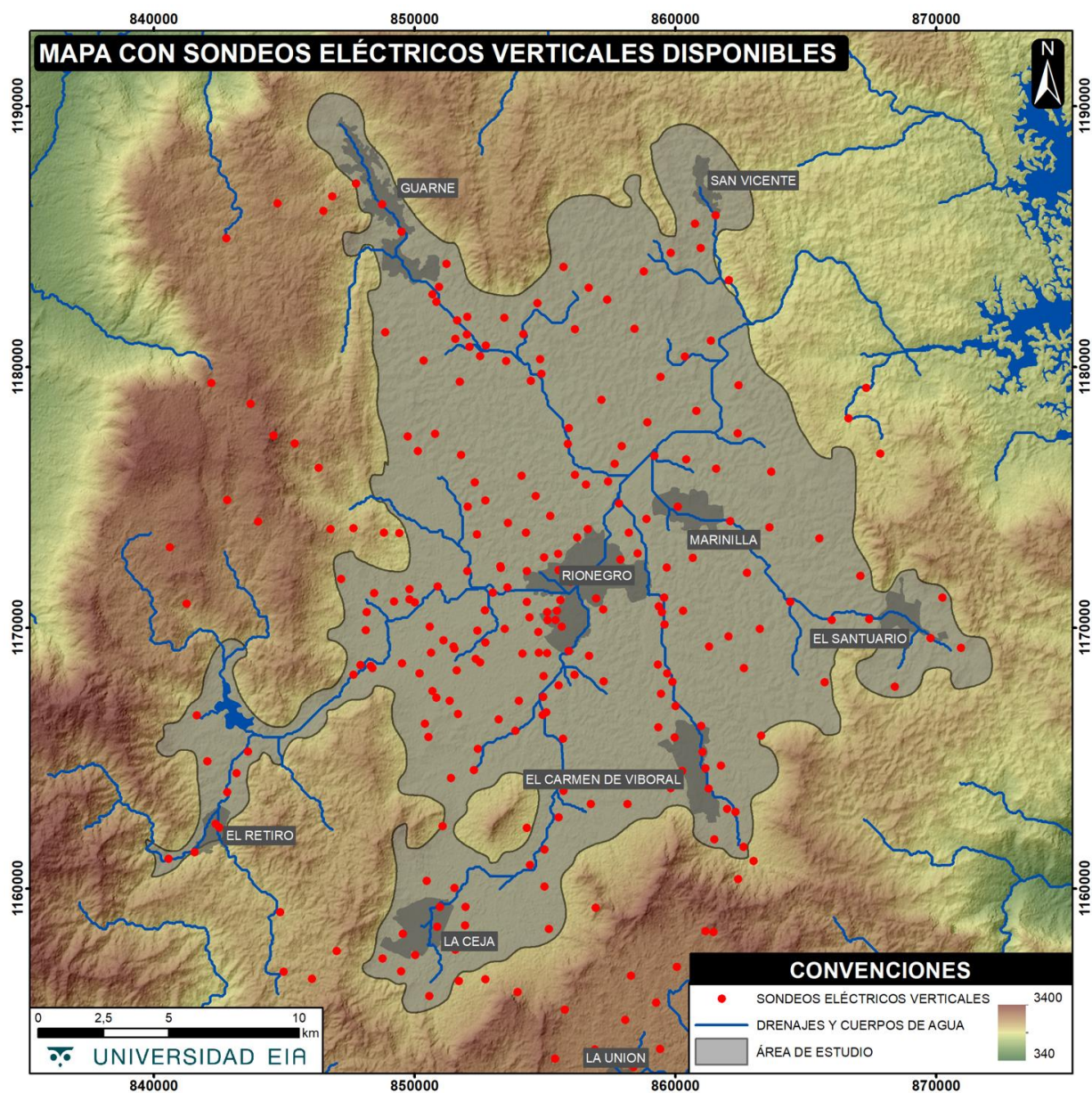


Figura 3. 3. Mapa con sondeos eléctricos verticales. Elaboración propia. Imagen de fondo DEM (tomado de satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y localización de SEV de Universidad Nacional de Colombia & CORNARE (1997).

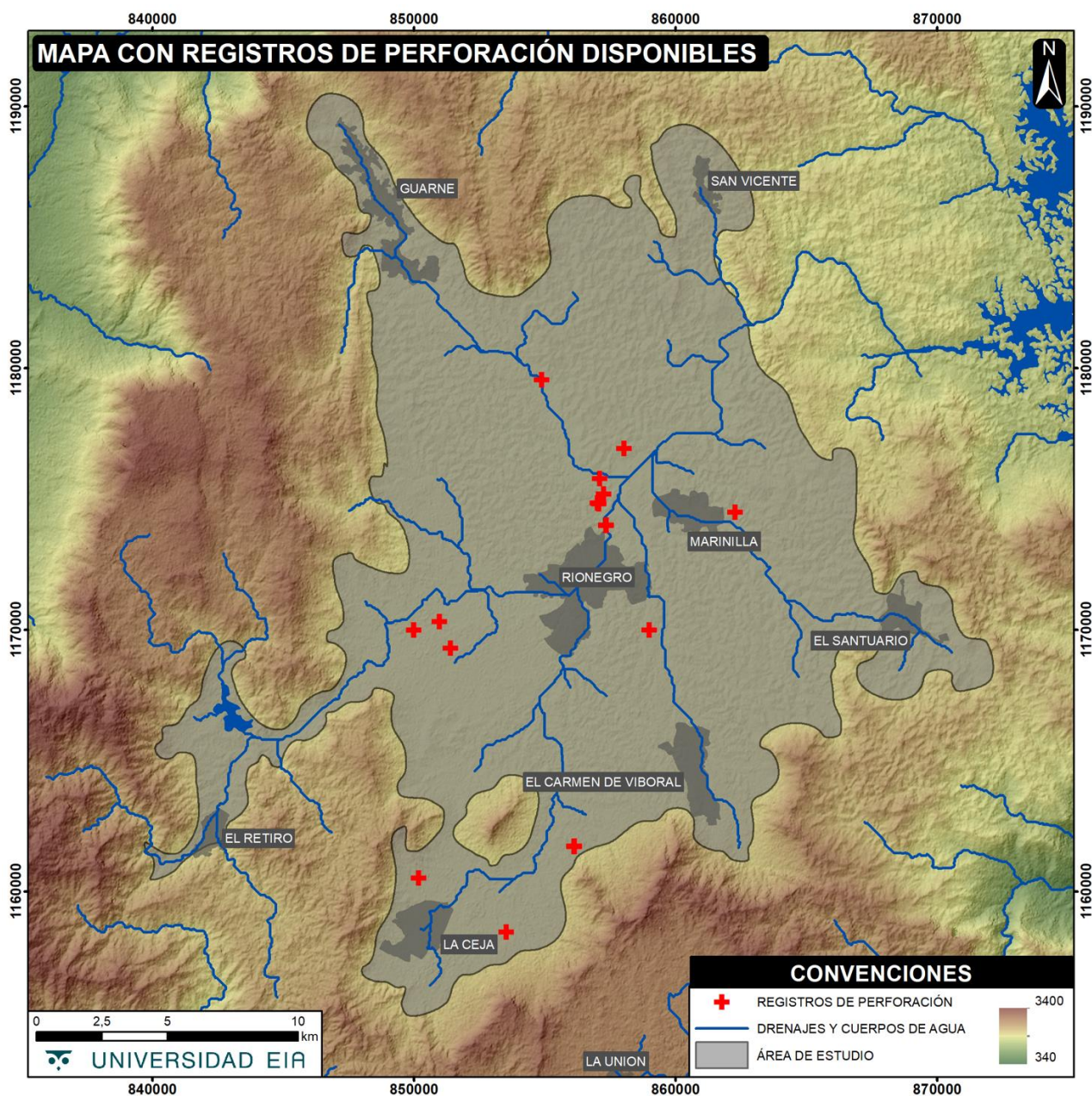


Figura 3. 4. Mapa con registros de perforación disponibles (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 1997). Elaboración propia. Imagen de fondo DEM (m.s.n.m., Tomado de satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y registros de perforación de Unive

Se obtuvo inicialmente el Modelo de Elevación Digital (DEM) ALOS PALSAR con 12.5m de resolución para la zona del Valle de San Nicolás, debido a la importancia de la distribución topográfica de la zona de estudio para precisar un modelo geológico, geoelectrico y posteriormente hidrogeológico se requiere una validación de dicho modelo.

Para el amarre vertical del DEM, se tomaron como referencia los puntos con cotas fotogramétricas de las planchas 131ID, 147ID, 147IIIB y 147IIID disponibles en la cartografía de uso público que se encuentra en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), estas cuatro planchas abarcan tanto la zona baja del valle, altiplano como la zona de ladera.

Se calcula la diferencia entre el valor del modelo inicial y el de los puntos fotogramétricos contenidos en las cuatro planchas cartográficas, este error se fracciona en diferentes zonas

según el rango de cotas y se le asigna un valor calculado con la diferencia previamente mencionada.

El error calculado se distribuye en el área de estudio en formato ráster, para esto se realiza una interpolación geoestadística con el método de Kriging en ArcGIS®, este ráster permite disminuir el error identificado en el modelo de elevación digital inicial y a partir de un álgebra de mapas se obtiene un DEM corregido el cual se usa posteriormente para modelar las variables del subsuelo que requiere el modelo hidrogeológico en estudio.

Recopilación de Registros de perforación y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

En este proyecto, de los 276 registro iniciales, se tomaron 109 sondeos eléctricos verticales espacialmente distribuidos en el área de estudio (Figura 3.5) con el fin de generar una propuesta de distribución de acuíferos y de conocer sus límites en profundidad y lateralmente.

Los datos de campo de los sondeos eléctricos verticales escogidos, se digitalizaron en una base de datos, tal como: el número del sondeo, coordenada X, coordenada Y, apertura AB/2, apertura MN/2 y la resistividad medida in situ.

La interpretación hidrogeológica de cada sondeo eléctrico también requiere tener puntos de control geológico que permiten generalizar el modelo estratigráfico en el subsuelo, para esto se tomaron 9 registros de perforación (Tabla 3.2 a 3.9) disponibles en los resultados de Universidad Nacional de Colombia & CORNARE (1997). Para fines de interpretación, estos se simplificaron en cinco litologías, esto con el fin de llegar a diferencia materiales gruesos y finos, aluviales de in situ y el basamento rocoso. La distribución de los registros de perforación utilizados se visualiza en la Figura 3.6 y los registros empleados se recopilan a continuación.

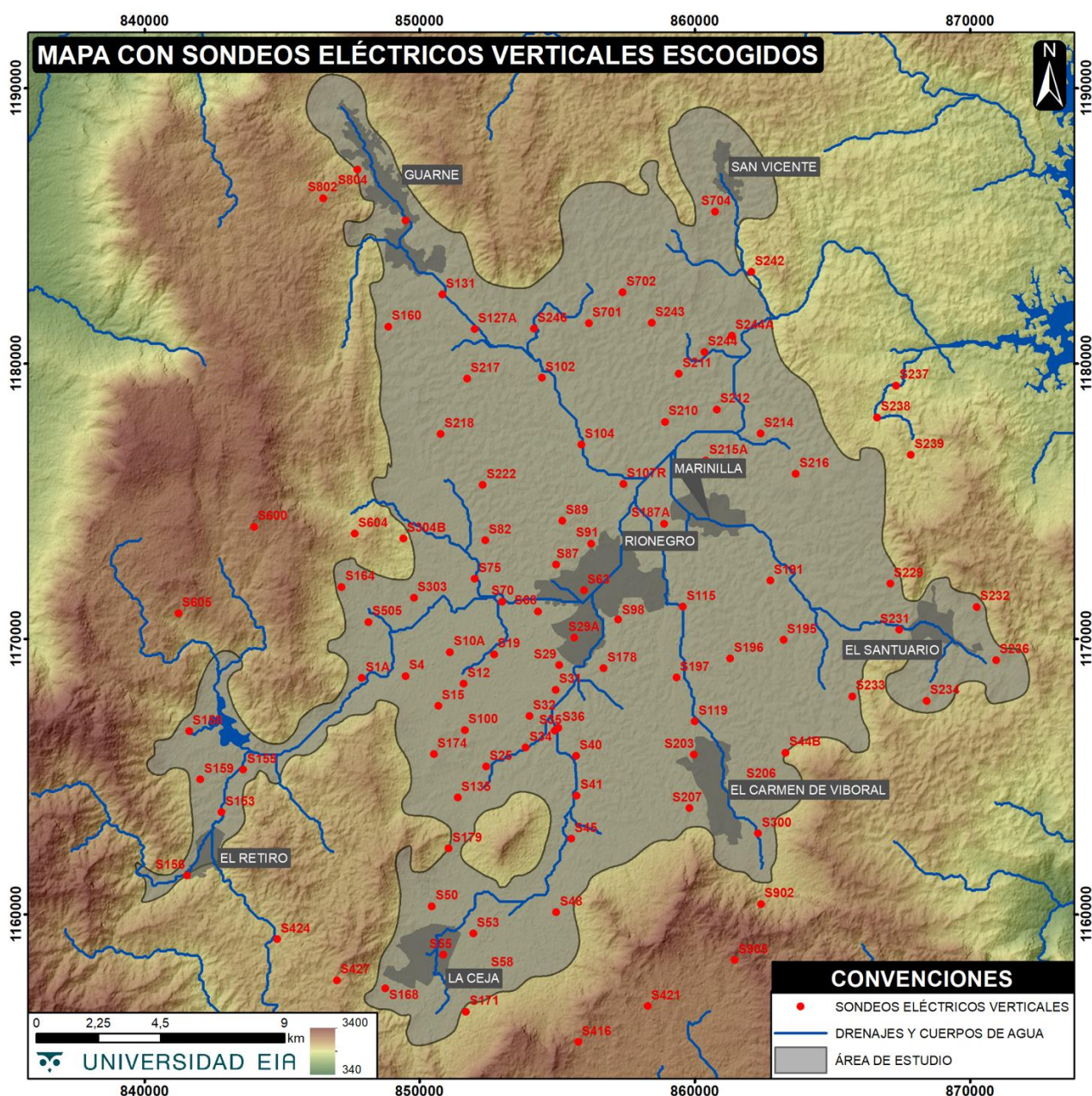


Figura 3. 5. Mapa con sondeos eléctricos verticales escogidos. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y SEV Una (2000).

Tabla 3. 2. Columna estratigráfica del registro de perforación Cultiflores. Adaptado de la base de datos de CORNARE consultada a junio de 2017.

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: CULTIFLORES			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Suelo orgánico	0	2
II	Gravas	2	12
III	Arenas	12	18
IV	Saprolito	18	35
V	Basamento	35	

Tabla 3. 3. Columna estratigráfica del registro de perforación Dulces. Adaptado del informe “Investigación de aguas subterráneas región Valles de San Nicolás. Fase II. Medellín”. (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000).

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: DULCES			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Suelo orgánico	0	3
II	Gravas	3	11
III	Saprolito	11	33
IV	Basamento	33	

Tabla 3. 4. Columna estratigráfica del registro de perforación Granja Avinal. Adaptado de la base de datos de CORNARE consultada a junio de 2017.

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: AVINAL			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Suelo orgánico	0	2
II	Gravas	2	8
III	Arenas	8	12.5
IV	Basamento	12.5	

Tabla 3. 5. Columna estratigráfica del registro de perforación Seminario Espíritu Santo. Adaptado del informe “Investigación de aguas subterráneas región Valles de San Nicolás. Fase II. Medellín”. (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000).

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: SEMINARIO ESPÍRITU SANTO			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Suelo orgánico	0	3
II	Limos y arcillas	3	22
III	Arenas	22	45
IV	Basamento	45	

Tabla 3. 6. Columna estratigráfica del registro de perforación Nacional de Chocolates. Adaptado del informe “Investigación de aguas subterráneas región Valles de San Nicolás. Fase II. Medellín”. (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000).

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: NACIONAL DE CHOCOLATES			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Suelo orgánico	0	3

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: NACIONAL DE CHOCOLATES			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
II	Arenas	3	10
III	Gravas	10	20
IV	Arenas	20	29
V	Basamento	29	

Tabla 3. 7. Columna estratigráfica del registro de perforación Acueducto Galicia. Adaptado de la base de datos de CORNARE consultada a junio de 2017.

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: ACUEDUCTO GALICIA			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Suelo orgánico	0	2.5
II	Arcilla	2.5	33
III	Saprolito	33	40
IV	Basamento	40	

Tabla 3. 8. Columna estratigráfica del registro de perforación Corpaul. Adaptado del informe “Investigación de aguas subterráneas región Valles de San Nicolás. Fase II. Medellín”. (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000).

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: CORPAUL			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Suelo orgánico	0	5
II	Arenas y gravas	5	28
III	Saprolito	28	33
IV	Basamento	33	

Tabla 3. 9. Columna estratigráfica del registro de perforación Fricarnes. Adaptado de la base de datos de CORNARE consultada a junio de 2017.

REGISTRO DE PERFORACIÓN ASOCIADO: FRICARNES			
	LITOLOGÍA	PROFUNDIDAD INICIAL [m]	PROFUNDIDAD FINAL [m]
I	Ceniza volcánica	0	1
II	Limos	1	15
III	Arenas	15	46.6
IV	Basamento	46.6	

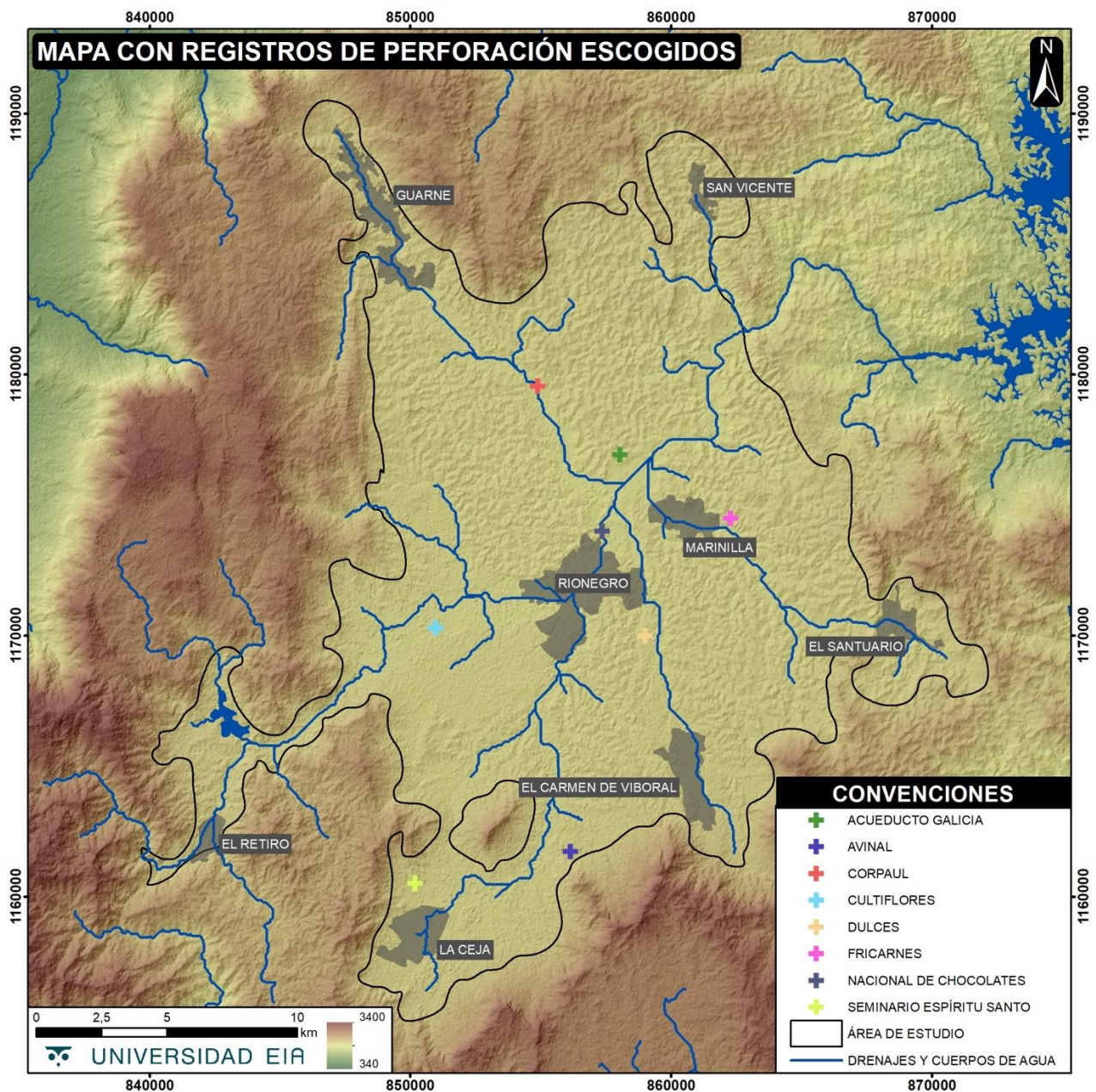


Figura 3. 6. Mapa con registros de perforación escogidos para la calibración geoelectrica. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC y registros de perforación del estudio Universidad Nacional de Colombia & C CORNARE (1997).

Interpretación IPI2WIN

Los sondeos eléctricos verticales se interpretan en el software de uso libre IPI2WIN con base en una calibración dada a partir de registros litológicos de perforación. Para cada sondeo se le asigna el registro de perforación más cercano y que se encuentre en la misma geomorfología (Figura 3.7).

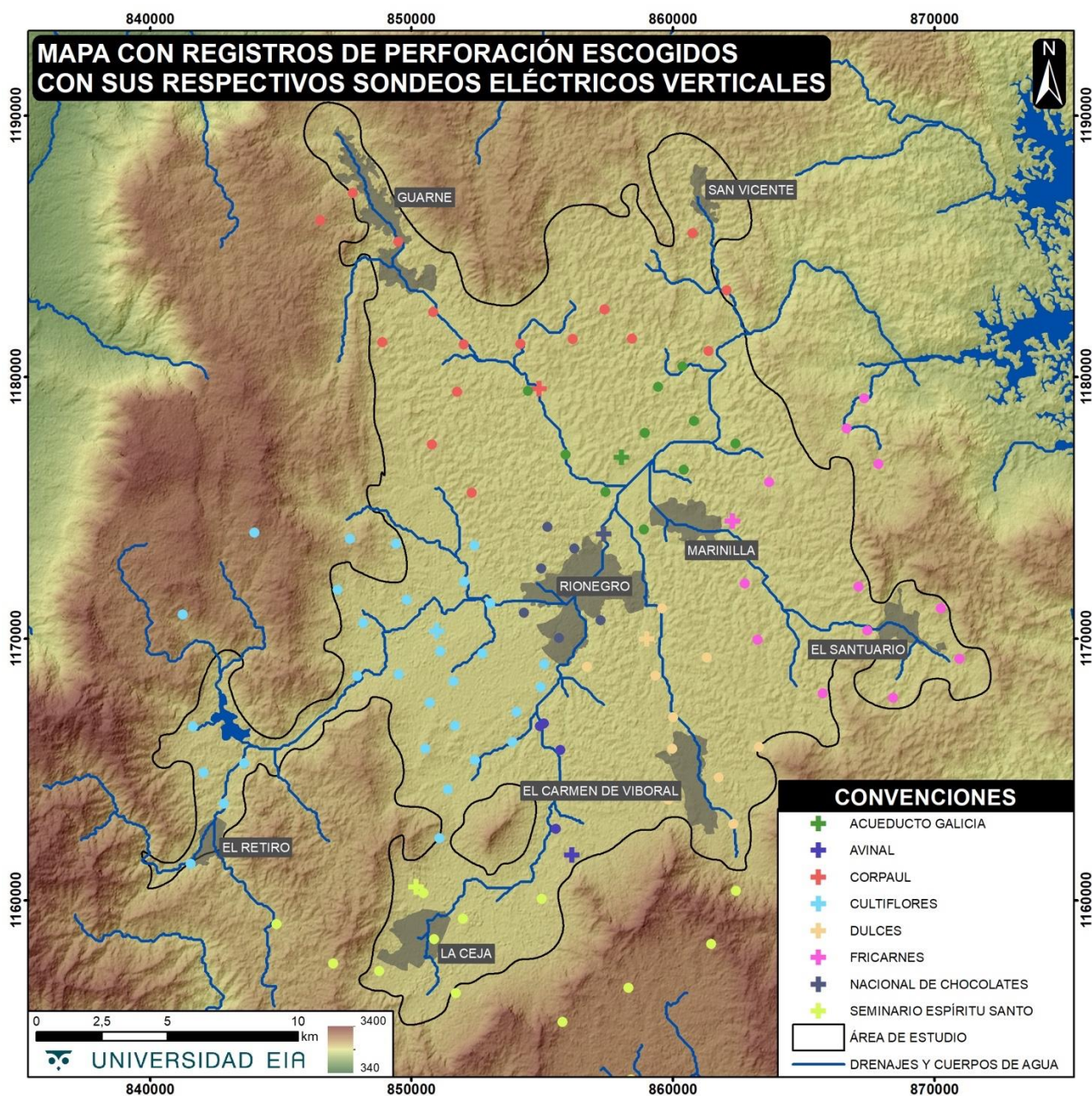


Figura 3. 7. Mapa con registros de perforación escogidos con sus respectivos sondeos eléctricos verticales. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR), información base adaptado del IGAC. Las cruces representan la ubicación de los registros de perforación y los puntos, los SEV. Los colores de los puntos SEV representan con cual registro estratigráfico fueron calibrados. La información primaria fue tomada del estudio Universidad Nacional de Colombia & CORNARE (1997,2000), autorizado por Cornare.

La interpretación se fija tomando un modelo simplificado de los registros de perforación, y se modelan los horizontes con sus profundidades en el punto del registro, estas profundidades se ajustan posteriormente con el fin de disminuir el error de la interpretación teórica con los datos de campo.

Finalmente, se valida con la geología de cada uno de los horizontes y con el valor de la resistividad absoluta modelada, para determinar si cada horizonte se encuentra parcial o totalmente saturado teniendo en cuenta los valores de la Tabla 3.10. Con ello se determina la profundidad de la base del acuífero y del alto resistivo (nivel de roca más impermeable) que corresponde al basamento geoelectricamente interpretado.

Tabla 3. 10. Valores de la resistividad propios del proyecto. Adaptado del informe “Investigación de aguas subterráneas región Valles de San Nicolás. Fase II. Medellín”. (Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 2000).

CATEGORÍA	RESISTIVIDAD
Basamento	$> 10000\Omega m$
Saprolito parcialmente saturado	$200 - 500\Omega m$
Saprolito saturado	$40 - 100\Omega m$
Gravas parcialmente saturadas	$500 - 2000\Omega m$
Gravas saturadas	$300 - 500\Omega m$
Arenas parcialmente saturadas	$400 - 700\Omega m$
Arenas saturadas	$100 - 200\Omega m$
Limos parcialmente saturados	$100 - 200\Omega m$
Limos saturados	$20 - 100\Omega m$
Ceniza volcánica	$1000 - 2000\Omega m$
Ceniza volcánica húmeda	$300 - 1000\Omega m$
Ceniza volcánica saturado	$100 - 300\Omega m$

Estas profundidades son restadas a la cota superficial del sondeo eléctrico vertical y se generan dos atributos a los sondeos eléctricos: cota de la base del acuífero y cota del basamento. Posteriormente se realiza una interpolación tipo Kriging empleando el Geostatistical Wizard de ArcGIS®.

Definición de acuíferos

El contenido de cenizas en superficie, la topografía esencialmente horizontal y su elevada porosidad y permeabilidad, hacen de esta zona interesante desde el punto de vista hidrogeológico, este conjunto de características propias del área de estudio es clave en el proceso de infiltración así no constituyan reservorios permanentes.

Los resultados de los sondeos eléctricos, reinterpretados en el software de uso libre IPI2WIN junto con la integración a la información estratigráfica, permiten distinguir y caracterizar los siguientes tres acuíferos:

Acuífero de la Planicie aluvial

En toda la extensión de la vega aluvial se encuentran depósitos de arenas aluviales, con resistividades entre 60 y 250 Ωm , hasta profundidades del orden de 25 m, donde se propone que estos estratos se encuentran comúnmente saturados y parcialmente saturados. En promedio la profundidad del basamento es del orden de 55 m.

En la mayoría de los sondeos, cuya curva de resistividad cóncava típica se encuentra en la Figura 3.8, se registraron valores de resistividad relativamente bajos (60 Ωm), a 30 m de profundidad aproximadamente, donde estratigráficamente correlacionados con los registros de perforación Cultiflores, Corpaul, Seminario Espíritu Santo y Nacional de Chocolates, corresponden a depósitos de gravas. Definiéndose el primer acuífero del VSN en este sector.

En los alrededores de la cabecera municipal de La Ceja, así como lo muestra la Figura 3.9 del sondeo eléctrico S53, los valores de resistividad que se encuentran en la planicie aluvial tienen rangos entre 400 y 600 Ωm , donde predominan limos hasta los 5 m de profundidad, sobrepuestos a estratos de arenas y gravas saturadas. La profundidad del basamento varía entre 40 y 60 m. La comparación entre ambos registros, si bien caracterizan la presencia de un acuífero, pone en evidencia la alta variabilidad de tipos de sedimentos presentes en este acuífero, y que por el alcance regional de este estudio, no se resuelve de manera detallada.

El acuífero de la planicie aluvial se sugiere como el área de mayor potencial hidrogeológico en el área de estudio pues la interpretación geoeléctrica realizada muestra que la mayoría de los sondeos realizados en esta zona presentan depósitos permeables, principalmente de arenas y gravas los cuales se encuentran saturados y parcialmente saturados. Esta observación será evaluada en el capítulo 5 con el modelo del flujo subterráneo.

La base del acuífero (Figura 3.17) para esta zona se encuentra en promedio a una cota de 2060 msnm, siendo esta la parte topográficamente más baja al igual que el basamento (Figura 3.18) que se interpreta a 1900 msnm.

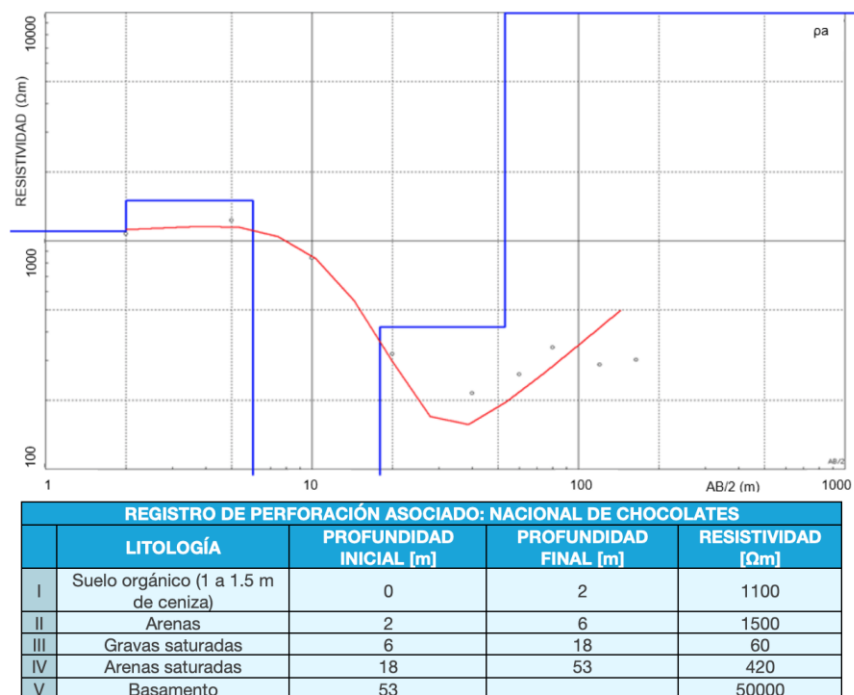


Figura 3. 8. Curva de resistividad aparente del sondeo S63 en planicie aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación de la estratigrafía en el SEV S 63 calibrada con registro de perforación.

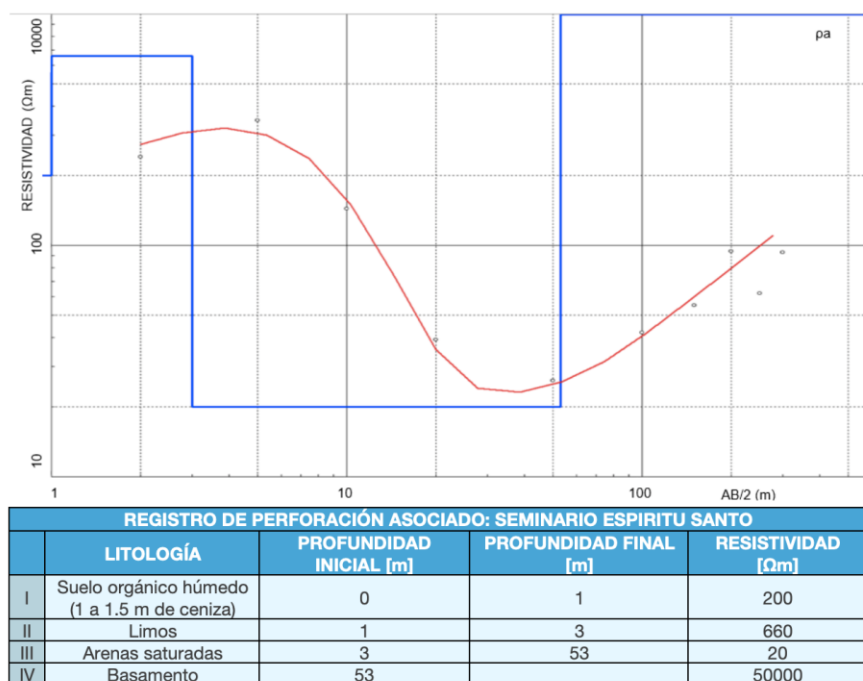


Figura 3. 9. Curva de resistividad aparente del sondeo S53 en planicie aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.

Acuífero de terraza aluvial

Este acuífero se caracteriza por presentar horizontes de gravas con resistividades del orden de 450 a 700 Ω m, que se encuentran hasta los 15 metros de profundidad, así como se muestra en la curva típica del sondeo S197, S119 y S206 en la Figura 3.10, 3.11 y 3.12 respectivamente. Estos estratos se encuentran comúnmente saturados y parcialmente saturados y la interpretación geofísica sugiere una profundidad promedio del basamento del orden de 45 m.

La estratigrafía propuesta para estos sondeos se correlaciona con los núcleos de perforación Dulces y Avinal, los cuales se caracterizan por tener un horizonte de gravas hasta los 9 m de profundidad, encima de un estrato areno limoso que corresponde al saprolito, cuyo espesor puede alcanzar hasta 15 m. Subyaciendo estas unidades, se encuentra el basamento. El acuífero asociado con la planicie sobre terraza aluvial representa también un potencial hidrogeológico importante en la zona de estudio, pues la interpretación en la mayoría de los sondeos eléctricos propone que este horizonte de arenas se encuentra saturado y el saprolito subyacente también saturado o parcialmente saturado, sin embargo, se debe tener en cuenta que la cantidad de limos intercalado en las arenas de este horizonte, limita su capacidad de almacenamiento y probablemente le confiere también alta variabilidad lateral.

La base del acuífero (Figura 3.17) para esta zona se encuentra en promedio a 2100 msnm, siendo esta topográficamente más alto que en la zona de planicie aluvial al igual que el basamento (Figura 3.18) que se interpreta a 2200 msnm.

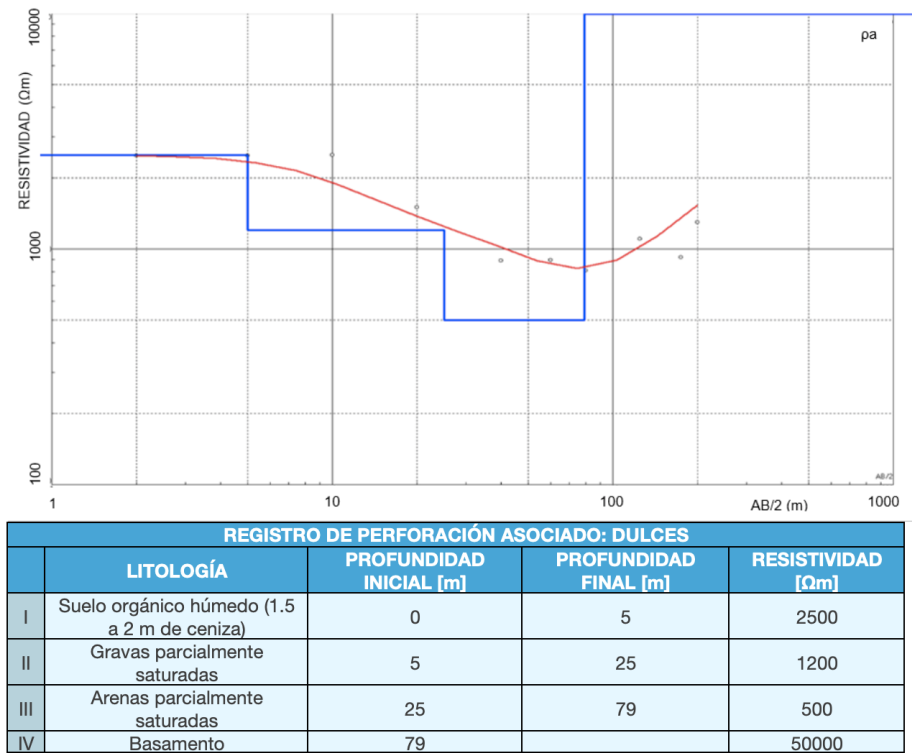


Figura 3. 10. Curva de resistividad aparente del sondeo S197 en planicie sobre terraza aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.

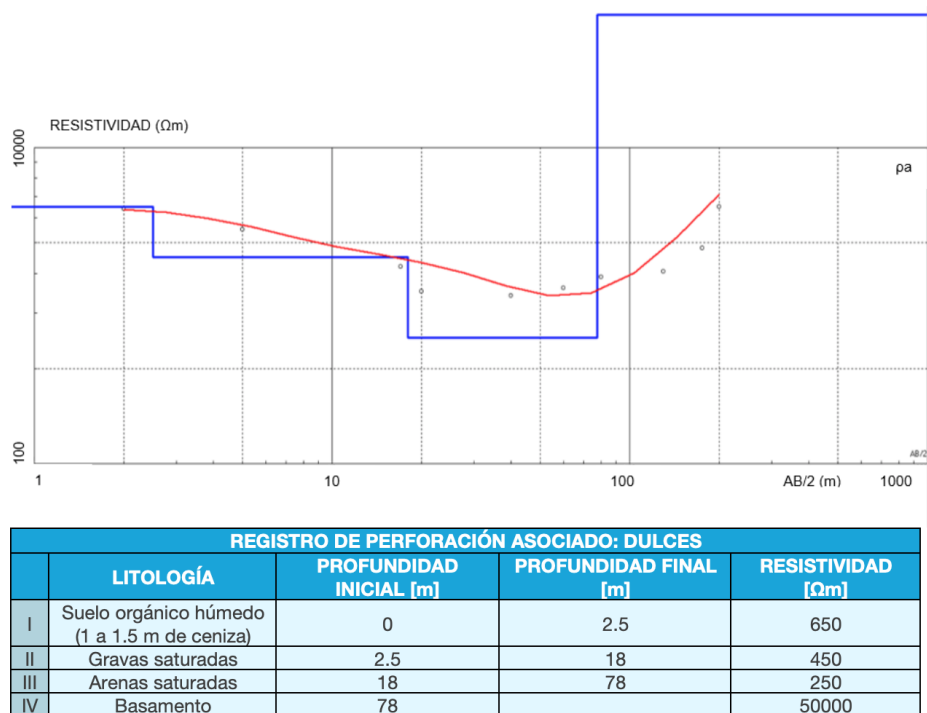


Figura 3. 11. Curva de resistividad aparente del sondeo S119 en planicie sobre terraza aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.

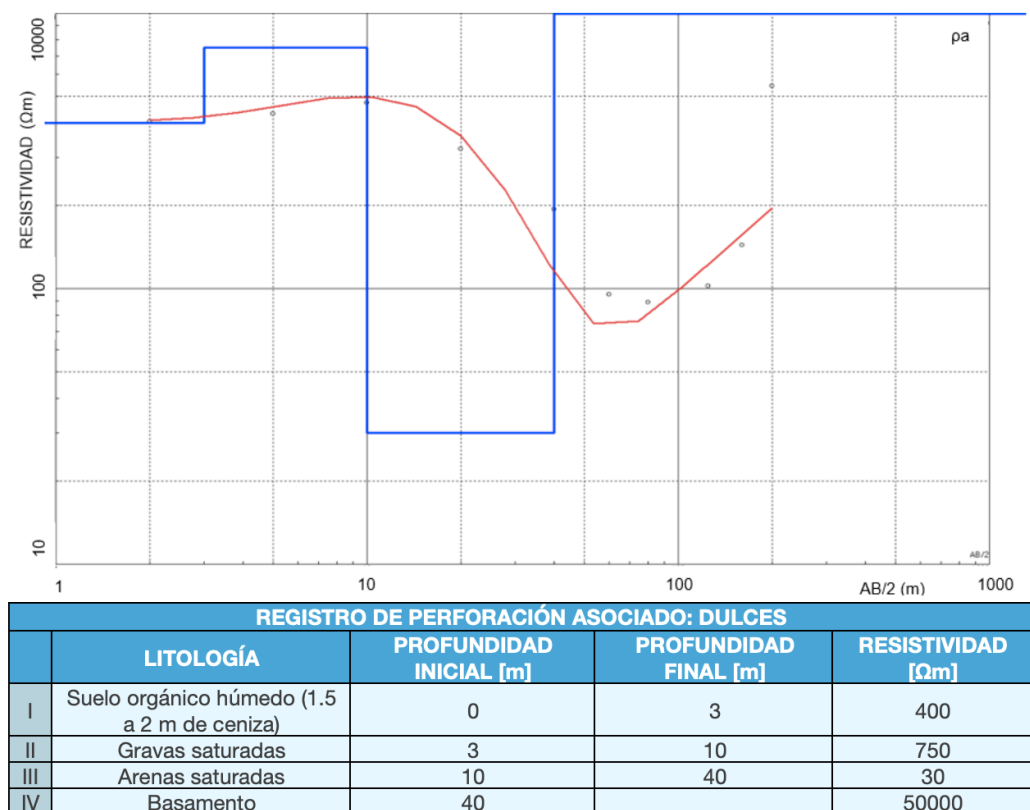


Figura 3. 12. Curva de resistividad aparente del sondeo S206 en planicie sobre terraza aluvial. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.

Acuífero en Superficie de erosión II de Río Negro

Este acuífero se caracteriza por presentar horizontes de limos con resistividades del orden de 1300 a 1700 Ωm , que se encuentran hasta los 15 metros de profundidad, así como se muestra en la curva típica del sondeo S216, S233 y S244 en la Figura 3.13, 3.14 y 3.15 respectivamente. Por debajo de los limos, frecuentemente ocurren materiales arenosos los cuales se encuentran comúnmente parcialmente saturados. Dichos materiales se interpretan como saprolito resultante de la meteorización de las rocas cristalinas presentes en la zona (ver mapa geológico). La profundidad del basamento variable, sugiriendo una alta variabilidad lateral del perfil de meteorización.

La estratigrafía propuesta para estos sondeos se correlaciona con los registros de perforación Fricarnes y Acueducto Galicia, los cuales se caracterizan por tener un horizonte de arcillas y limos hasta los 12 m de profundidad, encima de un estrato areno limoso que corresponde al saprolito con un espesor de hasta 30 m, y se encuentra el basamento a 45 m de profundidad.

El potencial hidrogeológico en el acuífero asociado con la superficie de erosión II de Río Negro, es menor que el acuífero de la planicie aluvial y que el acuífero de la planicie sobre terraza aluvial, puesto que estratigráficamente se encuentra mayor cantidad de materiales finos que limita la acumulación de agua subterránea, sin embargo, en la mayoría de los sondeos eléctricos se interpreta que el horizonte de saprolito se encuentra saturado y parcialmente saturado.

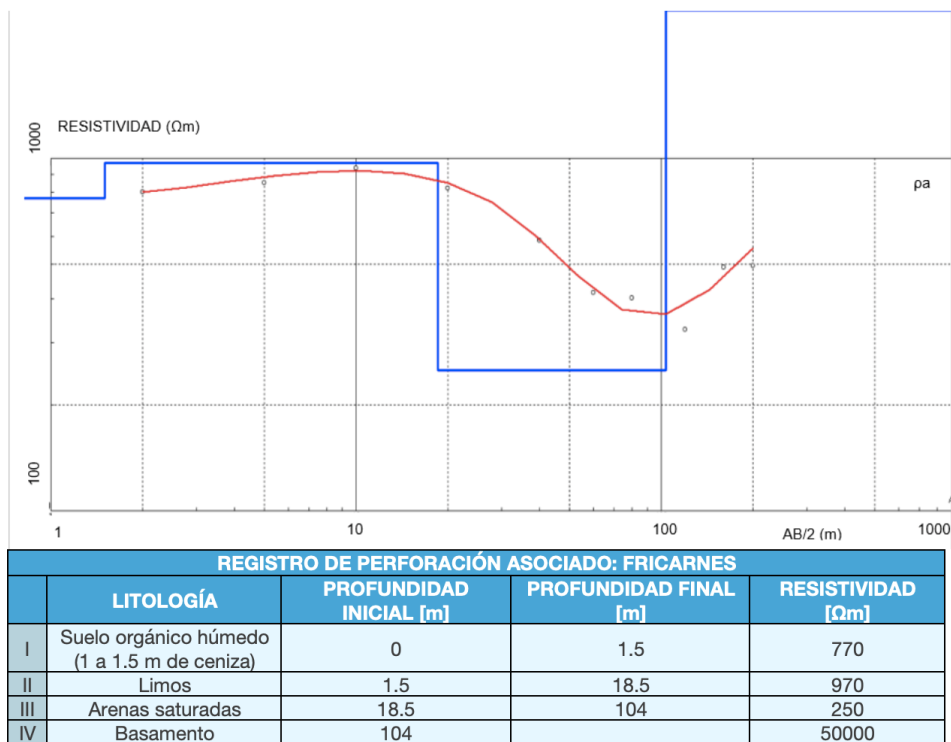


Figura 3. 13. Curva de resistividad aparente del sondeo S216 en superficie de erosión II de Río Negro. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.

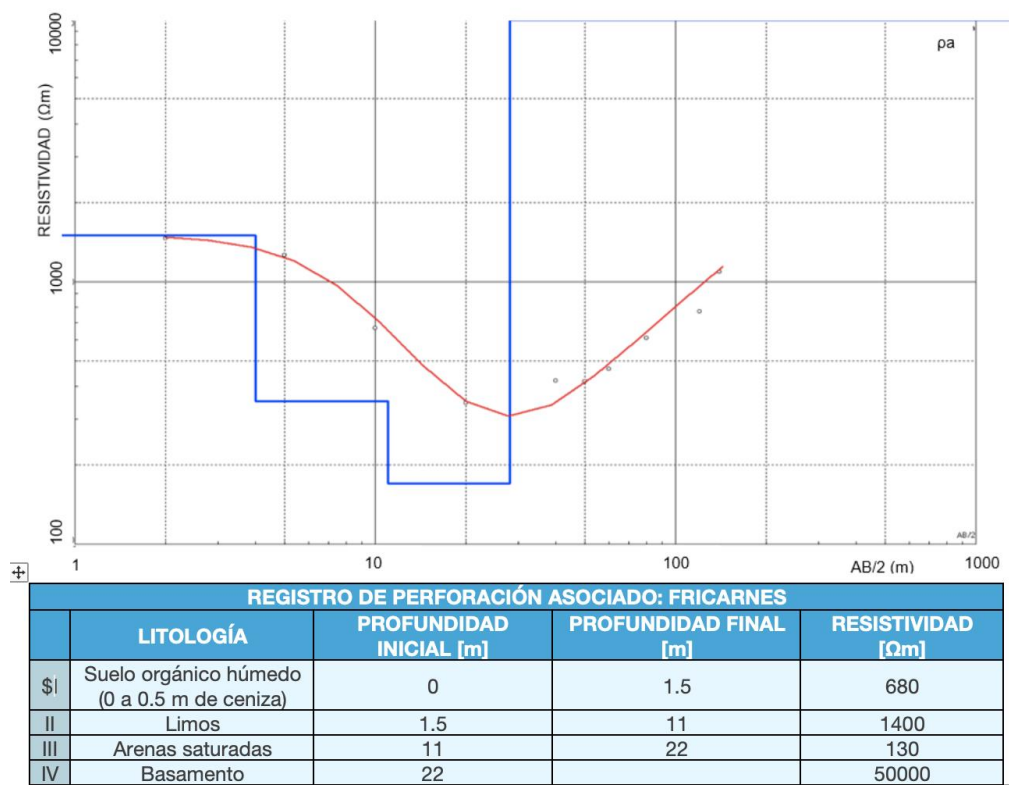


Figura 3. 14. Curva de resistividad aparente del sondeo S233 en superficie de erosión II de Río Negro. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.

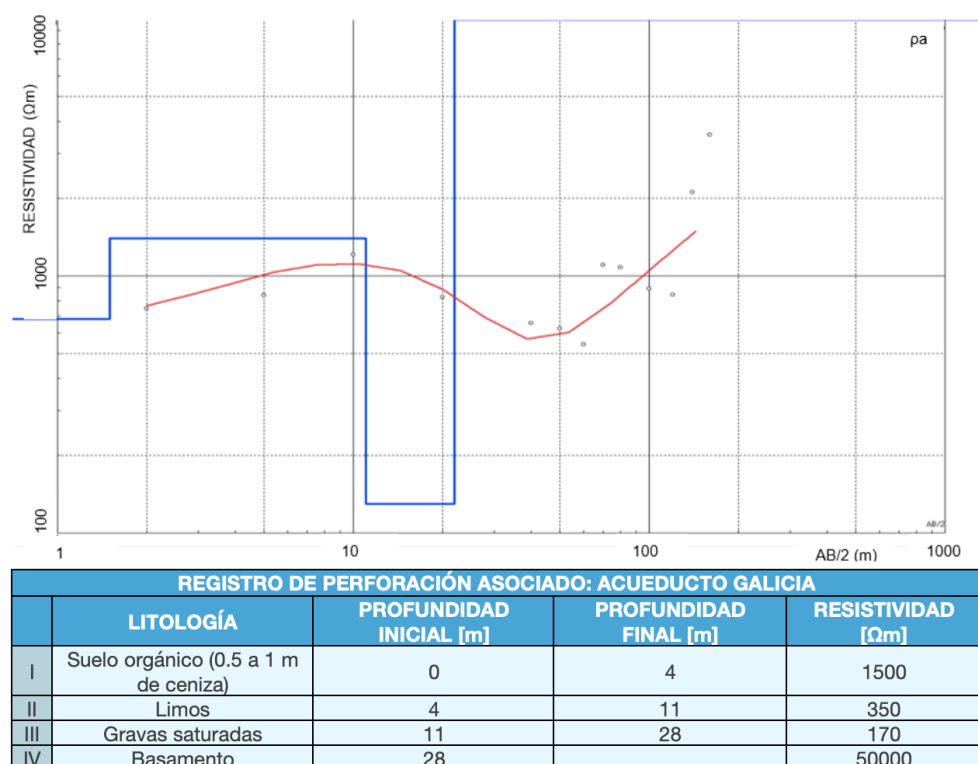


Figura 3. 15. Curva de resistividad aparente del sondeo S244 en superficie de erosión II de Río Negro. Interpretación realizada en el software IPI2WIN. La tabla incluye la interpretación del SEV calibrado estratigráficamente con registro de perforación.

Nivel base y Basamento del Sistema Acuífero

Con la información disponible de registros de perforación y la reinterpretación de los SEV, se propone la existencia de tres acuíferos pertenecientes al Sistema acuífero “Valle de San Nicolás y La Unión” (SM 6.7) definido por el IDEAM (2015). La Figura 3.16 presenta el mapa de la distribución lateral de los acuíferos en el VSN.

El proceso de interpretación de los 109 registros geofísicos (SEV) permitió definir en cada uno de ellos, la base del sistema acuífero, es decir, el nivel inferior cuya litología y/o permeabilidad permiten el flujo y en algunas ocasiones, la acumulación de agua subterránea y permitió definir el basamento (nivel de roca cristalina fresca). Dado que los registros fueron seleccionados con buena distribución espacial, fue posible lograr la interpolación de la información y generar un mapa que representa regionalmente la base del acuífero (Figura 3.17) y el basamento (Figura 3.18). Estos dos mapas, junto con la topografía (DEM) son el insumo del modelo físico, requerido para el modelamiento del flujo subterráneo presentado en el Capítulo 5 del presente libro.

La Figura 3.17 muestra el mapa a la base del sistema acuífero, en este, se evidencia una fuerte dependencia entre los drenajes (escorrentía superficial) con los valores de elevación de la base del sistema acuífero. En las zonas cercanas a los drenajes, se encuentra la base a 2010 msnm, esto en las poblaciones de Rionegro y Marinilla. Dicho valor va aumentando a medida que se aleja a los extremos de la zona de estudio donde la base pasa por valores de 2100 msnm, en las poblaciones de El Carmen de Viboral, El Santuario, La Ceja y San Vicente, hasta llegar al valor máximo de 2330 msnm que se encuentra en El Retiro y Guarne. En otras palabras, el sistema acuífero se hace topográficamente más bajo hacia el centro de la zona de estudio y se hace más alto hacia la periferia.

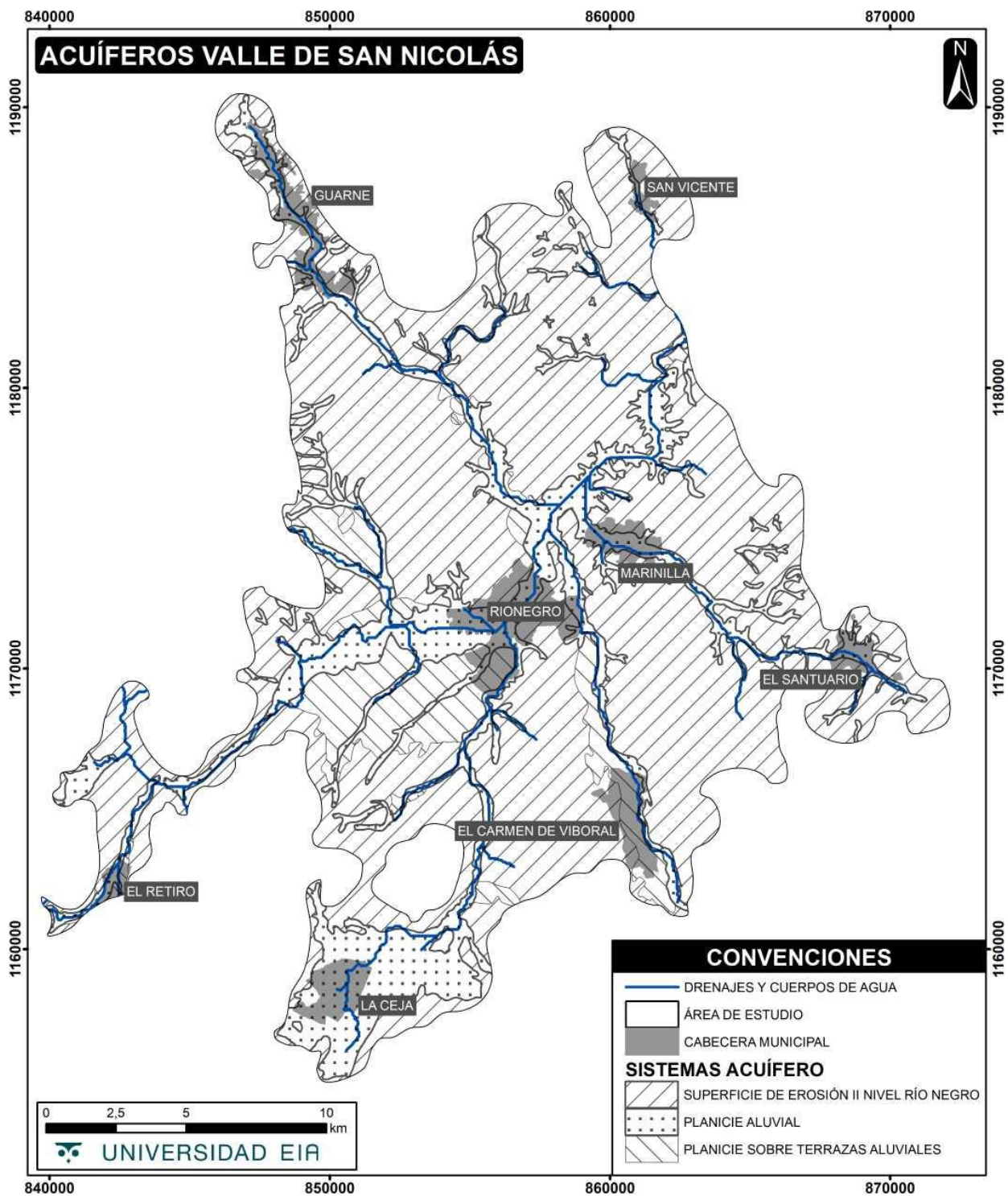


Figura 3. 16. Mapa de distribución lateral de los tres acuíferos. Elaboración propia.

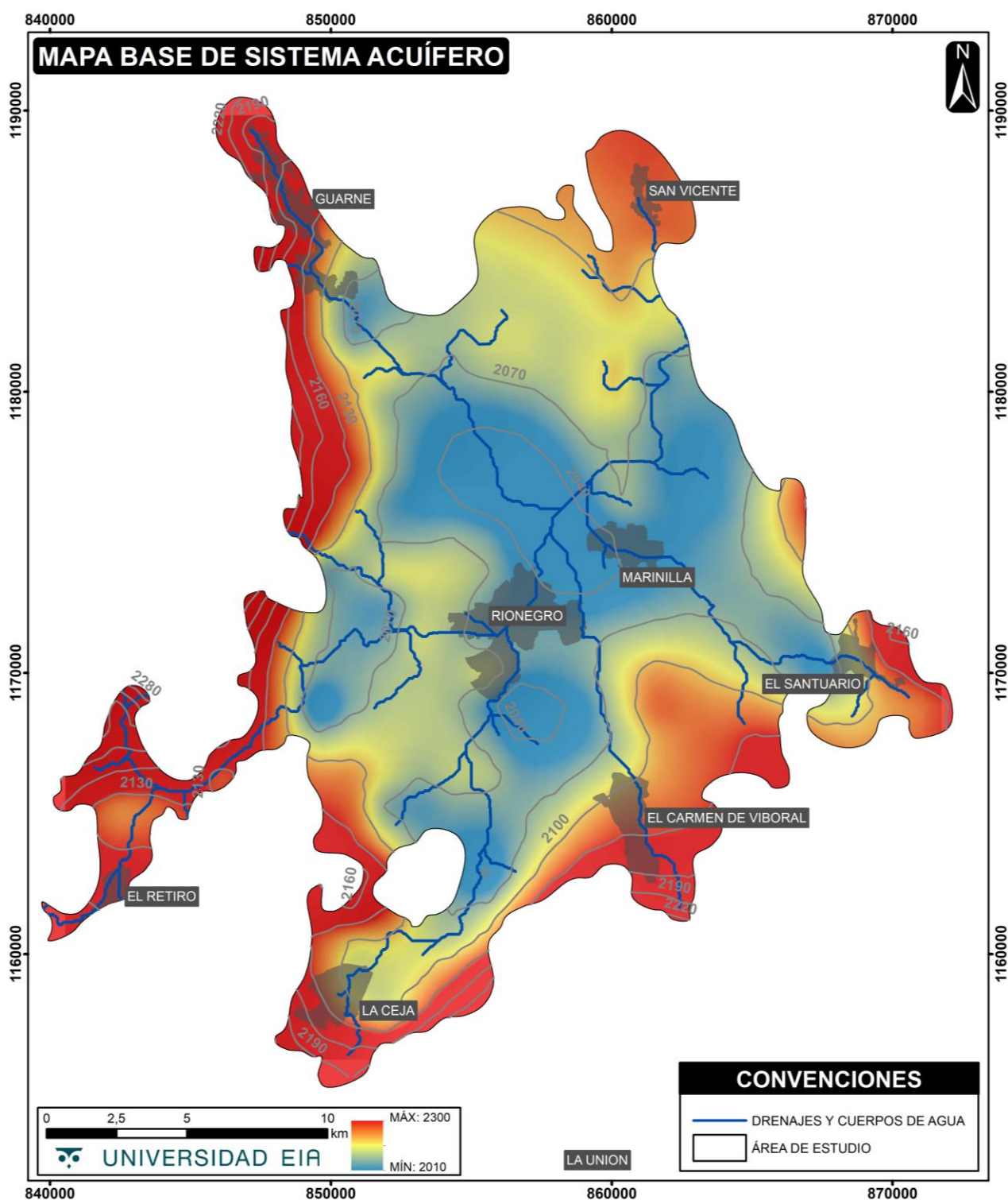


Figura 3. 17. Mapa a la Base [msnm] del sistema acuífero. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptado del IGAC.

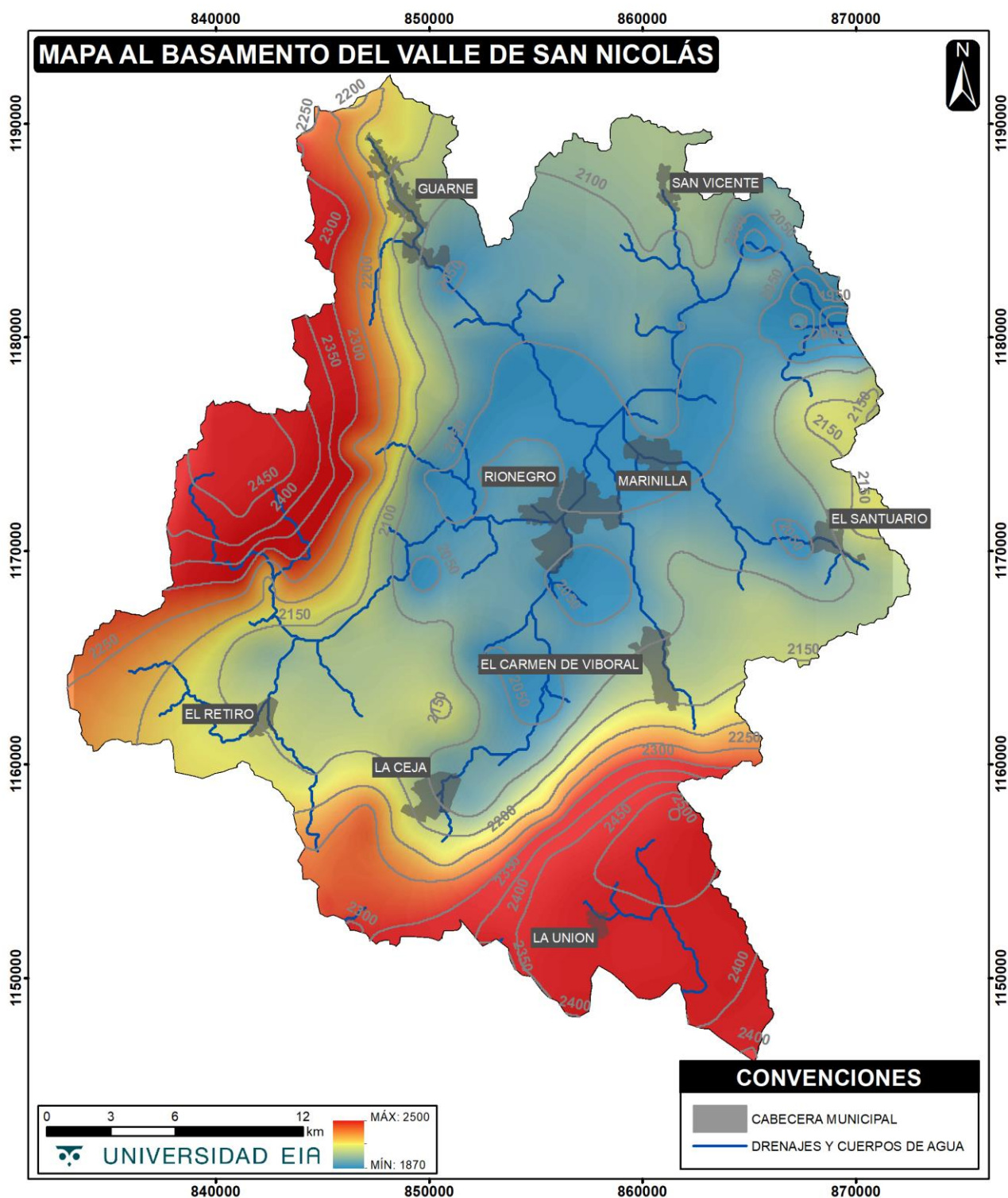


Figura 3. 18. Mapa al Basamento [msnm] del Valle de San Nicolás. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptado del IGAC.

El mapa de la base del acuífero (Figura 3.17) muestra la relación directa que existe entre la base del acuífero con la topografía superficial, pues el Valle de San Nicolás se encuentra topográficamente más bajo en la zona que corresponde al curso de río Negro, quebrada Cimarronas, La Mosca, entre otras, y va aumentando la elevación hacia las partes distales que van limitando el valle.

El basamento geológico interpretado a partir de los sondeos (Figura 3.18), se ubica por debajo de la base del acuífero y también describe un comportamiento similar. En las zonas cercanas a los drenajes se encuentra el basamento a 1900 msnm, esto en las poblaciones de Rionegro y Marinilla, este valor va aumentando a medida que se aleja a los extremos de la zona de estudio donde basamento pasa por valores de 2150 en las poblaciones de El Carmen de Viboral, El Santuario, La Ceja y San Vicente, hasta llegar al valor máximo de 2200 msnm que se encuentra en El Retiro y Guarne. Es decir que el basamento geológico se hace más somero en la periferia del Valle. Esta condición es que la controla principalmente que las áreas de mayor acumulación de sedimentos se concentren hacia el interior del Valle. Es decir que la distribución y profundidad del basamento rocoso en la zona, tiene un efecto importante de control en la distribución de los acuíferos y por lo tanto en el potencial hidrogeológico del VSN.

Como forma entenderla relación lateral y la ocurrencia entre los acuíferos en la zona, se realizó un corte resistivo, horizontal a una cota de 2110 (nivel promedio de profundidad del sistema acuífero). Para esto, se tomó el valor de la resistividad absoluta de los 109 SEV y se hizo una interpolación. El mapa resultado (Figura 3.19) muestra coherencia con la propuesta anteriormente escrita, pues se evidencia que los valores de resistividad en las zonas próximas a los drenajes superficiales, que corresponde a la planicie aluvial, presentan valores de 150 Ωm que se interpreta como una zona saturada por presentar un alto contenido de arenas y gravas permeables, es decir un primer acuífero. Los valores de resistividad para los materiales mencionados esto corroboran el potencial hidrogeológico de esta zona. Seguidamente, el valor de resistividad aumenta progresivamente, para el acuífero asociado con la terraza aluvial, donde se encuentra una media de 700 Ωm . Un tercer acuífero se encuentra en la zona de Superficie de Erosión II, con resistividades del orden de 130 a 170 Ωm . Finalmente la resistividad sigue en aumento para la zona distal del área de estudio y se leen valores de 8000 a 10000 Ωm que corresponden al basamento, siendo esto otra evidencia para proponer la forma de cóncava del basamento que subyace los depósitos aluviales y el sapolito del Valle de San Nicolás.

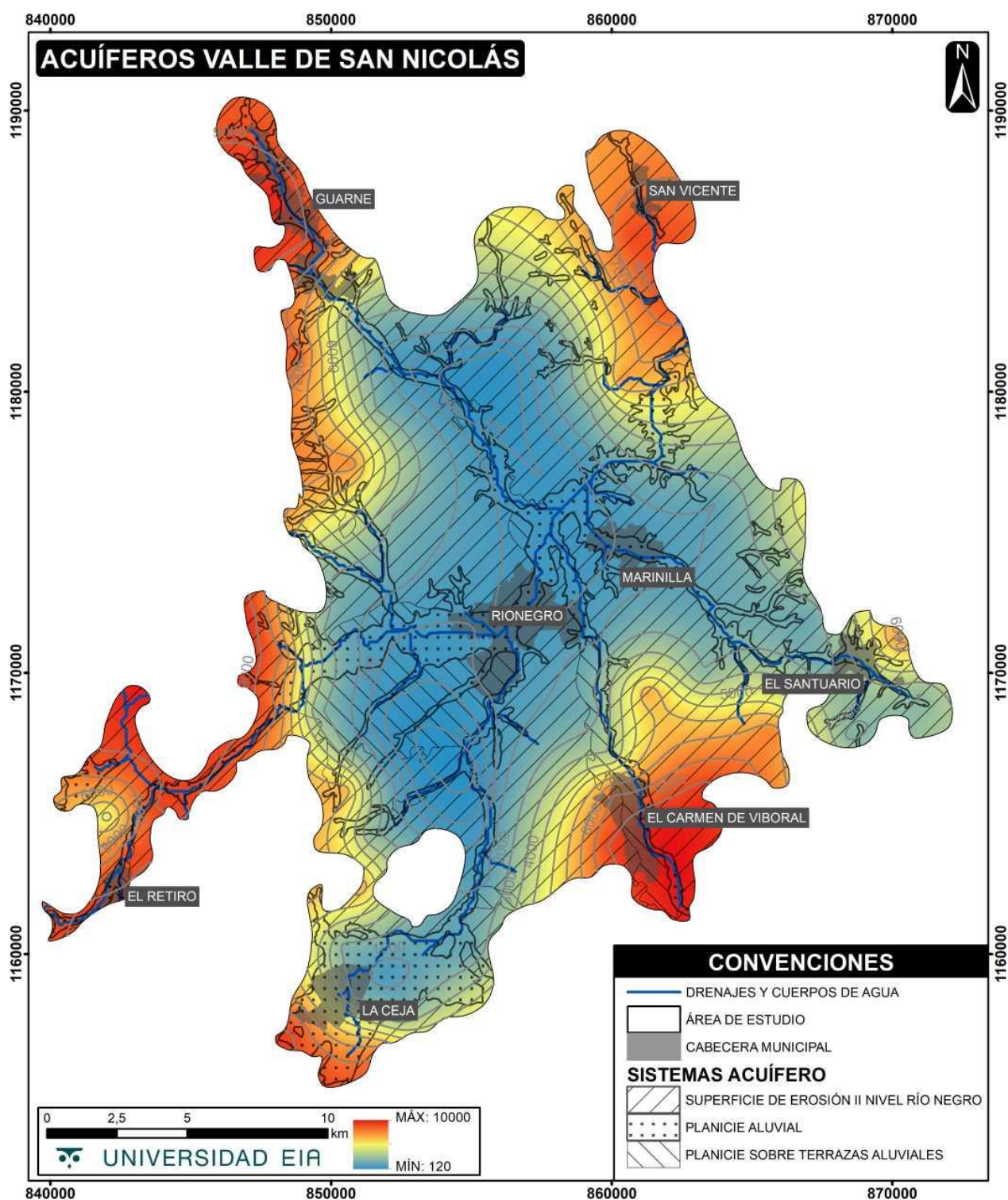


Figura 3. 19. Mapa isorresistivo de los tres acuíferos a la cota de 2110. [msnm]. Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptado del IGAC.

Conclusiones y Discusión

La reinterpretación de SEV junto con la integración de información estratigráfica permitió definir la existencia de tres acuíferos pertenecientes al sistema acuífero “Valle de San Nicolás y la Unión” definido previamente en el 2015 por el Ideam. Este estudio no analizó el valle de la Unión por lo que se desconoce el número de acuíferos presentes en dicho valle.

El acuífero de la planicie aluvial representa el mayor potencial hidrogeológico en el área de estudio ya que la interpretación geoelectrica realizada muestra que la mayoría de los sondeos realizados en esta zona presentan depósitos permeables, principalmente de arenas aluviales, con resistividades entre 60 y 250 Ω m, hasta profundidades del orden de 25 m, donde estos estratos se encuentran saturados y parcialmente saturados.

La planicie sobre terraza aluvial representa también un potencial hidrogeológico importante en la zona de estudio (segundo acuífero), ya que la mayoría de los sondeos eléctricos propone que este horizonte de arenas se encuentra saturado y el saprolito subyacente también saturado o parcialmente saturado, sin embargo, se debe tener en cuenta que la cantidad de limos intercalado en las arenas de este horizonte limita su capacidad de almacenamiento.

El potencial hidrogeológico en la superficie de erosión II de Río Negro (tercer acuífero) es menor que la planicie aluvial y planicie sobre terraza aluvial, pues estratigráficamente se encuentra mayor cantidad de materiales finos que dificulta la acumulación y el tránsito de agua subterránea. Se caracteriza por tener un horizonte de arcillas y limos hasta los 12 m de profundidad, encima de un estrato areno limoso que corresponde al saprolito con un espesor de hasta 30 m, sin embargo, en la mayoría de los sondeos eléctricos se interpreta que el horizonte de saprolito se encuentra saturado y parcialmente saturado.

La base del acuífero de la planicie aluvial se encuentra en promedio a 2060 msnm, siendo esta la parte más baja al igual que el basamento que se interpreta a 1900 msnm, los cuales coinciden con los drenajes principales del valle. En el acuífero de la terraza aluvial se encuentra la base en promedio a 2100 msnm, y el basamento se interpreta a 2200 msnm. La base del acuífero en la superficie de erosión II de río Negro se encuentra en promedio a 2160 msnm, siendo esta topográficamente más alta, al igual que el basamento que se interpreta a 2240 msnm.

El corte a 2110 msnm muestra que los valores de resistividad en las zonas próximas a los drenajes superficiales, que corresponde a la planicie aluvial, muestra un valor de 150 Ω m que se interpreta como una zona saturada por presentar un alto contenido de arenas y gravas permeables; este valor aumenta para la zona de la planicie sobre terraza aluvial donde se encuentra una media de 700 Ω m que sigue en aumento para la zona distal del área de estudio y se leen valores de 8000 a 10000 Ω m que corresponden al basamento.

Todos los SEV analizados para los tres acuíferos presentan un comportamiento de incremento resistivo con la profundidad, lo que se interpreta como el basamento (roca impermeable) y lo que define el límite inferior del sistema acuífero, es decir el límite inferior del flujo subterráneo de agua.

La interpretación de los sondeos eléctricos realizada por la Universidad Nacional de Colombia & CORNARE (2000) propone un acuífero salobre en las fracturas de los primeros metros del basamento, sin embargo, a la luz de la interpretación de este

proyecto, dicha hipótesis no puede ser evaluada con la información hasta ahora disponible, puesto que se considera que los datos de campo no logran revelar información a esa profundidad, sin embargo, se propone esta pregunta para una investigación para ejecutar en un proyecto futuro.

Referencias

- Arias, D. (2011). Exploración geotécnica - relaciones geoelectricas. Medellín. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/5468/1/71790053.2011.pdf>
- Jha, M. K., Kumar, S., & Chowdhury, A. (2008). Vertical electrical sounding survey and resistivity inversion using genetic algorithm optimization technique. *Journal of Hydrology*, 359(1–2), 71–87. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2008.06.018>
- Shamsuddin, N., & Sankar, K. (2001). GIS Integration of Remote Sensing and Electrical Sounding Data for Hydrogeological Exploration. *Journal of Spatial Hydrology* (Vol. 2). Ashok Verma. Retrieved from <http://www.hydromap.com/josh/index.php/JOSH/article/view/5/4>
- Universidad Nacional de Colombia, & CORNARE. (1997). Evaluación hidrogeológica preliminar para los municipios de: El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmén, Guarne y Marinilla. Medellín.
- Universidad Nacional de Colombia, & CORNARE. (2000). Investigación de aguas subterráneas región Valles de San Nicolás. Fase II. Medellín.

Recarga de acuíferos

Recarga Potencial

Introducción

La recarga es el proceso por el cual una reserva de agua subterránea se abastece de agua procedente del entorno que lo limita; dicha entrada de agua puede provenir de la infiltración de agua lluvia, de corrientes superficiales o de unidades hidrogeológicas adyacentes (Palacio & Betancur, 2007). Según Jaramillo (2003) esta entrada se da de dos maneras: la primera, por un movimiento descendente del agua debido a la fuerza de gravedad; y la segunda, por la entrada de agua al acuífero luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Ruíz & Martínez, 2015).

La recarga se puede determinar por los siguientes métodos: mediciones directas usando un lisímetro, por balance hídrico determinando los flujos de entrada y salida, por balance de masa de trazadores, a través de aproximaciones de Darcy a partir de las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq, y vía métodos empíricos (Victoria, Otálvaro, María, & Ariza, 2004). Por definición de la recarga se hace referencia comúnmente a dos elementos: la identificación de fuentes y áreas de recarga, y la cuantificación de ésta, la cual se logra normalmente a través de un balance hídrico.

Marco Conceptual

El balance hídrico consiste en la aplicación del principio de conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de frontera durante un determinado período de tiempo (Carbajo, 2015). La diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua, el cual se obtiene como el residual de otros flujos involucrados en el balance, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Recarga} = \text{Precipitación} - \text{Escorrentía } (\Delta \text{ flujo base}) - \text{Evapotranspiración}$$

A partir de esta ecuación, debe procurarse estimar las variables que, una vez resueltas, permitan calcularla.

Precipitación

Las formas de precipitación incluyen lluvia, agua-nieve, nieve, granizo y llovizna, además de algunos menos comunes, como bolitas de hielo, polvo de diamante y lluvia helada. La

precipitación se forma dentro de las nubes de varias maneras: gotas de agua o cristales de hielo que chocan entre sí, o que aumentan de tamaño a medida que el agua se condensa fuera del aire en una gota (Met Office, 2018).

Según Parraguez Becker (2017) para que se originen precipitaciones son necesarias las siguientes condiciones:

- Ascenso de masas de aire húmedo y su enfriamiento.
- Condensación de vapor de agua y formación de nubes.
- Fuerte concentración de humedad.
- Crecimiento de gotitas de agua en la nube.
- Evapotranspiración

Se denomina evapotranspiración al conjunto de pérdidas de agua que se generan por evaporación y transpiración, siendo esta última las que corresponden al proceso biológico mediante el cual las plantas eliminan el agua utilizada en su metabolismo a través de las hojas (Schosinsky, 2006).

La transpiración está influenciada por los mismos factores que afectan la evaporación. Sin embargo, existen también factores biológicos, condicionados por la meteorología, que contribuyen a aumentar o disminuir la transpiración. La cantidad de luz, la temperatura ambiental y la humedad atmosférica son factores que controlan la apertura de los estomas desde donde se libera el agua que es transpirada (Uribe, Arumí, González, & Salgado, 2015).

Para la construcción de los mapas mensuales de evapotranspiración potencial (ETP) se recomienda emplear la ecuación de Turc Modificado (1962), en la cual ETP depende de la temperatura, la radiación solar incidente y la humedad relativa, según la siguiente expresión:

$$ETP = K * \left(\frac{T}{T + 15} \right) (R_g + 50); \text{ para } R_H > 50\%,$$

donde ETP se expresa en mm/mes, K es una constante igual a 0.40 para meses de 30 y 31 días, e igual a 0.37 para el mes de febrero, T es la temperatura media mensual del aire expresada en °C, y R_g es la radiación solar incidente del mes de interés expresada en cal/cm²/día.

Sin embargo, en la implementación del balance hídrico para el cálculo de la recarga potencial se requiere la lámina de evapotranspiración real, la cual se calcula con la ecuación de Budyko (1974):

$$ETR = \left\{ ETP * P * \tanh \left(\frac{P}{ETP} \right) \left[1 - \cosh \left(\frac{ETP}{P} \right) + \sinh \left(\frac{ETP}{P} \right) \right] \right\}^{1/2},$$

donde ETR representa la evapotranspiración real, ETP la evapotranspiración potencial y P la precipitación media anual sobre toda la cuenca hidrográfica, todas éstas expresadas en mm/año.

Escorrentía

El control de la fluviometría de una cuenca es una tarea hidrológica relevante, ya que además de permitir evaluar los recursos hídricos superficiales, permite determinar la magnitud de la infiltración que se genera desde los cursos de escurrimiento superficial hacia los sistemas subterráneos (Becerra, 1999).

Es importante señalar que, usualmente, la principal fuente de recarga de los acuíferos de una cuenca proviene de la infiltración que se produce desde los cursos de escurrimiento superficial.

Datos y métodos

Para evaluar la recarga en los acuíferos se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones: en primer lugar, establecer la cantidad de agua que puede recibir el acuífero (a partir del cual se llena) y las cantidades adicionales de agua que deben salir como escorrentía; también se debe considerar la capacidad que tiene la zona no saturada del subsuelo para transmitir agua. La magnitud de la recarga potencial se obtiene de un balance hídrico en la cuenca de acuerdo con estos planteamientos (Misstear, Brown, & Daly, 2009).

Se realiza entonces el balance hídrico considerando el principio de conservación de masa a un volumen de control, en este caso en la subcuenca del río Negro y Pantanillo. Es decir, en un periodo de tiempo dado se establece la diferencia entre las entradas (precipitación) y salidas (evapotranspiración y escorrentía) del sistema, la cual representa el cambio en la cantidad de agua almacenada en el suelo.

La aplicación del balance hídrico para la estimación de la recarga potencial se llevó a cabo para los siguientes tres escenarios:

- Escenario promedio: procesa los datos disponibles de cada variable involucrada en el balance hídrico con ventana temporal entre 1948 y 2015. Este escenario representa la recarga potencial a largo plazo.
- Escenario El Niño: procesa los datos de cada variable involucrada en el balance hídrico para el período extremo 1997-1998. Este escenario representa una época de sequía y de altas temperaturas.
- Escenario La Niña: procesa los datos de cada variable involucrada en el balance hídrico para el período inusual 1988-1989. Este escenario extremo representa una época de bajas temperaturas.

Precipitación

El cálculo de la precipitación se realiza con los datos de 20 estaciones meteorológicas proporcionadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y por las Empresas Públicas de Medellín (EPM) para uso exclusivo de este proyecto. La ubicación espacial de estas estaciones se muestra en la Figura 4.1. Las estaciones proveen registros de lámina diaria de precipitación; sin embargo, se tiene un porcentaje de datos faltantes que genera incertidumbre en el cálculo de esta (Tabla 4.1).

Además, los datos de las estaciones meteorológicas se encuentran en diferentes ventanas temporales, algunas de ellas no operan en la actualidad y también empezaron su registro en años diferentes. Por lo tanto, se tienen periodos de registros desde 8 hasta 50 años para las diferentes estaciones empleadas.

En primer lugar, se creó un código de programación en la herramienta Python, escrito por la auxiliar de investigación Carolina Castaño, con el fin de acumular los valores de precipitación diarios de cada estación y obtener la precipitación mensual en cada año de registro.

Luego se calculó la precipitación mensual multianual a partir del promedio de los milímetros de lluvia acumulados en el paso anterior. Para esto también se empleó un código de Python, con el fin de agilizar el proceso.

La precipitación mensual multianual posteriormente fue empleada en el cálculo de la evapotranspiración real mensual. Se calculó además la precipitación anual con la acumulación de los datos mensuales multianuales para el escenario promedio que empleaba toda la ventana temporal disponible de registro.

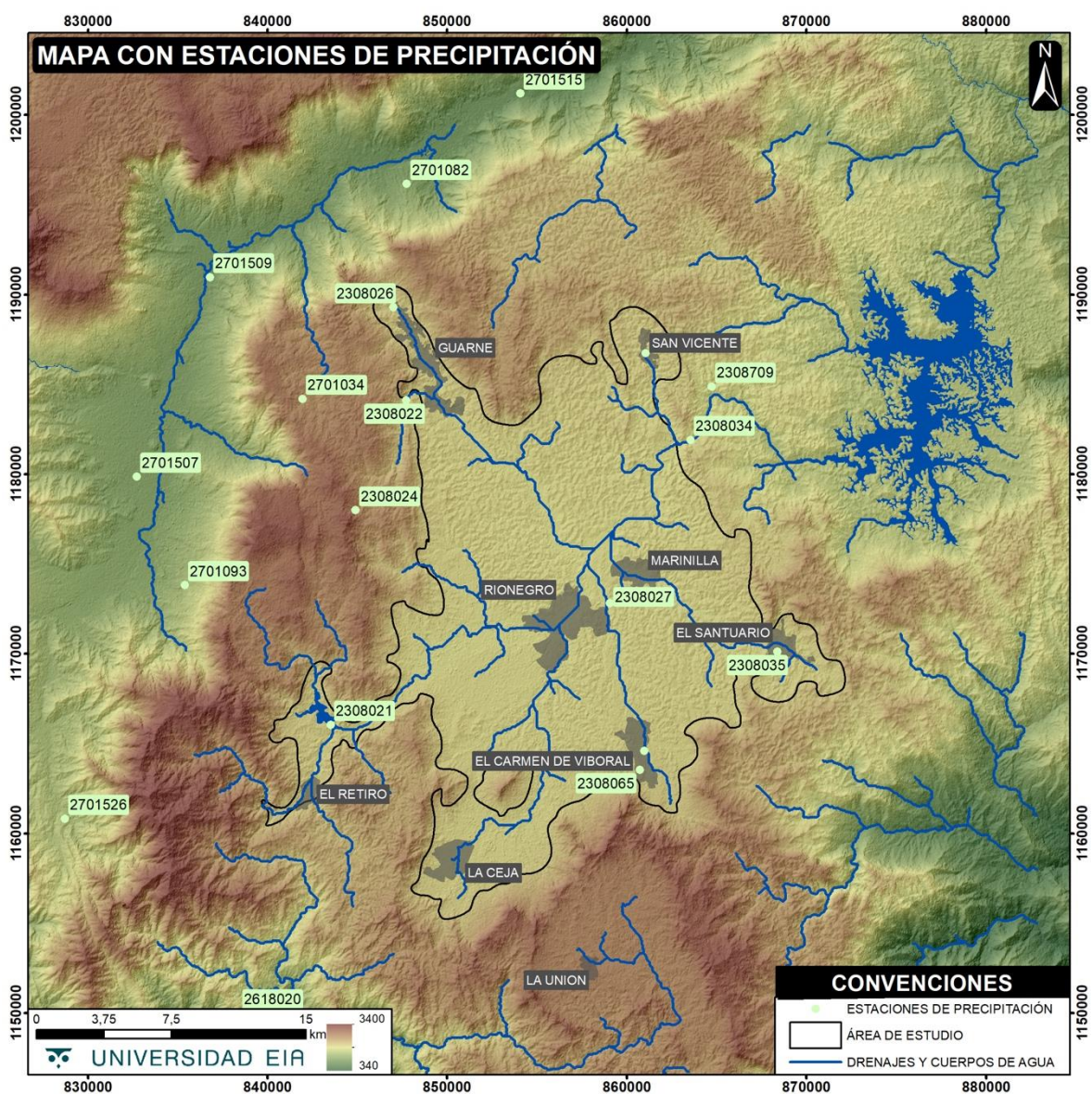


Figura 4. 1. Estaciones con registros de precipitación (IDEAM y EPM . Elaboración propia, imagen de fondo DEM (satélite ALOS PALSAR) e información base adaptada del IGAC.

Tabla 4. 1. Estaciones de precipitación del escenario promedio. Elaboración propia.

ID ESTACIÓN	NOMBRE	FUENTE	INICIO	FINAL	DATOS FALTANTES
2701509	Tulio Ospina	IDEAM	1974	2015	3,2%
2701082	La Cuchilla	IDEAM	1974	2015	3,1%
2701515	Hda. El Progreso	IDEAM	1974	2015	3,7%
2701507	A. Olaya Herrera	IDEAM	1974	2015	3,0%
2618017	La Unión	IDEAM	1974	2015	2,6%
2308039	Sto. Domingo	IDEAM	1974	2015	2,7%
2701526	La Salada	IDEAM	1974	2015	2,9%

2308065	Campoalegre	IDEAM	1974	2015	2,9%
2618020	Montebello	IDEAM	1974	2015	4,2%
2308021	La Fe	EPM	1948	1998	2,9%
2308022	La Severa	EPM	1948	1988	2,7%
2308023	Las Palmas	EPM	1948	2004	2,8%
2308024	Vasconia	EPM	1948	1988	3,1%
2308026	La Mosca	EPM	1949	1999	3,6%
2308027	Rionegro	EPM	1950	1998	3,7%
2308034	Rioabajo	EPM	1959	1999	3,4%
2701035	Chorrillos	EPM	1948	2004	2,8%
2701034	Mazo	EPM	1970	2003	2,8%
2701093	Ayurá	EPM	1972	2004	3,0%
2701122	Convento	EPM	1995	2003	4,1%
2308030	El Carmen	EPM	1959	2017	4,1%
2308038	San Vicente	EPM	1959	2017	2,6%
2308035	Santuario	EPM	1959	2017	3,8%
2308709	Rioabajo	EPM	1959	2017	3,5%

A partir de la precipitación anual para el escenario promedio en cada una de las estaciones se realizó una interpolación tipo Kriging con la herramienta Geostatistical Wizard de ArcGIS®. En la Tabla 4.2 se resumen los respectivos parámetros.

Tabla 4. 2. Parámetros de interpolación para precipitación del escenario promedio. Elaboración propia.

INTERPOLACIÓN KRIGING	
Tipo	Simple
Modelo	Circular
Optimizado	Sí
Tamaño LAG	4000
# LAG	12
Factor Suavizado	0.2
Tamaño Celda [m]	2000

Para el cálculo de la precipitación bajo el escenario El Niño se emplearon las 20 estaciones que se presentan en la Tabla 4.3. Los correspondientes registros faltantes se relacionan en la columna del extremo derecho.

Se realiza el mismo procedimiento mencionado anteriormente, pero tan sólo para los registros de los años 1997 y 1998, durante los cuales la fase cálida del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur alcanzó una de las condiciones más severas observadas en la historia de registros. Las condiciones climáticas que caracterizan este escenario están asociadas a una época de sequía.

Para esto se tomó la precipitación mensual de estos dos años, previamente calculada en el procedimiento del escenario promedio, y se cuantificó la precipitación mensual bianual, que también se acumuló para obtener la precipitación anual con los registros de los dos años de interés para cada una de las estaciones del área de estudio.

Tabla 4. 3. Estaciones de precipitación del escenario El Niño. Elaboración propia.

ID ESTACIÓN	NOMBRE	FUENTE	DATOS FALTANTES
2701509	Tulio Ospina	IDEAM	1,4%
2701082	La Cuchilla	IDEAM	2,9%
2701515	Hda. El Progreso	IDEAM	1,9%
2701507	A. Olaya Herrera	IDEAM	4,4%
2618017	La Unión	IDEAM	0,2%
2308039	Sto. Domingo	IDEAM	2,2%
2701526	La Salada	IDEAM	3,6%
2308065	Campoalegre	IDEAM	2,5%
2618020	Montebello	IDEAM	1,5%
2308021	La Fe	EPM	0,9%
2308022	La Severa	EPM	0,3%
2308023	Las Palmas	EPM	3,0%
2308024	Vasconia	EPM	3,8%
2308026	La Mosca	EPM	3,8%
2308027	Rionegro	EPM	3,4%
2308034	Rioabajo	EPM	4,8%
2701035	Chorrillos	EPM	4,5%
2701034	Mazo	EPM	3,4%
2701093	Ayurá	EPM	2,8%
2701122	Convento	EPM	4,8%
2308030	El Carmen	EPM	2,6%
2308038	San Vicente	EPM	4,6%
2308035	Santuario	EPM	0,1%
2308709	Rioabajo	EPM	4,7%

Al igual que en el caso anterior, con los datos de precipitación anual para el escenario El Niño para cada una de las estaciones se realiza una interpolación tipo Kriging. Los parámetros respectivos se presentan en la Tabla 4.2.

Para el escenario La Niña se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente. Las estaciones utilizadas se presentan en la Tabla 4.4 y los parámetros de interpolación en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 4. Estaciones de precipitación del escenario La Niña. Elaboración propia.

ID ESTACIÓN	NOMBRE	FUENTE	DATOS FALTANTES
2701509	Tulio Ospina	IDEAM	1,6%
2701082	La Cuchilla	IDEAM	3,9%
2701515	Hda. El Progreso	IDEAM	4,0%
2701507	A. Olaya Herrera	IDEAM	5,6%
2618017	La Unión	IDEAM	4,4%
2308039	Sto. Domingo	IDEAM	3,1%
2701526	La Salada	IDEAM	3,3%
2308065	Campoalegre	IDEAM	4,7%
2618020	Montebello	IDEAM	1,2%
2308021	La Fe	EPM	4,8%
2308022	La Severa	EPM	2,3%
2308023	Las Palmas	EPM	1,1%
2308024	Vasconia	EPM	5,8%
2308026	La Mosca	EPM	1,8%
2308027	Rionegro	EPM	4,5%
2308034	Rioabajo	EPM	4,8%
2701035	Chorrillos	EPM	3,8%
2701034	Mazo	EPM	4,0%
2701093	Ayurá	EPM	4,9%
2308030	El Carmen	EPM	4,4%
2308038	San Vicente	EPM	2,7%
2308035	Santuario	EPM	4,0%
2308709	Rioabajo	EPM	1,3%

Evapotranspiración

Según la ecuación de Budyko, la evapotranspiración real depende de cuatro variables: temperatura, insolación, evapotranspiración potencial y precipitación.

Para el cálculo de la temperatura se asume una dependencia lineal de la temperatura media con la altura. Se analizaron los registros de temperatura media mensual disponibles en las 9 estaciones que se presentan en la Tabla 4.5. Estos registros están disponibles en escala diaria para el horizonte 1978-2015, y fueron tomados de la base de datos del IDEAM.

Tabla 4. 5. Estaciones de temperatura. Elaboración propia.

ID ESTACIÓN	NOMBRE
2308511	El Peñol
2308514	San Francisco
2308516	Corrientes
2308520	A. José María Córdova
2617504	Hda. Túnez
2618502	Mesopotamia
2701507	A. Olaya Herrera
2701509	Tulio Ospina
2701526	La Salada

En primer lugar, se promediaron los registros de temperatura mensual de cada año para obtener la temperatura mensual multianual, empleado en el escenario promedio. Se escogieron los registros de 1997 y 1998 para el escenario El Niño y, por último, se seleccionaron los datos de los años 1988 y 1989 para el escenario La Niña.

Teniendo los valores de temperatura mensual multianual y la cota de cada estación, se ajustó una regresión lineal y se obtuvieron las ecuaciones de la temperatura para cada mes, para cada uno de los escenarios por separado.

A partir de estas ecuaciones lineales se realizó un álgebra de mapas en ArcGIS® con el valor de la altura del modelo de elevación digital corregido.

La insolación se obtuvo a partir de los datos mensuales registrados en la estación del IDEAM “La Selva”, la cual es la única estación disponible de la zona en estudio. Por lo tanto, se asumieron estos valores iguales para toda la extensión de la cuenca y también para todos los escenarios.

Teniendo en cuenta que la humedad relativa es mayor al 50% en la zona de estudio, se empleó la ecuación de Turc Modificado (1962) a partir de la temperatura y la insolación. Para esto se realizó un álgebra de mapas en ArcGIS® con los datos mensuales multianuales, lo cual permitió obtener la evapotranspiración potencial mensual para los escenarios promedio, El Niño y La Niña.

Finalmente, se tomó este último valor y con la precipitación anual multianual previamente calculada se obtuvo el valor de la evapotranspiración real mensual multianual con la

ecuación de Budyko (1974) para los tres escenarios, datos que posteriormente se suman y permiten cuantificar la evapotranspiración real anual.

Escorrentía

Esta variable se obtuvo a partir del registro de la estación Río Abajo proporcionada por EPM. Este punto cierra toda la cuenta del río Negro y Pantanillo. Se emplearon las herramientas de hidrología en ArcGIS® que permiten a partir de un punto definir la red de drenaje y la topografía del área estudio, y obtener la cuenta asociada a la estación de medición.

Los datos proporcionados se encontraban en escala diaria desde 1984 hasta 2015. Por lo tanto, se realiza un promedio para calcular el caudal anual de toda la ventana temporal para el escenario promedio. Para los escenarios El Niño y La Niña sólo se toman los datos de los períodos 1997-1998 y 1988-1989, respectivamente.

Con el fin de permitir el posterior cálculo de la recarga, se realiza un ráster con celdas de 2000 metros; es decir, la misma resolución de los datos de precipitación y evapotranspiración real. Posteriormente se calcula el número de celdas que tiene la cuenca calculada anteriormente para encontrar el área final.

Al valor de caudal obtenido con el procesamiento de los registros de la estación Río Abajo se le divide el área de drenaje de la cuenca, para obtener la lámina de escorrentía anual (uniformemente distribuida en toda el área de drenaje y expresada en milímetros) para los tres escenarios considerados.

Finalmente, el cálculo de la recarga se realiza en un álgebra de mapas tipo ráster en el cual se procesa el valor de cada variable celda a celda, en principio se toma el valor de la precipitación anual multianual, a esto se le resta la evapotranspiración real anual multianual y también la lámina de escorrentía anual multianual.

El resultado final es el ráster para toda la extensión de la cuenca Río Abajo, en el que cada celda muestra el valor de la recarga potencial calculada a partir del balance hídrico.

Resultados y discusión

Precipitación

En los tres escenarios de estudio se valida una estrecha relación entre la precipitación y la topografía. El escenario promedio (ver Figura 4.2) muestra una variación entre 1400 y 3200 milímetros de columna de agua. La distribución del ráster refleja una disminución de la precipitación anual multianual en la zona oeste de la cuenca que corresponde al Valle de Aburrá.

En la zona del Valle de San Nicolás se marca un aumento de la lámina al este de la cuenca hidrográfica, que corresponde a los municipios de El Carmen de Viboral y El Santuario.

Igualmente, se observa un incremento en la precipitación hacia el extremo norte, en el entorno del municipio de San Vicente. Los valores bajos se observan en Guarne, Marinilla, noreste de Rionegro, La Ceja y norte de El Retiro; al sur de este último municipio se marca un aumento en el valor de la precipitación.

Los meses de abril, mayo, septiembre y octubre presentan los mayores valores de precipitación con una media de 200 mm aproximadamente, mientras que en diciembre, enero y febrero se encuentran los valores más bajos, los cuales no exceden 100 mm para el escenario promedio.

El escenario El Niño (Figura 4.3) muestra una disminución importante en la precipitación anual bianual; la lámina correspondiente varía entre 1200 y 3000 milímetros. Sin embargo, también se puede interpretar la dependencia con la topografía pues es marcada la disminución de la variable en el Valle de Aburrá en comparación con la zona del altiplano.

Los municipios de Rionegro, Guarne, El Retiro y La Ceja cuentan con los valores más bajos de precipitación. Esto corresponde a la zona oeste y central de la cuenca, mientras que al este se encuentran los valores más altos, correspondientes a San Vicente, Marinilla, El Santuario y El Carmen de Viboral.

El escenario La Niña (Figura 4.4), por el contrario, presenta un aumento de la variable significativo pues varía entre 1800 y 3800 milímetros de columna de agua al año. Al igual que el escenario promedio y El Niño, se nota la dependencia entre la precipitación y la altura. Adicionalmente, es importante resaltar que la distribución de la precipitación en toda el área se asimila en gran medida al escenario El Niño, ya que los municipios de Rionegro, Guarne, El Retiro y La Ceja cuentan con los valores más bajos de precipitación, mientras que al este se encuentran los valores más altos, correspondientes a San Vicente, Marinilla, El Santuario y El Carmen de Viboral.

Analizando los escenarios entre sí se encuentra una gran coherencia en cuanto a la distribución de la precipitación en la zona de estudio. Los valores del escenario promedio se encuentran generalmente por debajo del escenario La Niña y por encima del escenario El Niño.

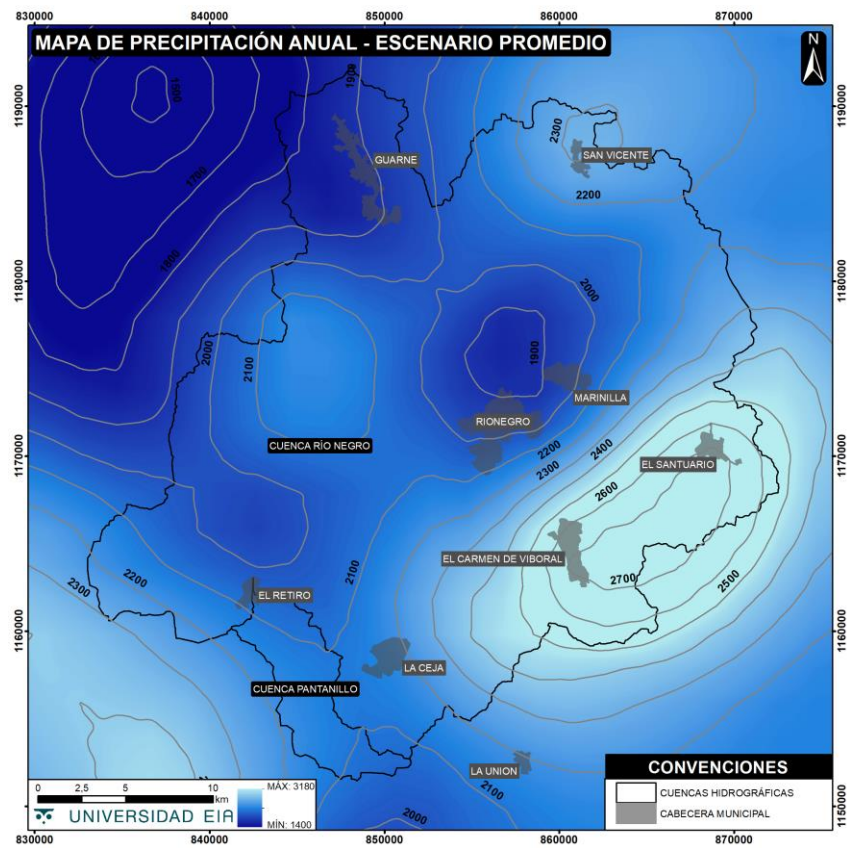


Figura 4. 2. Mapa de precipitación anual [mm/año] para el escenario promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.

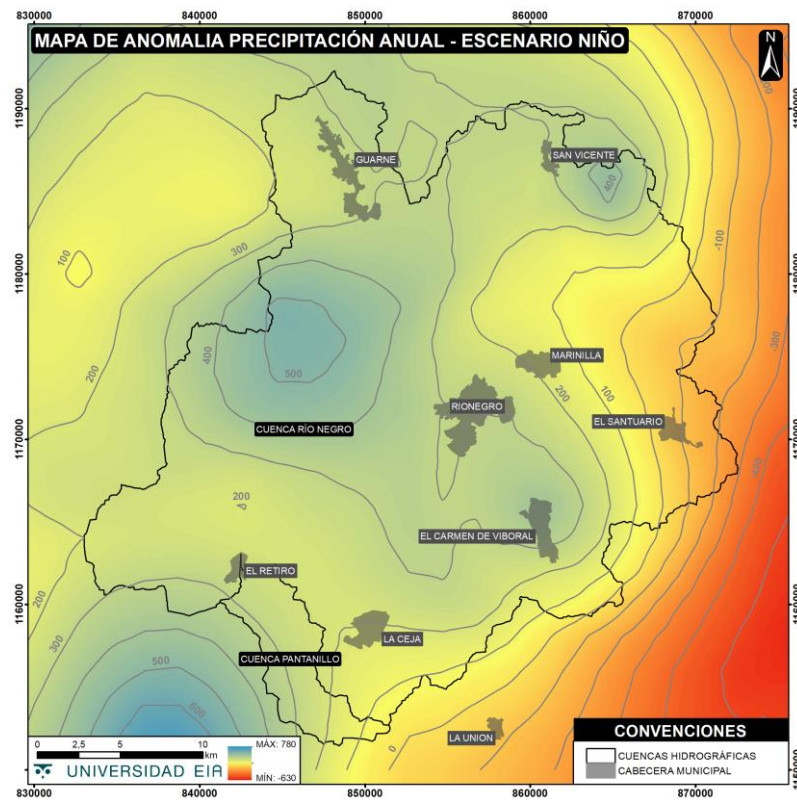


Figura 4. 3. Mapa de anomalía de precipitación anual [mm/año] para el escenario El Niño con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.

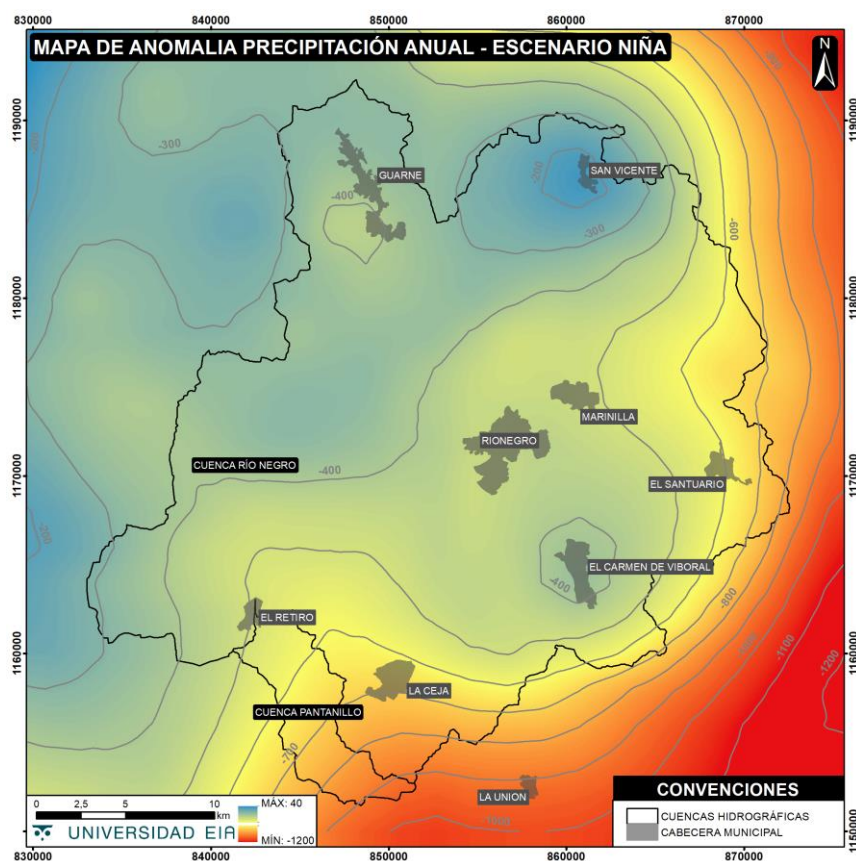


Figura 4. 4. Mapa de anomalía de precipitación anual [mm/año] para el escenario La Niña con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.

Evapotranspiración

El rango de variación de la temperatura es entre 11 y 26°C. Sin embargo, el valor medio de la temperatura en toda la cuenca es mayor en el escenario El Niño y menor en el escenario La Niña. Adicionalmente, no se encuentra un cambio característico en la temperatura mes a mes.

Debido a la dependencia lineal entre la temperatura y la altura, se obtienen los mayores valores en la zona del Valle de Aburrá y en el sur de El Carmen de Viboral, mientras que en los otros municipios del Valle de San Nicolás se encuentran los valores más bajos de temperatura, y su distribución no cuenta con grandes variaciones, esto para los tres escenarios en consideración.

La insolación cuenta con los valores más bajos en los meses de enero y febrero con aproximadamente 320 W/m². En los meses de abril y mayo, y entre octubre y diciembre se observan registros de 360 W/m². En septiembre y mayo la insolación es del orden de 390 W/m²; y finalmente los valores más altos de radiación se dan de junio a agosto y alcanzan 430 W/m².

Los mayores valores de ETP (aproximadamente 120 mm/mes) se obtienen en la zona del Valle de Aburrá y en el sur de El Carmen de Viboral, mientras que en los otros municipios del Valle de San Nicolás se encuentran los valores más bajos (70 mm/mes).

La evapotranspiración potencial exhibe valores aproximadamente constantes a lo largo del año. El valor medio anual en toda la cuenca es mayor en el escenario El Niño (1105 mm/año), menor en el escenario La Niña (1080 mm/año) y en el escenario promedio el valor medio es de 1100 mm/año.

La evapotranspiración real no presenta grandes variaciones entre los escenarios propuestos. En general, los municipios de Rionegro, Guarne, El Retiro y La Ceja cuentan con los valores más bajos de ETR (800 mm/año); esto corresponde a la zona oeste y central de la cuenca, mientras que al este se encuentran los valores más altos (1200 mm/año), correspondientes a San Vicente, Marinilla, El Santuario y El Carmen de Viboral.

El valor medio de la evapotranspiración real para el escenario promedio (Figura 4.5) es de 950 mm/año. En el escenario El Niño (ver Figura 4.6) ETR disminuye el valor a 930 mm/año. En el escenario La Niña, este valor aumenta a 970 mm/año (ver Figura 4.7).

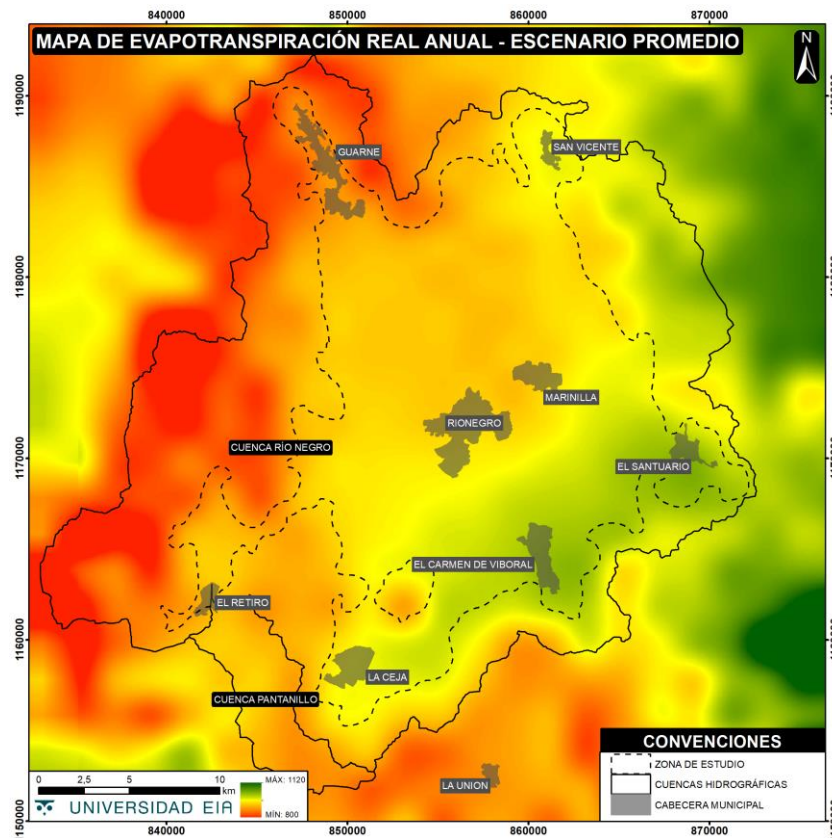


Figura 4. 5. Mapa de evapotranspiración real anual [mm/año] para el escenario promedio.
Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.

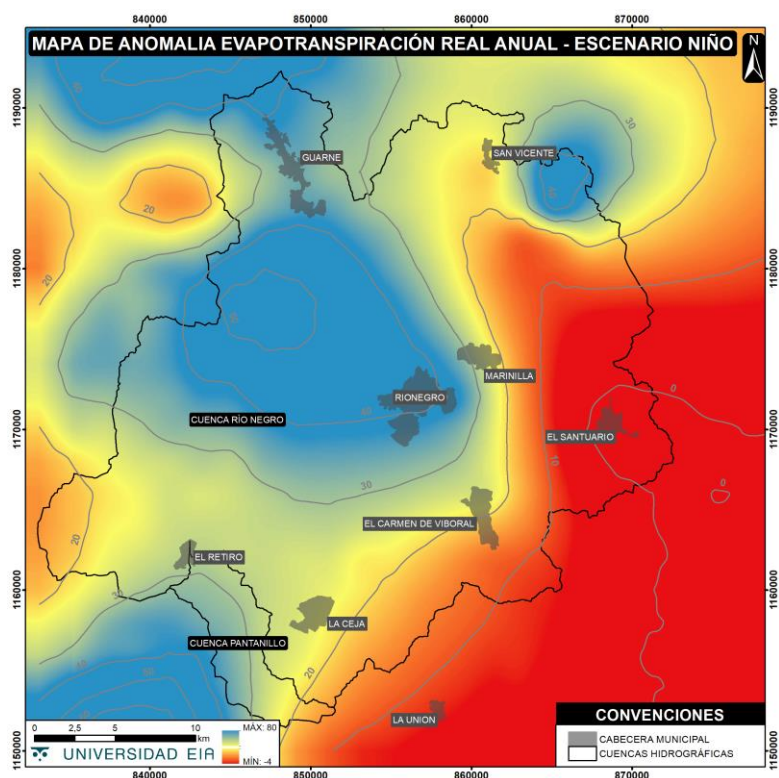


Figura 4. 6. Mapa de evapotranspiración real anual [mm/año] para el escenario El Niño con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.

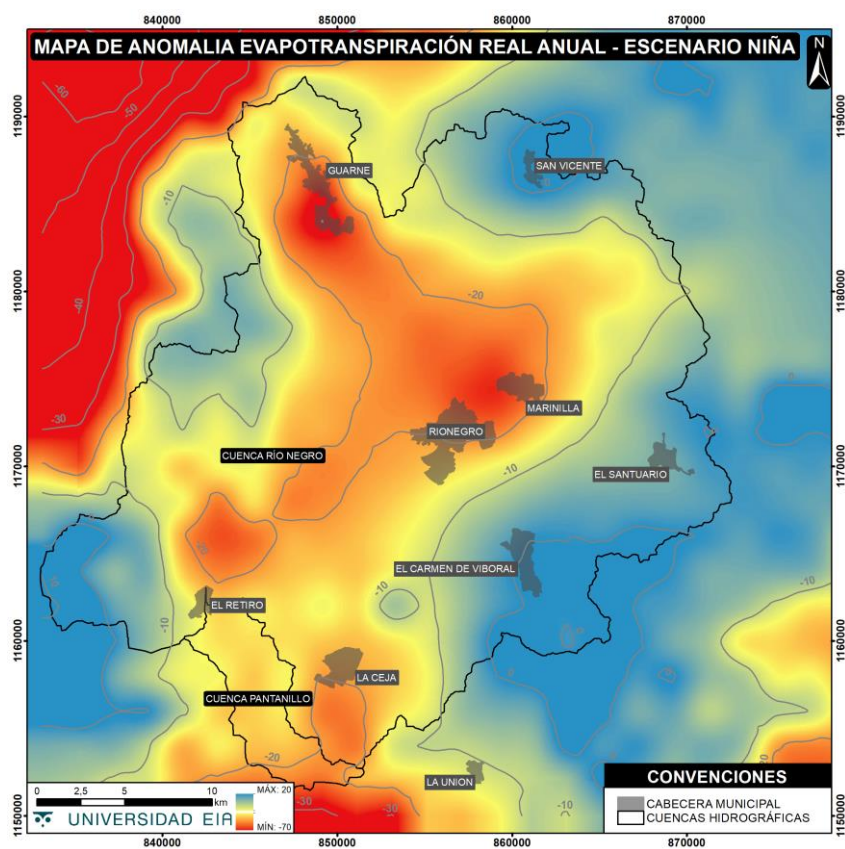


Figura 4. 7. Mapa de evapotranspiración real anual [mm/año] para el escenario La Niña con respecto al promedio. Elaboración propia, información base adaptada del IGAC.

Escorrentía

La extensión total de la cuenca del río Negro y Pantanillo es de 930 km². La cuenca asociada a la estación Río Abajo es de 884 km², es decir, cubre el 95% de la zona de estudio. La zona faltante en el cálculo corresponde a la parte noreste del municipio de Marinilla.

Los caudales de la estación Río Abajo se resumen en la Tabla 4.6. El valor en el escenario promedio es muy parecido al escenario La Niña, siendo este último un poco mayor, mientras que el escenario El Niño presenta una disminución del caudal con respecto al escenario promedio del 40%.

Tabla 4. 6. Caudales Río Abajo. Elaboración propia.

CAUDALES [m3/año]		
Escenario promedio	Escenario El Niño	Escenario La Niña
27,1	18,8	28,3

El cambio en la capacidad de almacenamiento del suelo se resume en la Tabla 4.7. Se evidencia que en el escenario promedio se encuentran valores negativos, es decir, a largo plazo se pueden presentar que las salidas de agua al sistema son mayores que la entrada. Sin embargo, el balance hídrico propone que el valor medio de la recarga es positivo en los tres escenarios, comprobando esto que la entrada de agua a los reservorios de agua subterráneos es mayor a la salida de ésta, lo cual comprueba el potencial hidrogeológico de la zona estudiada.

Tabla 4. 7. Recarga potencial. Elaboración propia.

RECARGA [mm/año]								
Escenario promedio			Escenario El Niño			Escenario La Niña		
Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
882	-42	281	1168	46	347	1386	251	668

Se hace la salvedad de este objetivo cuenta con un grado de incertidumbre considerable por limitaciones al acceder a datos hidrológicos continuos, confiables y suficientes para proponer unos resultados más robustos. Sin embargo, ésta es una primera aproximación para determinar el potencial de esta zona de estudio y se propone para trabajos futuros el uso de mayor densidad de estaciones meteorológicas con valores de precipitación que se encuentren con menos datos faltantes y con la misma ventana temporal. Además, se propone estudiar con mayor precisión la variable de escorrentía y realizar la estimación de la recarga potencial con otras metodologías como pruebas directas en campo usando lisímetros o un balance de masa de trazadores.

Referencias

- Becerra, A. (1999). Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Recuperado de <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/Budyko>. (1974). Ecuación Budyko.
- Carbajo, K. (2015). Condiciones de explotación del acuífero Casma - sector San Rafael. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Jaramillo, M. (2003). Estudio de la interacción acuífero-río como soporte metodológico en la estimación de caudales mínimos. Universidad Nacional de Colombia.
- Met Office. (2018). Precipitation. Recuperado el 23 de Octubre, 2018, de <https://www.metoffice.gov.uk/learning/precipitation>
- Missteary, B. D. R., Brown, L., & Daly, D. (2009). A methodology for making initial estimates of groundwater recharge from groundwater vulnerability mapping. *Hydrogeology Journal*, 17(2), 275–285. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0342-x>
- Palacio, P. A., & Betancur, T. (2007). Identificación de fuente y zonas de recarga a un sistema acuífero apartir de isótopos estables del agua. *Gestión y Ambiente* (Vol. 10). Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/1388>
- Parraguez Becker, V. (2017). Curso Hidrología e Hidrogeología. Santiago de Chile.
- Ruíz, D., & Martínez, G. (2015). Estimar la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas acuíferos presentes en el área del municipio de Ambalema, Departamento del Tolima, Colombia. Bogotá. Retrieved from <https://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/2361/1/VULNERACUÍFEROSAMBALEMA.pdf?cv=1>
- Schostinsky, G. (2006). Revista geológica de América Central. Revista Geológica de América Central. Escuela Centroamericana de Geología, Colegio de Geólogos de Costa Rica. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/454/45437342002/>
- Turc Modificado. (1962). Ecuación Turc Modificado.
- Uribe, H., Arumí, J. L., González, L., & Salgado, L. (2015). Balances hidrológicos para estimar recarga de acuíferos en el Secano Interior, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua* (Vol. 18). Retrieved from <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/946>
- Victoria, M., Otálvaro, V., María, L., & Ariza, V. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/11054489.pdf>

Red de flujo

Modelo numérico

Introducción

Los modelos numéricos pueden usarse en estudios hidrogeológicos para mejorar el entendimiento de los sistemas acuíferos. Por lo tanto, éstos pueden tener carácter exploratorio y usarse en paralelo para apoyar los planteamientos de un modelo conceptual (Anderson et al., 2015). Existen protocolos de modelación numérica ampliamente aceptados dentro de la comunidad científica. Uno de ellos es el que se presenta en la Figura 1, el cual ha constituido la base conceptual para el desarrollo de las fases de modelación en el ámbito del proyecto de “Actualización del modelo conceptual hidrogeológico del VSN”. En la Figura 1, se resume la información necesaria para la implementación de un modelo numérico y se delinea una guía metodológica para el tratamiento de ésta, de forma que se obtengan los productos necesarios a implementarse en cualquier código de modelación.

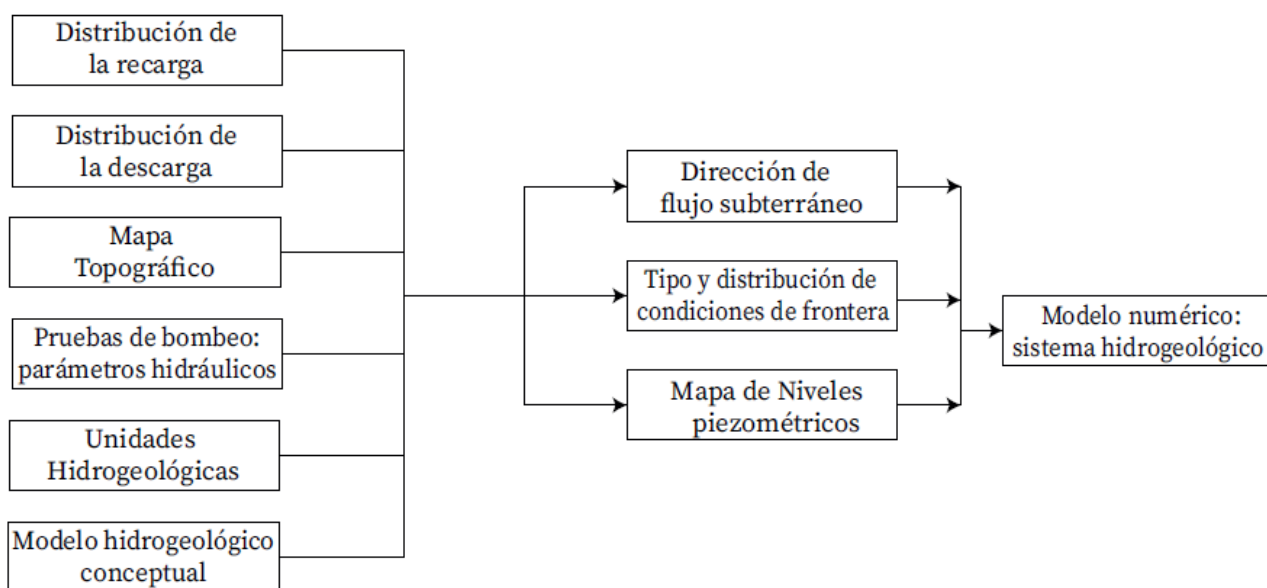


Figura 5. 1. Flujograma para modelos numéricos. (Adaptado de Anderson et al., 2015, modificado de Kohn, 1996).

En el ámbito del presente proyecto, el modelo numérico se ha implementado con el objetivo de representar matemáticamente el flujo subterráneo, hecho que indirectamente permite validar la geometría, roca y propiedades hidráulicas del modelo hidrogeológico conceptual formulado para este proyecto. Adicionalmente, el modelo numérico constituye la base para la cuantificación de la oferta de agua subterránea y como una herramienta que, al actualizarse continuamente a la luz de nueva información, permita realizar una gestión objetiva del recurso hídrico subterráneo en el VSN y apoye el lineamiento de estrategias de uso del agua por parte de diferentes actores. Es así como durante la

parametrización del modelo numérico, se ha propendido por incluir los aspectos más importantes delineados en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual, como son: (i) la representación de la geometría del acuífero, (ii) la apropiada inclusión de las regiones con diferente respuesta hidráulica, y (iii) la ejecución de la calibración objetiva del modelo y su respectiva validación, en función de la información de puntos de agua proporcionados por Cornare.

Marco teórico

Ecuación de flujo subterráneo

El modelo de flujo subterráneo implementado en este capítulo se desarrolla bajo el marco del código MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005). MODFLOW es un popular código de simulación de flujo de aguas subterráneas, abierto y distribuido por el Servicio Geológico de los EE. UU. Durante más de 30 años, MODFLOW ha sido ampliamente utilizado por académicos, consultores privados y científicos para simular de forma precisa, confiable y eficiente el flujo de aguas subterráneas. MODFLOW simula el movimiento del agua subterránea en un medio poroso mediante la resolución de la siguiente ecuación 3D de continuidad combinada con la ley de Darcy, como sigue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación 5.1. Ecuación de flujo subterráneo por derivadas parciales.

donde la variable de estado es la energía del agua (h) o altura piezométrica [L], los parámetros del modelo son las conductividades hidráulicas en las direcciones principales x , y y z (K) [L/T] y el coeficiente de almacenamiento específico (S_s) [adim.]. Las entradas y las salidas (término fuente-sumidero) se incluyen en el término W [L/T]. Esta ecuación tiene solución única estableciendo condiciones iniciales y de frontera (i.e. niveles impuestos, flujos impuestos o flujos dependientes de una energía externa). En particular, MODFLOW resuelve numéricamente la ecuación de flujo subterráneo de forma general, es decir para cualquier configuración geométrica y configuración de parámetros, empleando el método de las diferencias finitas.

Datos y métodos

Implementación del modelo numérico

Para implementar el modelo de flujo del VSN en el código MODFLOW de manera simple y a través de un sistema gráfico sencillo, se utilizó la plataforma ModelMuse, que es una interfaz gráfica de usuario para diferentes modelos de aguas subterráneas (Winston, 2009). En dicha interfaz, las asignaciones de las zonas de parametrización hidráulica de los materiales que conforman el acuífero, los flujos externos de agua (e.g. la recarga), la interacción entre el acuífero y los ríos, y las variables de estados usadas como objetivos de calibración y validación, son descritas por objetos computacionales. Éstos son construidos a la luz de la siguiente información: unidades estratigráficas y geomorfológicas, con su

respectiva geometría, zonas de recarga, niveles piezométricos extraídos de inventarios de puntos de agua y redes de drenaje obtenidas de diferentes fuentes cartográficas o procesadas de información topográfica digital.

Es de especial interés lograr una caracterización de las relaciones que se presentan entre los ríos permanentes y los acuíferos, cuya existencia se ha identificado al interior del VSN, puesto que la dinámica de ambas masas de agua se controla entre sí. Por ejemplo, en épocas de poca disponibilidad hídrica, gran parte de los caudales que fluyen por la red de drenaje permanente provienen de las masas de agua subterráneas. Siguiendo lo establecido anteriormente, las consideraciones para la implementación del modelo son las siguientes:

- La modelación se realiza en régimen permanente, ya que los datos recopilados para la zona de estudio no tienen registros históricos de las variables de estado (i.e. niveles piezométricos o aforos de flujos subterráneos).
- El área de estudio (Figura 5.2) tiene una extensión 250 km², abarcando principalmente el municipio de Rionegro. La el área de estudio incluye geomorfológicamente a la Superficie de Erosión II, la llanura de inundación, las terrazas aluviales las cuales, fueron caracterizadas con la presencia acuíferos r respectivamente para cada morfología, tal como se expuso de manera detallada en el Capítulo 3 del presente libro.
- La malla se ha configura con un tamaño de celda de 600 x 600 metros (Figura 5.3 y Figura 5.4), compuesta por 49 filas y 28 columnas. Así mismo, a partir de la geometría se han definido verticalmente dos capas para el modelo, las cuales no delimitan unidades hidrogeológicas, sino que se definen para que el modelo se resuelva más fácilmente (consideración meramente computacional).
- La recarga (descripción detallada el Capítulo 4) es una condición de contorno de flujo impuesto. Dado que el modelo se resuelve en régimen permanente, la recarga se establece para condiciones promedio de largo plazo para un año hidrológico normal. De acuerdo con lo anterior, se establece una intensidad de recarga de 281 mm/año. Esta es uniformemente asignada a través del paquete de Recharge (RCH) de MODFLOW.
- El Río Negro y sus tributarios más relevantes se han representado en el modelo como una condición de contorno de flujo dependiente de un nivel externo. Este tipo de condiciones de contorno, se caracterizan de acuerdo a un parámetro denominado conductancia, el cual se puede conceptualizar como el potencial de infiltración por unidad de área a través del lecho de río, por metro de energía externa impuesta. En otras palabras, representa la capacidad de intercambio de flujo que existe entre el río y el acuífero (Harbaugh, 2005). En este trabajo se considera que dicha conductancia es un parámetro de calibración y se establecen valores iniciales en función de las características geomorfológica de la red de drenaje adoptando el siguiente criterio: en las partes altas de las cuencas se

depositan sedimentos más gruesos, es decir existen conductancias más elevadas; y en las partes bajas sedimentos menos gruesos, correspondientes conductancias menores (Rocha, 1998). Los niveles externos inherentes a la condición de contorno se obtuvieron a partir de la metodología presentada por Mejía S. & Posada G. (2002) para desarrollar la geometría hidráulica en la zona andina colombiana. Allí se presentan relaciones funcionales de las alturas de flujo en un canal natural en función de las características geomorfológicas de la red de drenaje. Esta condición de borde es asignada con el paquete de River (RIV) de MODFLOW.

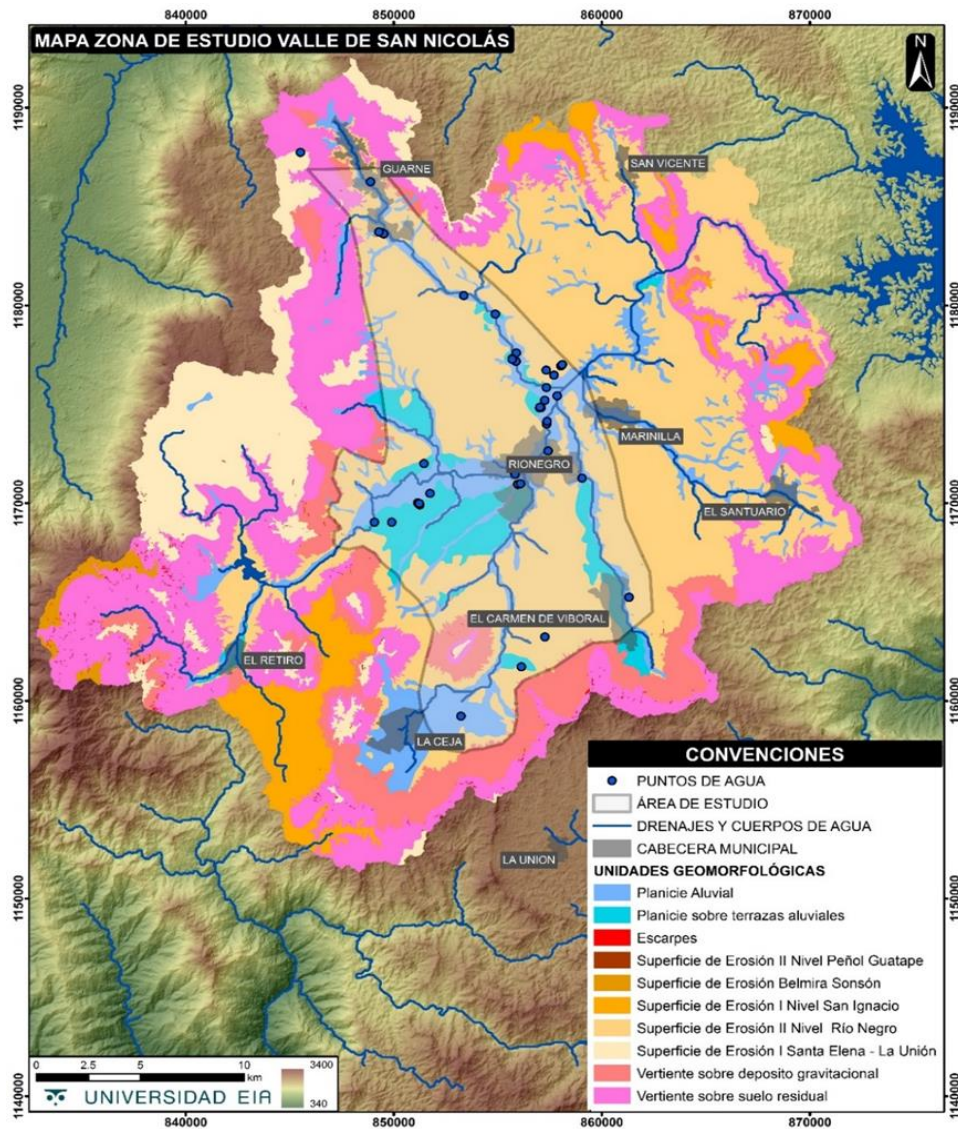


Figura 5. 2. Mapa de ubicación del modelo numérico del VSN. Adaptado del satélite ALOS PALSAR, información base del IGAC y el POMCA en la jurisdicción de Cornare.

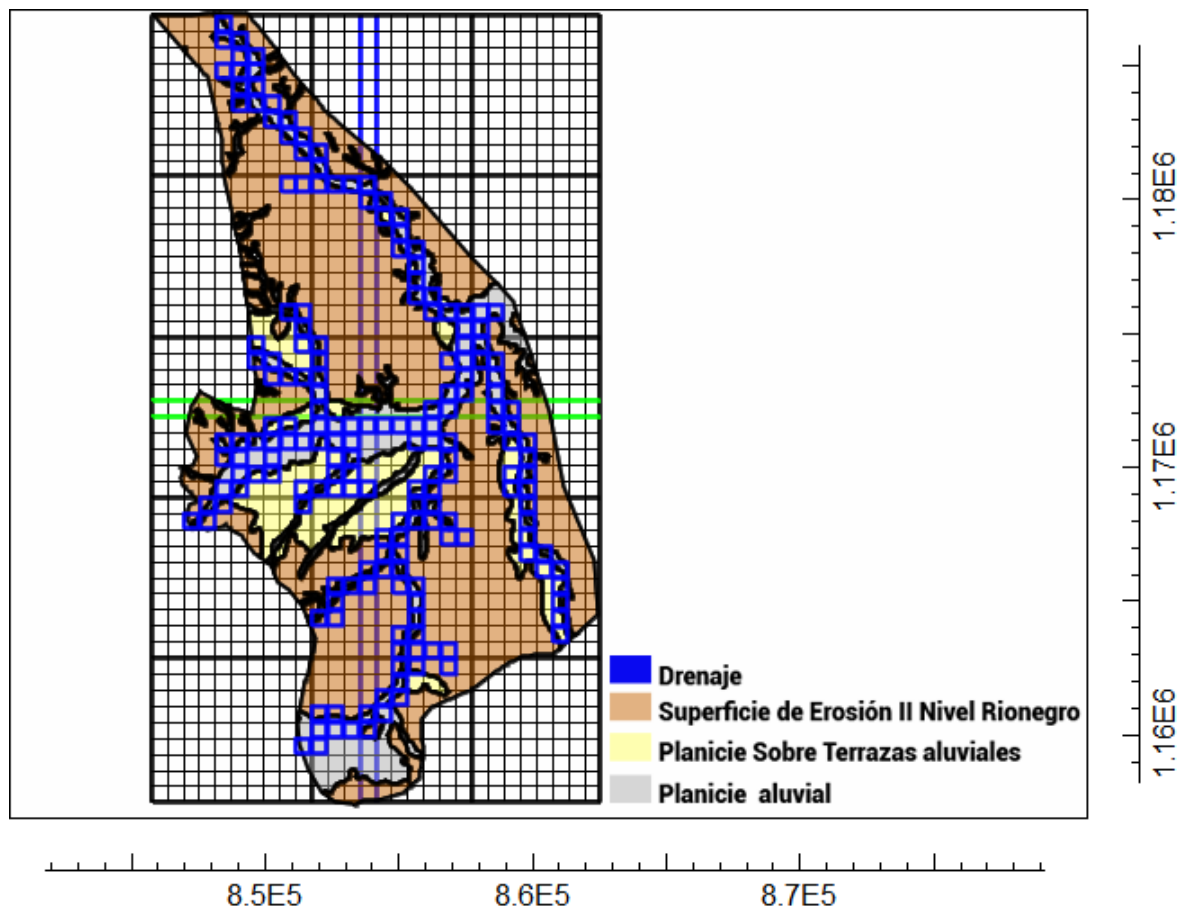


Figura 5. 3. Dominio del modelo numérico del VSN realizado en el software ModelMuse.

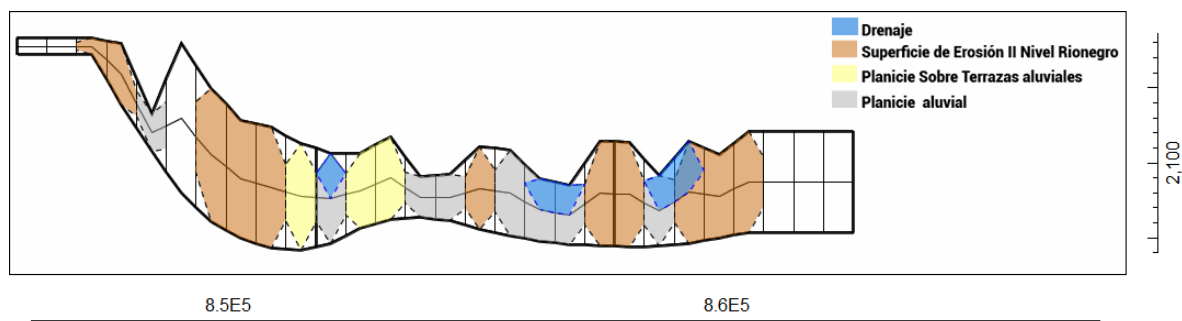


Figura 5. 4. Geometría del modelo numérico del VSN realizado en el software ModelMuse.

- La información de conductividad hidráulica disponible para el VSN es muy limitada. Por lo anterior, dado que en el modelo conceptual se plantea que existe una relación muy estrecha entre la configuración del subsuelo y los procesos geomorfológicos superficiales del área de estudio, una primera aproximación aceptable consiste en plantear que lateralmente las unidades geomorfológicas pueden indicar hasta donde se puede encontrar la disposición estratigráfica. Bajo esa consideración, las conductividades hidráulicas se establecen con valores de referencia extraídos de bibliografía (Fetter, 2000), de acuerdo con disposiciones estratigráficas reportadas en los núcleos de perforación y cuyas propiedades laterales se extrapolan teniendo en cuenta el criterio de la geomorfología. (Detalles en el Capítulo 3).

- Se usa el paquete Head Observation (HOB) de MODFLOW para sistematizar el procedimiento de calibración. Dicha herramienta permite ingresar de forma interactiva los niveles observados extraídos del análisis de puntos de agua, que serán considerados como objetivo de calibración. La muestra de información disponible de 90 observaciones piezométricas se dividió en dos; una compuesta por 50 observaciones para calibración y otra formada por 40 datos para validación.

Resultados

Calibración

La calibración es un procedimiento en el cual se define la parametrización de un modelo, de forma que éste logre representar adecuadamente información disponible de variables de estado. En este trabajo, el objetivo de la calibración se centró en intentar reproducir niveles piezométricos disponibles en pozos, aljibes y piezómetros reportados en la base de datos de puntos de agua de Cornare. La calidad de la calibración se mide estimando estadísticos bivariados de pares de niveles piezométricos observados y simulados. Los estadísticos escogidos fueron el residual medio, el residual medio absoluto y el error medio cuadrático. Luego de ejecutar un procedimiento de evaluación de la calidad de la información de niveles, para la calibración se consideraron 40 puntos de niveles piezométricos, ubicados en toda el área de modelación. Para mejorar la calibración y hacerla más robusta, se intentó eliminar sesgos en la ubicación de dichos puntos.

Tabla 5. 1. Parámetros de propiedades hidráulicas utilizadas en el modelo numérico del Valle de San Nicolás.

Nombre	Característica paramétrica	Parámetro
Planicie aluvial	Arenas y gravas bien gradadas	$K_x[m/s] = 0.01$
Planicie sobre terrazas aluviales	Arenas limosas y arenas finas	$K_x[m/s] = 0.0001$
Superficie de erosión II nivel Río Negro	Arenas arcillosas y limos	$K_x[m/s] = 0.000001$
Conductancias	Red de drenaje en parte alta de cuenca	$C[m^2/s] = 100$
	Red de drenaje en parte baja de cuenca	$C[m^2/s] = 50$

Durante el proceso de calibración, se modificaron las conductividades hidráulicas asignadas a las unidades hidrogeológicas planteadas y las conductancias de las condiciones de contorno tipo río. Los resultados obtenidos para dichos parámetros se muestran en la Tabla 5.1. Debe notarse que se han manejado rangos que respetan el criterio dado por las texturas predominantes en cada unidad hidrogeológica, con lo cual,

las estratigrafías más arenosas tienen conductividades hidráulicas mayores que las más arcillosas. Al mismo tiempo, los tramos de la red de drenaje que suelen relacionarse con el depósito de sedimentos más fino (i.e. parte baja de las cuencas en el área de modelación), han manifestado conductancias más bajas, con lo cual su conexión con los acuíferos es menos perfecta.

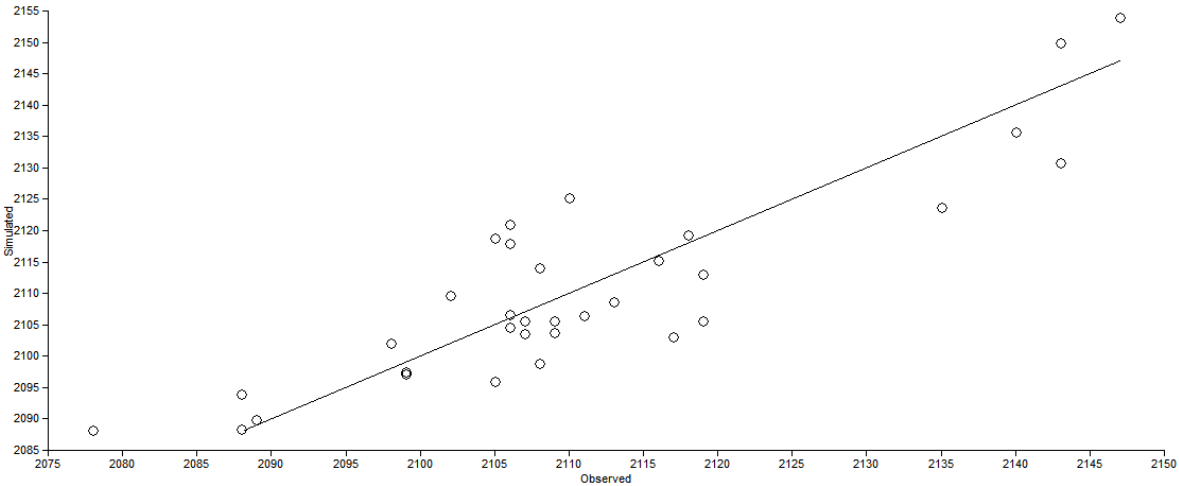


Figura 5. 5. Diagrama de dispersión de calibración para el modelo numérico del VSN.

Tabla 5. 2. Estadísticos de calibración estimados para el modelo numérico del VSN.

Etapas de modelación	Error medio [m]	Error medio absoluto [m]	Error medio cuadrático [m²]
Calibración	-0.19	6.48	7.95

En la Figura 5.5 se presenta el diagrama de dispersión obtenido de la calibración. En las abscisas se localizan los niveles observados [metros], y en las ordenadas se ubican los niveles simulados [metros]. La interpretación de dicho gráfico debe considerar que los pares ordenados observación-calibración se ubicarían sobre la línea de pendiente unitaria si la calibración fuese perfecta. En este caso se observa una dispersión aceptable alrededor de la línea de pendiente unitaria, capturándose la tendencia general de variabilidad de los niveles piezométricos en toda la región de modelación. Las estimaciones de los estadísticos de calibración se muestran en la Tabla 5.3. Para los tres estadísticos considerados, las mejores calibraciones se dan cuando sus estimaciones tienden a cero; en particular, un error cuadrático medio tendiente a cero indica poca dispersión de los errores o residuales (i.e. diferencia entre nivel observado y nivel simulado) de calibración. Los resultados obtenidos indican que el error medio de calibración es muy pequeño, pero tiende a la subestimación. De la misma forma, el error medio cuadrático obtenido es relativamente elevado, con lo cual existe dispersión media de los errores de calibración. Para evaluar lo anterior, se ha estimado el histograma de residuales, que se presenta en la Figura 5.6. Si bien se detecta una tendencia normal en la distribución de los errores, parece confirmarse que existe dispersión de los mismos.

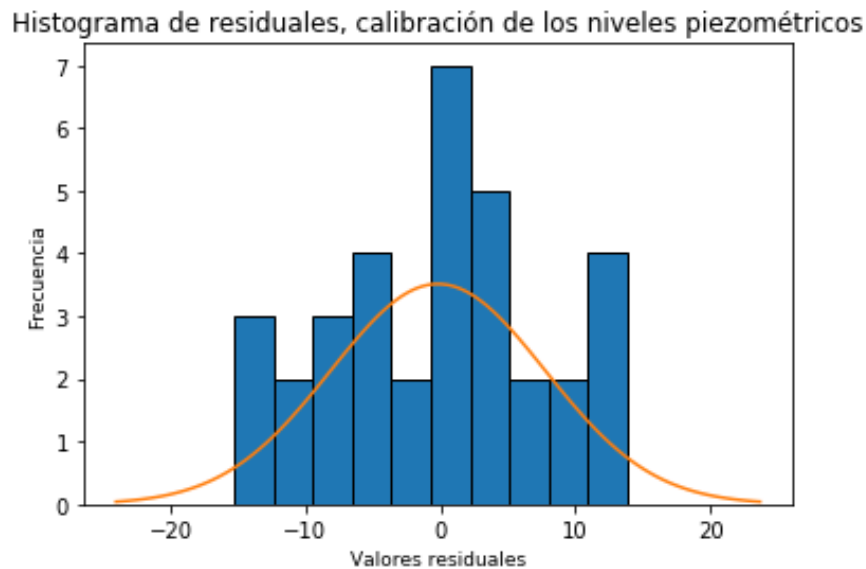


Figura 5. 6. Histograma de residuales de calibración para el modelo numérico del VSN.

Validación

La validación es el procedimiento mediante el cual se confirma la representatividad de un modelo calibrado. Para ello, se tuvo en cuenta la muestra de 40 observaciones piezométricas de validación (en localizaciones diferentes a las observaciones de calibración) y los resultados del modelo se compararon con las observaciones en las localizaciones correspondientes. Los resultados obtenidos se sometieron a un proceso de verificación de calidad estadística de los resultados, de forma análoga a la planteada para la calibración. En la Figura 5.7 se presenta el diagrama de dispersión de validación, configurado de forma análoga a lo mencionado antes para calibración. Los resultados muestran consistencia en la representación de las tendencias piezométricas regionales por parte del modelo calibrado. Aun así, un análisis más detallado de los resultados permite concluir que el modelo tiene mejor reproducción de los niveles piezométricos simulados en la unidad hidrogeológica asociada con la planicie aluvial del Río Negro. A medida que la localización los niveles de referencia se alejan de dicha unidad, su reproducción por parte del modelo es más pobre, esto probablemente se deba al hecho que los procesos geológicos que han favorecido a que la Superficie de Erosión II tenga capacidades de acumulación de agua subterránea, son procesos anisotrópicos (meteorización química principalmente) y por lo tanto sea más difícil de representar con una sola medida de conductividad hidráulica dada dicha anisotropía. Los estadísticos bivariados de validación (error medio, error medio absoluto y error medio cuadrático) se presentan en la Tabla 5.4. De estos se concluye que la calidad de la reproducción del modelo ha disminuido en comparación con los resultados de calibración, especialmente la dispersión de los residuales, aunque dichas magnitudes pueden considerarse como aceptables si se considera que la información disponible es relativamente limitada y que el modelo busca representar una condición regional de flujo subterráneo.

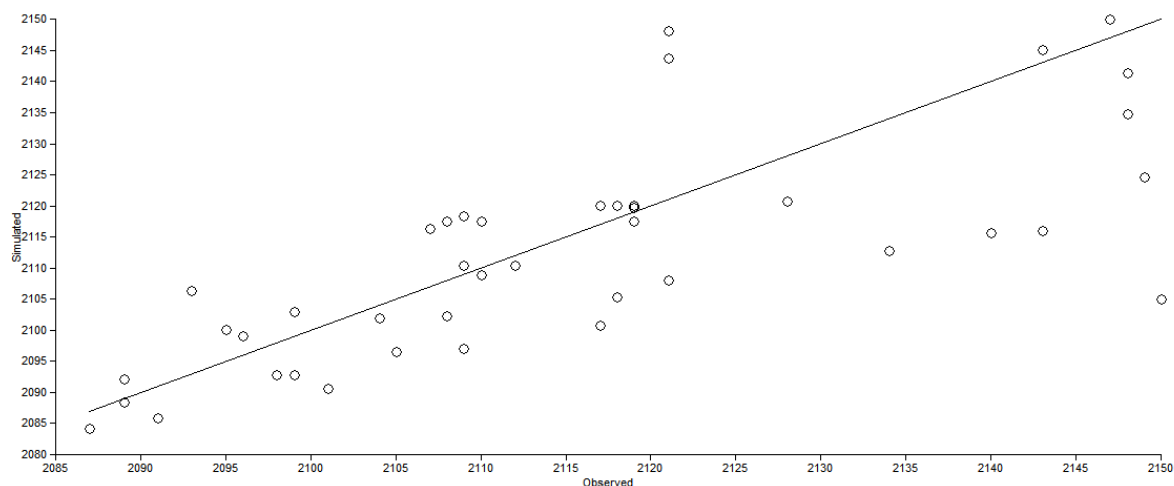


Figura 5. 7. Diagrama de dispersión de validación para el modelo numérico del VSN.

Tabla 5. 3. Estadísticos de validación estimados para el modelo numérico del VSN.

Etapas de modelación	Error medio [m]	Error medio absoluto [m]	Error medio cuadrático [m ²]
Validación	3.42	9.55	13.42

Para observar gráficamente las tendencias estadísticas de los errores de validación, se ha estimado el histograma de los residuales, que se presenta en la Figura 5.8. Se observa que la tendencia de dichos errores es cercana a cero y la distribución es casi simétrica, con lo cual los residuales se compensa, de ahí que el error medio sea bajo. También cabe notar que existen unos pocos residuales mayores a 40 m; valores que sesgan la estimación de error cuadrático medio y, en consecuencia, aumentan la percepción de amplitud en la dispersión de los errores. Los resultados de validación permiten plantear la necesidad de aumentar la cantidad y calidad del muestreo de los niveles piezométricos y parámetros hidráulicos en las regiones más alejadas a los depósitos aluviales del Río Negro; ello con el claro propósito de plantear un ajuste a la conceptualización hidrogeológica, idealmente con mayor detalle. Sin embargo, dadas las limitaciones de información, especialmente de parámetros hidráulicos, se considera que los resultados obtenidos del proceso de modelación son aceptables.

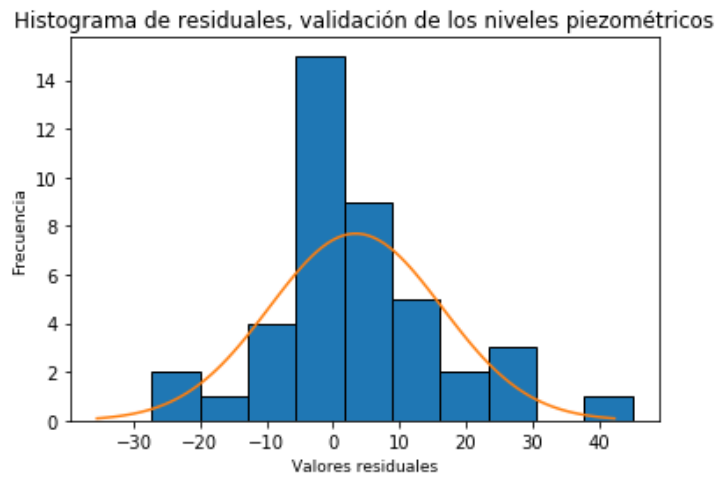


Figura 5. 8. Histograma de residuales de validación para el modelo numérico del VSN.

Niveles piezométricos

El resultado de la simulación numérica se representa gráficamente mediante la distribución regional de los niveles piezométricos (Figura 5.9).

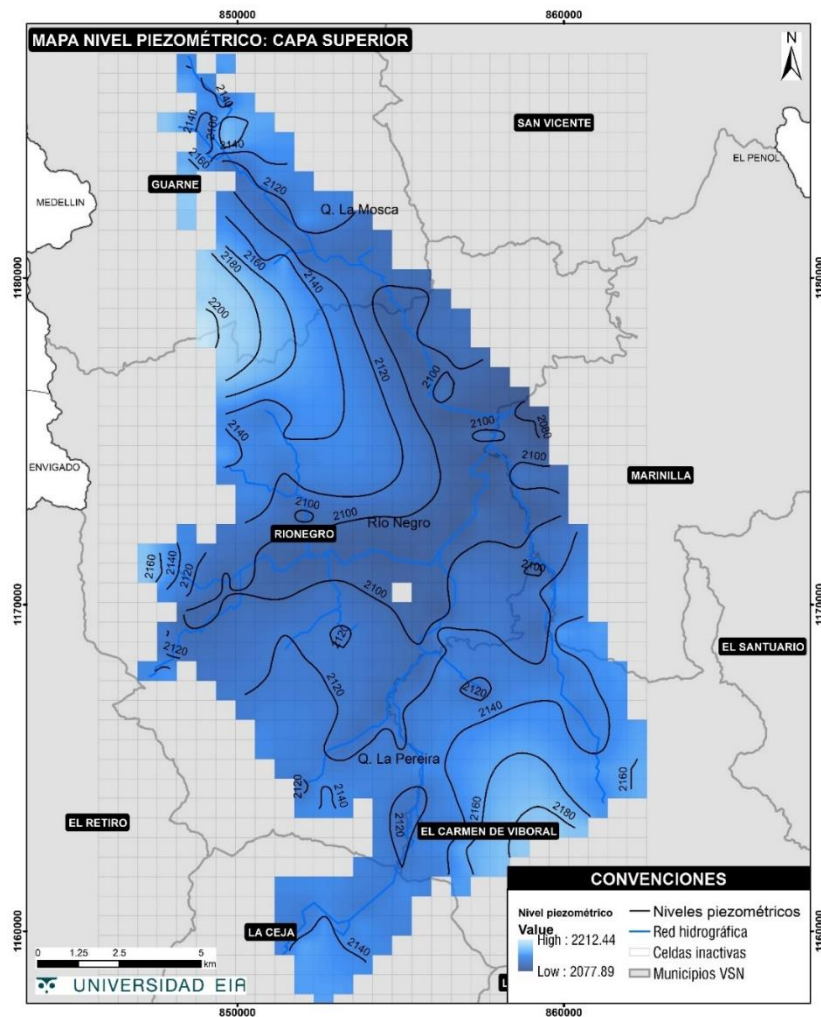


Figura 5. 9. Resultado de los niveles piezométricos [msnm] en el VSN simulados en la capa superior del modelo.

Los niveles piezométricos obtenidos muestran direcciones de flujo predominantemente desde las regiones con mayores altitudes en las cuencas localizadas dentro del área de

modelación, hacia parte baja la red de drenaje donde los ríos convergen progresivamente. Ello es consistente con el mapa de isopiezas construido mediante la interpolación espacial de observaciones en los 90 puntos de agua disponibles, es decir, el modelo es consistente con la información disponible de variables de estado de los acuíferos al interior del VSN. De igual forma, la superficie piezométrica confirma el control de la red de drenaje permanente en la dinámica de flujo subterráneo; forzamiento propuesto *a priori* desde el modelo hidrogeológico conceptual.

Conclusiones

Puede decirse que el modelo numérico de flujo para el VSN ha sido calibrado y validado de forma adecuada puesto que, en general, se han representado los principales aspectos planteados en el modelo hidrogeológico conceptual y se han reproducido adecuadamente los datos disponibles de niveles piezométricos. Los resultados de este trabajo permiten plantear que la dinámica de flujo simulada en la zona de la planicie aluvial del Río Negro se representa mejor que las dinámicas de flujo en las demás unidades hidrogeológicas al interior de la región de modelación. Lo anterior puede atribuirse a las siguientes causas: (i) menor calidad de la información piezométrica disponible en las unidades hidrogeológicas asociadas con la superficie de erosión II Nivel Rionegro y planicie sobre terraza aluvial, (ii) mayor heterogeneidad en las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas asociadas con la superficie de erosión II Nivel Rionegro y planicie sobre terraza aluvial que la propuesta en el modelo de flujo implementado, y (iii) insuficiencia de la información primaria disponible, especialmente en lo concerniente a conductividades hidráulicas.

El modelamiento numérico del flujo subterráneo permite proponer que los tres acuíferos definidos por la interpretación estratigráfica-geoeléctrica (Capítulo 3) son realmente tres unidades hidrogeológicas toda vez que es posible identificar conductividades hidráulicas diferenciadas para cada uno de ellos.

Para terminar, cabe mencionar que la implementación del modelo numérico del VSN tiene una escala regional y algunos de sus parámetros hidráulicos corresponden a valores extraídos de referencia bibliográficas (a partir de la estratigrafía conocida). En consecuencia, el modelo numérico todavía se encuentra en proceso de construcción y es susceptible de mejorarse a la luz de un entendimiento más refinado del comportamiento hidrogeológico. De allí sigue que sería necesario evaluar la ejecución de etapas posteriores de modelación, en las que se avance en la caracterización de: (i) los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas, (ii) la toma de registros temporales de niveles piezométricos y de flujos subterráneos, (iii) el levantamiento de información primaria para caracterizar columnas estratigráficas, y (iv) registro e interpretación de información geofísica.

Referencias

Anderson, M., Woessner, W. W., & Hunt, R. (2015). *Applied Groundwater Modeling, Second*

Edition: Simulation of Flow and Advective Transport. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091638-5.00001-8>

- Cornare. (2015). *POMCA Rionegro*. Retrieved from https://www.cornare.gov.co/POMCAS/PRESENTACIONES_TALLERES_DIAGNOSTICO-PROSPECTIVA/RIO_NEGRO/RESULTADOS_FASE_DIAGNOSTICO_RIO_NEGRO.pdf
- Fetter, C. (2000). *Applied Hydrogeology* (Cuarta edi). Universidad de Wisconsin - Oshkosh.
- Harbaugh, W. (2005). *MODFLOW-2005 , The U . S . Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. Virginia: USGS. <https://doi.org/U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16>
- Kohn, K. E. (1996). Conceptualization and characterization of ground-water systems using Geographic Information Systems. *Engineering Geology*, 42(2–3), 111–118. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00072-0)
- Mejía S., G. J., & Posada G., L. (2002). Geometría Hidráulica para Corrientes Estables de la Zona Andina Colombiana. *XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, 10. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/4285/1/DA3491.pdf>
- Rocha, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial* (Primera ed). Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. <https://doi.org/10.13140/2.1.1072.6722>
- Winston, R. B. (2009). ModelMuse: A Graphical User Interface for MODFLOW-2005 and PHAST. In Section A, Ground Water—Book 6, Modeling Techniques (p. 52 p). Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29/tm6A29.pdf>

Evaluación de la calidad de aguas subterráneas en el VSN.

Introducción

Este capítulo hace parte de los resultados del proyecto de investigación de la Universidad EIA: “Actualización del modelo hidrogeológico en el Valle de San Nicolás”. Proyecto que se desarrolló en Convenio con Cornare y colaboración de EPM. Dentro de éste, uno de los objetivos específicos fue “Determinar la calidad de las aguas subterráneas”. Se presentan aquí, los datos y métodos, así como los análisis realizados para este propósito.

La composición química del agua subterránea, es el resultado de la interacción continua entre el agua proveniente de la precipitación que, una vez se infiltra y se percola en el subsuelo, reacciona con la litología existente por donde circula. Dicha litología, puede tener diferentes estados de meteorización y fracturamiento, lo que incide en las variaciones químicas que va sufriendo el agua subterránea, conforme se moviliza por el subsuelo. Los procesos biológicos que actúan sobre el agua, también alteran su composición química; adicionalmente, la calidad del agua subterránea puede verse afectada por algunas actividades antrópicas (p.e. actividad agrícola, industrial y/o ganadera), las cuales generan alteraciones químicas mediante la infiltración de desechos a través del subsuelo que logran modificar la composición del agua subterránea. Por lo tanto, las aguas naturales nunca son puras, ellas contienen pequeñas cantidades de sustancias disueltas y su concentración depende de una gran cantidad de factores que incluyen los tipos de minerales con los que el agua está en contacto, el tiempo de residencia y los procesos biológicos que actuaron sobre ella (Vélez, 1999).

De esto se evidencia que, en cada localidad, las características físico-químicas del agua subterránea van a ser diferentes; razón por la cual la determinación de la calidad del agua subterránea, es de gran interés para la actualización del modelo hidrogeológico conceptual en el Valle de San Nicolás, por su relevancia en la definición del sistema acuífero y en la determinación de sus posibles usos.

En este estudio, el análisis de la calidad del agua subterránea, comprende los siguientes aspectos: la determinación de los parámetros físico-químicos del agua subterránea y la identificación de las posibles causas de estos valores, cuando sus concentraciones se encuentran por fuera de los rangos normales en el agua subterránea.

El análisis se basa en los resultados de la campaña de monitoreo realizada en veinticuatro (24) puntos de agua subterránea distribuidos en los municipios de Rionegro, Guarne y la Ceja. El muestreo fue adelantado por parte de la Universidad Católica de Oriente (UCO), en el marco del contrato: “Monitoreo de Oferta y Calidad del Agua en las Cuencas de la Jurisdicción de Cornare, Mediante el Muestreo de Corrientes Superficiales y Aguas Subterráneas, Caracterización de Usuarios Objeto de la Tasa Retributiva y Realización de Aforos Puntuales en Fuentes Superficiales” Fuentes Subterráneas – Contrato 477-2016, realizado entre la UCO y Cornare. Los datos se procesaron en el laboratorio de aguas de Cornare. (Acreditado por el IDEAM, Resolución 0312, 06-II-2018). Para propósitos de conocer el detalle de dicha campaña, por favor remitirse al informe original.

Las actividades de campo que incluyeron la adquisición de las muestras, se desarrollaron los días 21 y 22 de noviembre de 2016. Posteriormente, las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio de Cornare para el análisis de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Es importante resaltar que esta caracterización geoquímica es de carácter regional y que la cantidad de muestras empleadas es un número estadísticamente bajo en comparación a toda el área de estudio, por consiguiente, las conclusiones y recomendaciones que de este estudio se derivan, deben tener presente tal restricción.

En síntesis, este capítulo, se incluyen análisis espaciales de calidad y análisis de facies hidroquímicas, usados en la actualización del modelo hidrogeológico conceptual.

Localización

Las muestras se distribuyen espacialmente sobre lo que corresponde geomorfológicamente a las planicies aluviales (vega aluvial) y/o planicies sobre terrazas aluviales de los municipios de Rionegro, Guarne y la Ceja (Figura 6.1).

Marco conceptual

Los análisis de calidad que se desarrollan a partir de resultados de laboratorio, pueden ser empleados para diversos propósitos. Como se nombró anteriormente en este capítulo se expondrá, en primera instancia, un análisis que permita establecer los rangos de los principales parámetros físico-químicos del agua subterránea y su distribución espacial. En segunda instancia, se procurará establecer las posibles explicaciones a las variaciones de los parámetros medidos.

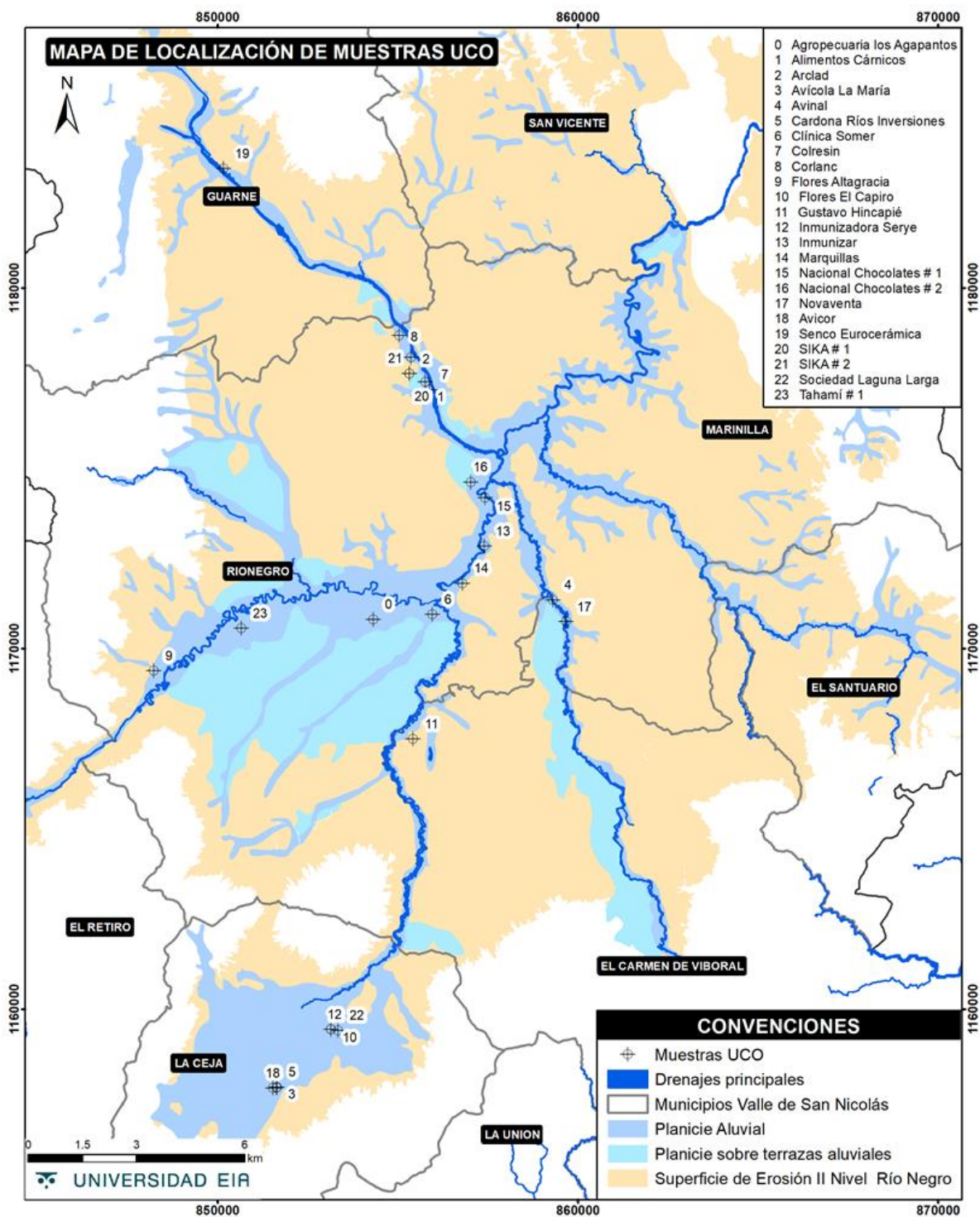


Figura 6. 1. Localización de los puntos de muestreo empleados en este estudio.

Variables físico-químicas

Los parámetros físicos corresponden con la medición de variables tales como temperatura, pH, conductividad y dureza.

Los parámetros químicos son definidos por la medición de los constituyentes inorgánicos de las aguas subterráneas. Según sus concentraciones, se dividen en: constituyentes principales o mayores (superiores a 5mg/L), constituyentes secundarios (0,01-10 mg/L) y

constituyentes traza (concentraciones inferiores a 0,01 mg/L) (Unesco, 2004). Estos constituyentes permiten establecer origen, antigüedad o evidencia de contaminación sobre las muestras del agua. En la Tabla 6.1, se presenta la clasificación de los constituyentes inorgánicos en el agua subterránea según la Unesco (2004).

Tabla 6. 1. Constituyentes de las aguas subterráneas. MODIFICADO DE UNESCO, 2004.

COMPOSICIÓN TÍPICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	
Constituyentes mayores (1,0 a 1000 mg/L)	Sodio (Na ⁺), Calcio (Ca ²⁺), Magnesio (Mg ²⁺), Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), Sulfato (SO ₄ ²⁻), Cloruro (Cl ⁻), Silicatos (SiO ₄ ⁻⁴)
Constituyentes secundarios (0,01 a 10.0 mg/L)	Potasio (K ⁺), Hierro (Fe ²⁺), Aluminio (Al ³⁺), Carbonato (CO ₃ ²⁻), Nitrato (NO ₃ ⁻), Fluoruro (F ⁻), Boro (B ⁴⁺), Selenio (Se)
Constituyentes menores y/o traza (0,001 a 0,1 mg/L)	Arsénico (As), Bario (Ba ²⁺), Bromuro (Br ⁻), Cadmio (Cd), Cromo (Cr ²⁺), Cobalto (Co ²⁺), Cobre (Cu ⁺), Yoduro (I ⁻), Titanio (Ti ⁴⁺), Plomo (Pb ²⁺⁺), Niquel (Ni ²⁺), Litio (Li ⁺) Manganeso (Mn ²⁺), Fosfato (PO ₄ ³⁻), Estroncio (Sr ²⁺) Uranio (U).

El Ministerio de Salud de Colombia, en el decreto 475 de 1998 clasifica y da valores deseables y admisibles para los diferentes elementos o sustancias presentes en el agua. Según este decreto los elementos se dividen en aquellos que pueden tener un efecto adverso reconocido en la salud humana si pasan ciertos valores establecidos y aquellos que tienen implicaciones económicas o acción indirecta sobre la salud. En el primer grupo se encuentran elementos como el aluminio, arsénico, bario, cadmio, cianuro, cobre, cromo, flúor, mercurio, nitritos, nitratos, plata, plomo, selenio y sustancias como los fenoles, detergentes, grasas y aceites. Los del segundo grupo son: calcio (principal agente para determinar la dureza del agua), hierro, manganeso, magnesio, sulfatos y zinc.

Los valores obtenidos para las diferentes muestras fueron comparados con los valores máximos permitidos por el Ministerio de Salud de Colombia según el decreto 475 de 1998 y en algunas ocasiones, con lo establecido por la Organización Mundial de Salud (WHO).

Los elementos encontrados en aguas naturales considerados esenciales para la salud humana (según Moynahan, 1979 en Edmunds & Smedley, 1996), y que fueron analizados en este estudio son: el Calcio, el Hierro, el Magnesio, los Nitritos, los Nitratos, y los Sulfatos.

A continuación, se hace una breve descripción de los algunos de los parámetros con mayor relevancia.

CALCIO (Ca²⁺): La presencia de Ca²⁺ está asociada a la dureza del agua y a las incrustaciones en los pozos. El decreto del Ministerio de Salud fija valores permitidos entre 60 y 100 mg/l. La Organización Mundial de la Salud (WHO) recomienda un valor máximo deseable de 75 mg/l.

HIERRO (Fe^{2+}): El hierro es un elemento que no presenta riesgos para la salud y sus efectos son más bien estéticos, produce un sabor desagradable, manchas en la ropa y en la comida (Gale y Smedley, 1989 en Edmunds y Smedley, 1996); además, en aguas duras puede originar incrustaciones (Johnson, 1975). Los valores permitidos por el decreto 475 de 1998, para las aguas de consumo humano, es de 0.3 mg/l y hasta 0.5 mg/l para otros usos.

MAGNESIO (Mg^{2+}): Contribuye también a la dureza del agua y con pH alto da origen a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ que se encuentra en los pozos. El valor máximo admisible por el Ministerio de Salud de Colombia es de 36 mg/l para consumo humano y hasta 60 mg/l para otros usos.

POTASIO (K^+): Proviene de la meteorización de feldspatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas. El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico; por ello, su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del Sodio a pesar de que su contenido en las rocas es por lo común ligeramente mayor a éste. En aguas subterráneas el contenido K^+ no suele sobrepasar 10 mg/l, aunque en casos excepcionales pueden alcanzarse 100,000 mg/l (salmueras). Cantidades de K^+ por encima de 10 mg/l pueden, en ocasiones, ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales (recuperado de www.igme.gov.co).

CLORUROS (Cl^-): El valor máximo admisible por el Ministerio de Salud de Colombia es de 250 mg/l para consumo humano y hasta 300 mg/l para otros usos.

SULFATOS (SO_4): La disolución de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4) y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno, representa frecuentemente el aporte cuantitativo más relevante de este ión a las aguas subterráneas. La mayoría de las aguas subterráneas sulfurosas presentan contenidos apreciables de HS^- ó H_2S que incluso a concentraciones muy bajas confieren al agua el típico olor a huevos podridos. En aguas dulces la concentración normal de SO_4 puede variar entre 2 y 150 mg/l. En aguas salinas, asociado al Ca^{2+} , puede llegar a 5.000 mg/l: asociado con Mg^{2+} y Na^+ (IGME, 2017). El valor máximo admisible por el Ministerio de Salud de Colombia es de 350 mg/l, para consumo humano.

NITRATOS (NO_3): Altas concentraciones de nitrato en aguas de pozos pueden deberse a una infiltración de aguas contaminadas con desperdicios animales y fertilizantes a base de nitrógeno. Concentraciones de nitrato mayores de 45 mg/l, pueden tener efectos tóxicos sobre los niños. El valor máximo admisible por el Ministerio de Salud, en agua para consumo humano, es de 10 mg/l.

NITRITOS (NO_2): La presencia de nitritos en el agua, está directamente relacionada con actividad biológica, como desechos de ganado, marraneras, gallineros, aguas negras, basureros. El principal efecto biológico del nitrito es la formación de methaemoglobina en la sangre, limitando el transporte de oxígeno en el cuerpo (Johnson, 1975). Valores permitidos entre 0.1 y 1.0 mg/l según sea su uso (Decreto 475 de 1998, ministerio de Salud).

SUSTANCIAS Y OTROS

Grupo Coliformes: Los coliformes son bioindicadores de la calidad del agua, en aguas puras o tratadas su valor debería ser de cero. Para este monitoreo se realizaron análisis de coliformes totales y de *E. coli*, este último, indicador del contenido de materia fecal en el agua, puede producir serias repercusiones en la salud humana. Los valores normales según el decreto 475 de 1998 del ministerio de Salud, para el consumo humano, son menores de 2 (N.M.P./100 ml) tanto para las totales como para las *E. Coli*. Aquellas aguas que presentan contaminación por coliformes convencionalmente se tratan por medio de cloración.

Dureza Total (CaCO_3): La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones (Pérez P, 1997). Las definiciones usuales de la dureza están asociadas al contenido de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , sin embargo, Fe^{2+} y Mn^{2+} también contribuyen a la dureza del agua; por ello la dureza se relaciona directamente con la alcalinidad. El valor admisible es de 180 mg/l según el Ministerio de Salud, mientras que la WHO sugiere un valor recomendado de 15 a 25 mg/l para el consumo humano. El agua que contiene una dureza menor de 50 mg/l se considera suave; y se le llama agua dura aquella que presenta una dureza de 50 a 150 mg/l.

Turbidez o turbiedad: El valor permitido, para consumo humano, por el Ministerio de Salud es de 5 UNT.

Facies hidroquímicas

En segunda instancia, esta evaluación busca sugerir hipótesis relacionadas con las causas o procedencia de los constituyentes. Para ello se parte de la premisa que la composición del agua subterránea es el resultado de la interacción espacio-temporal, entre agua-litología. Con este fin, se usa como herramienta la identificación de facies hidroquímicas las cuales representan la composición predominante del agua (Feter, 1988). Las facies hidroquímicas pueden ser clasificadas con base en el ion dominante en la facie por medio de diagramas trilineales como es el caso del diagrama de Piper; también son comúnmente representadas por diagramas de Stiff (Feter, 1988).

Para determinar estas facies hidroquímicas se representan gráficamente los principales aniones y cationes presentes en el agua, tales como el Na^+ , K^+ , Cl^- , Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Mg^{2+} , SiO_4^{4-} , Fe^{2+} , SiO_2 y NO_3^- .

El diagrama de Stiff es un polígono que se grafica a partir de 4 ejes paralelos ortogonales cuyos lados se extienden a lado y lado a partir de un eje vertical. Las concentraciones de los cationes se dibujan al lado izquierdo del eje en unidades miliequivalentes por litro y los aniones, en las mismas unidades, se dibujan al lado derecho; el área de este diagrama da una idea de la cantidad de iones disueltos en la muestra de agua y cual predomina en dicha muestra. Por su parte el diagrama de Piper, permite una clasificación de las facies

hidroquímicas con base al ion dominante; este diagrama permite clasificar la muestra de agua en 6 tipos de iones dominantes divididos en cationes y aniones (Fetter 1988).

Datos y métodos

Parámetros físicos y químicos

Para el análisis de la calidad de agua en el área de estudio, se tomaron los resultados de laboratorio de 24 muestras de aguas subterráneas (se muestrearon un total de 11 aljibes y 13 pozos). La ubicación de las muestras se presentó en la Figura 6.1. Las muestras fueron colectadas por la UCO para el contrato 477-2016 con Cornare.

El muestreo fue realizado en el mes de noviembre del 2016. Las coordenadas de los puntos de muestreo se listan en la tabla 6.2. En las 24 muestras se determinaron diferentes parámetros listados en la tabla 6.3 así como se enuncian los métodos empleados para su determinación. Finalmente, los resultados reportados por el laboratorio, se presentan en las Tablas 6.4 (a, b, c y d). Es importante anotar que las muestras tomadas en los pozos corresponden a una mezcla de diferentes horizontes acuíferos, lo que implica que estos resultados deben mirarse con cuidado, al tratar de analizar un nivel acuífero particular.

Tabla 6. 2. Coordenadas de las muestras de aguas subterráneas del VSN.

MUNICIPIO	USUARIO	DESCRIPCIÓN SITIO	COORDENADAS		
			N	W	Z (msnm)
El Carmen de Viboral	Novaventa	Pozo ubicado en predio de la empresa Novaventa (Vía Rionegro-El Carmen)	06°8'19.7''	75°20'43.06''	2099
	Avinal	Pozo ubicado en predio de la empresa Avinal (Vía Rionegro-El Carmen)	06°8'39.0''	75°20'54.83''	2107
	Gustavo Hincapié	Pozo ubicado en casa 1B en Quirama (vía la Ceja-Rionegro)	06°6'33.1''	75°23'00.66''	2121
La Ceja	Productos Avícolas de Oriente Avicor	Aljibe ubicado en predio de la empresa Avicor (Vía La Ceja-La Unión)	06°01'17.66''	75°25'6.32''	2148
	Cardona Ríos Inversiones	Aljibe ubicado en predio de la empresa Cardona Ríos Inversiones (Vía La Ceja-La Unión)	06°1'18.69''	75°25'02.66''	2147
	Avícola La María	Aljibe ubicado en predio de la empresa Avícola La María (Vía La Ceja-La Unión)	06°1'18.32''	75°25'03.12''	2147
	Flores El Capiro	Pozo ubicado en predio de la empresa Flores el Capiro (Vía La Ceja- Rionegro)	06°2'10.93''	75°24'14.04''	2136
	Inmunizadora Serye	Aljibe ubicado en predio de la Inmunizadora Serye (Vía La Ceja- La Unión)	06°2'10.93''	75°24'14.04''	2161

MUNICIPIO	USUARIO	DESCRIPCIÓN SITIO	COORDENADAS		
			N	W	Z (msnm)
	Sociedad Laguna Larga	Pozo ubicado en predio de Sociedad Laguna Larga (Vía La Ceja-Rionegro, finca ganadera)	06°2′10.0″	75°24′7.58″	2132
Guarne	Senco Eurocerámica	Pozo ubicado en predio de la empresa Senco (Vía Guarne Aeropuerto)	06°15′7.68″	75°25′52.91″	2120
	Corlanc	Pozo donde se recogen las aguas provenientes del Nivel freático del predio de la empresa Corlanc ubicada en la vereda la Mosca del municipio de Rionegro	06°12′37.54″	75°23′14.28″	2112
	Flores Altagracia	Aljibe ubicado en predio de la empresa Flores Altagracia en el Municipio de Rionegro.	06°7′34.09″	75°26′54.88″	
	Tahamí # 1	Aljibe situado en la empresa Cultiflores Tahamí, por la vereda Tres puertas cercana al Aeropuerto JMC.	06°8′12.7″	75°25′35.8″	2128
	Inmunizar	Pozo ubicado en la empresa Inmunizadora Rionegro situada en la zona urbana de este municipio, por el sector de la vía al tranvía.	06°9′27.3″	75°21′56.63″	2114
	Colresin	Aljibe ubicado en la empresa Colombiana de Resinas situada en la vereda la Mosca del municipio de Rionegro.	06°11′48.46″	75°22′46.55″	2112
	Alimentos Cárnicos	Aljibe ubicado en la empresa Alimentos Cárnicos situada en la vereda La Playa del municipio de Rionegro, en la margen derecha de la autopista en sentido Bogotá – Medellín.	06°11′55.45″	75°22′50.36″	2104
	Arclad	Aljibe ubicado en la empresa Arcland situada en la vereda la Mosca del municipio de Rionegro.	06°12′17.65″	75°23′3.41″	2105
	Agropecuaria los Agapantos	Pozo Profundo ubicado en la Finca el paso en el municipio de Rionegro, en la vía que conduce al municipio de El Retiro.	06°8′21.10″	75°23′36.82″	2122
	Clínica Somer	Aljibe situado en el Sótano de la clínica Somer ubicada en la zona urbana del municipio de Rionegro	06°8′25.71″	75°22′43.40″	2100
	SIKA # 1	Pozos ubicados en las instalaciones de la empresa SIKA ubicada en el Municipio de Rionegro en la autopista en sentido Bogotá - Medellín	06°12′3.0″	75°23′4.7″	2127
	SIKA # 2		06°12′3.12″	75°23′4.65″	2126
	Marquillas	Aljibe inactivo ubicado en la empresa Marquillas S.A, ubicado en la zona urbana del municipio de Rionegro en la Calle 44ª con la Cra 50.	06°8′53.86″	75°22′16.34″	2100

MUNICIPIO	USUARIO	DESCRIPCIÓN SITIO	COORDENADAS		
			N	W	Z (msnm)
	Nacional Chocolates # 1	Pozos ubicados en los predios de la empresa Nacional de Chocolates sede Rionegro, zona urbana.	06°10'11.1''	75°21'56.16''	2088
	Nacional Chocolates # 2		06°10'25.1''	75°22'9.2''	2097

Tabla 6. 3. Parámetros medidos en las muestras de aguas subterráneas

PARÁMETRO	MÉTODO
pH	In-Situ
Temperatura	In-Situ
Conductividad eléctrica	Standard Methods 2510 B
Oxígeno disuelto	In-Situ
% de saturación de oxígeno	In-Situ
DBO5	Incubación cinco días/Oxímetro
DQO	Micro DQO
Nitrógeno Total Kjeldahl	Macrokjeldahl
Coliformes fecales	Filtración por membrana
Coliformes totales	Filtración por membrana
Turbiedad	Standard Methods 2130 B
Nitritos	Standard Methods 4500 – NO-2 B
Nitratos	Standard Methods 4500 – NO-3 E
Nitrógeno Amoniacal	Standard Methods 4500 – NH3 B,C
Hierro Total	Standard Methods 3500 Fe B
Manganeso	Standard Methods 3030 B; 3111 B-Mn
Barrido Plaguicidas	EPA 507-525.2-614-622-632.1-8140
Mercurio	DIN 38406 Parte 16, (E16) Marzo 1990
Plomo	DIN 38406 Parte 16, (E16) Marzo 1990
Alcalinidad Total	Standard Methods 2320 B
Cloruros	Standard Methods 4500 –Cl B
Sulfatos	Standard Methods 4500 – SO4-2 E
Alcalinidad Fenolftaleína	Standard Methods 2320 B

Dureza Total	Standard Methods 2340 C
Calcio	Standard Methods 3030 B; 3111 D-Ca
Magnesio	Standard Methods 3030 B; 3111 B-Mg
Potasio	Standard Methods 3030 B; 3111 B-K
Sodio	Standard Methods 3030 B; 3111 B-Na
Cadmio	DIN 38406 Parte 16 (E16) Marzo 1990
Cobre	DIN 38406 Parte 16 (E16) Marzo 1990

Tabla 6. 4. a. Resultados obtenidos en las muestras de aguas subterráneas

MUNICIPIO	USUARIO	OXÍGENO DISUELTO	SAT. OXÍGENO	TEMP. DEL AGUA	TEMP. AMBIENTE	CONDUCTIVIDAD	PH
		mg O ₂ /L	%	(°C)	(°C)	(µs/cm)	unidades de pH
Guarne	Agropecuaria los Agapantos	1,77	25,40	20,70	24,00	140,40	6,59
Guarne	Alimentos Cárnicos	2,83	41,30	21,00	27,00	138,50	6,32
Guarne	Arclad	5,35	76,20	20,30	26,00	262,00	6,09
La Ceja	Avícola La María	2,27	31,80	19,00	22,00	299,00	6,06
El Carmen de Viboral	Avinal	5,16	72,60	19,20	22,00	407,00	6,80
La Ceja	Cardona Ríos Inversiones	3,62	51,30	20,10	20,00	402,00	6,46
Guarne	Clínica Somer	5,18	73,60	20,40	22,00	122,00	6,34
Guarne	Colresin	3,91	60,70	23,40	26,00	184,20	6,00
Guarne	Corlanc	2,80	38,80	21,30	23,00	96,30	5,47
Guarne	Flores Altagracia	3,04	44,70	20,40	33,00	399,00	5,86
La Ceja	Flores El Capiro	2,14	30,00	20,00	23,00	1700,00	8,25
El Carmen de Viboral	Gustavo Hincapié	5,06	75,80	23,00	24,00	80,50	6,30
La Ceja	Inmunizadora Serye	2,36	38,90	22,40	24,00	149,60	6,70
Guarne	Inmunizar	1,86	27,90	22,40	24,00	100,80	5,71

Guarne	Marquillas	2,38	35,90	22,00	25,00	158,10	6,08
Guarne	Nal Chocolates # 1	1,86	26,60	20,80	27,00	189,20	5,98
Guarne	Nal Chocolates # 2	4,69	67,60	20,90	26,00	415,00	7,16
El Carmen de Viboral	Novaventa	3,41	48,50	20,80	22,00	213,00	6,61
La Ceja	Productos Avicor	6,55	93,90	20,20	26,00	1078,00	7,11
Guarne	Senco Eurocerámica	1,25	17,60	19,20	19,10	62,10	8,00
Guarne	SIKA # 1	4,07	56,30	19,00	25,00	335,00	6,96
Guarne	SIKA # 2	4,06	58,10	18,40	27,00	365,00	7,14
La Ceja	Soc. Laguna Larga	2,61	38,70	20,30	24,00	40,30	6,70
Guarne	Tahamí # 1	2,21	31,90	20,20	24,00	300,00	5,78

Tabla 6. 5.b. Resultados obtenidos en las muestras de aguas subterráneas

MUNICIPIO	USUARIO	DEMANDA BIOQUÍMICA OXÍGENO	DEMANDA QUÍMICA OXÍGENO	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES	NITRÓGENO TOTAL	NITRITOS	NITRATOS
		(mgO ₂ /L)	(mgO ₂ /L)	(U.F.C/100 ml)	(U.F.C/100 ml)	mg/L N	(mg/L NO ₂ -N)	(mg/L NO ₃ -N)
Guarne	Agropecuaria los Agapantos	4,00	10,00	80,00	64,00	1,00	0,00	11,12
Guarne	Alimentos Cárnicos	4,00	10,00	103,00	0,00	1,00	0,00	0,54
Guarne	Arclad	4,00	10,00	80,00	21,00	1,00	0,00	1,39
La Ceja	Avícola La María	4,00	10,00	80,00	28,00	1,00	0,02	48,24
El Carmen de Viboral	Avinal	4,00	20,30	52,00	0,00	1,00	0,00	3,10
La Ceja	Cardona Ríos Inversiones	4,00	22,00	80,00	153,00	1,00	0,01	72,22
Guarne	Clínica Somer	4,00	10,00	63,00	0,00	1,00	0,00	13,87
Guarne	Colresin	24,40	51,60	80,00	0,00	1,00	0,01	3,88

Guarne	Corlanc	4,00	10,00	46,00	1,00	1,00	0,00	2,24
Guarne	Flores Altagracia	4,00	10,00	80,00	0,00	1,00	0,00	89,28
La Ceja	Flores El Capiro	4,00	10,00	23,00	0,00	1,00	0,00	0,44
El Carmen de Viboral	Gustavo Hincapié	4,00	10,00	45,00	0,00	1,00	0,00	11,15
La Ceja	Inmunizadora Serye	4,00	22,00	80,00	80,00	1,00	0,01	11,88
Guarne	Inmunizar	4,00	10,00	80,00	0,00	1,00	0,00	1,78
Guarne	Marquillas	4,00	23,10	80,00	0,00	1,26	0,00	0,44
Guarne	Nal Chocolates # 1	4,00	11,40	71,00	0,00	1,00	0,00	11,49
Guarne	Nal Chocolates # 2	4,40	92,20	113,00	0,00	1,00	0,00	11,26
El Carmen de Viboral	Novaventa	4,00	10,00	28,00	0,00	1,00	0,00	1,43
La Ceja	Productos Avicor	4,00	10,00	80,00	38,00	1,00	0,00	125,35
Guarne	Senco Eurocerámica	4,00	13,40	80,00	150,00	1,29	0,00	0,44
Guarne	SIKA # 1	4,00	10,00	80,00	7,00	1,00	0,00	13,39
Guarne	SIKA # 2	4,00	10,00	80,00	0,00	1,00	0,00	11,76
La Ceja	Soc. Laguna Larga	4,00	13,10	80,00	0,00	1,00	0,00	0,44
Guarne	Tahamí # 1	4,00	10,00	80,00	18,00	1,00	0,00	44,37

Tabla 6.4.c. Resultados obtenidos en las muestras de aguas subterráneas

MUNICIPIO	USUARIO	TURBIDIDAD	HIERRO TOTAL	PLOMO	MANGANESO	ALCALINIDAD TOTAL	DUREZA TOTAL
		(U.N.T)	(mg/L Fe)	(µg/L Pb)	(mg/L Mn)	(mg/L CaCO3)	(mg/L CaCO3)
Guarne	Agropecuaria los Agapantos	0,25	0,31	0,53	0,05	67,87	61,95
Guarne	Alimentos Cárnicos	6,50	0,10	0,69	0,05	70,91	63,59
Guarne	Arclad	23,00	7,50	0,46	0,29	70,26	81,13
La Ceja	Avícola La María	15,00	2,36	0,46	0,05	46,88	96,92

El Carmen de Viboral	Avinal	0,25	0,16	0,46	0,05	96,44	112,70
La Ceja	Cardona Ríos Inversiones	2,70	0,62	0,46	0,05	59,94	122,39
Guarne	Clínica Somer	0,40	0,27	0,46	0,05	38,90	124,39
Guarne	Colresin	0,40	0,15	0,46	0,08	36,35	61,10
Guarne	Corlanc	0,25	0,19	0,46	0,05	21,69	34,67
Guarne	Flores Altagracia	0,60	0,38	0,46	0,05	14,46	52,45
La Ceja	Flores El Capiro	0,90	0,39	0,51	0,05	152,84	33,47
El Carmen de Viboral	Gustavo Hincapié	0,80	0,44	1,17	0,05	40,99	41,96
La Ceja	Inmunizadora Serye	10,00	2,50	0,46	0,05	60,24	70,44
Guarne	Inmunizar	0,25	0,12	1,30	0,05	125,82	55,95
Guarne	Marquillas	85,00	10,58	0,46	0,44	47,22	62,45
Guarne	Nal Chocolates # 1	50,00	8,42	0,46	0,30	33,91	99,41
Guarne	Nal Chocolates # 2	5,60	0,95	0,46	0,08	119,48	19,48
El Carmen de Viboral	Novaventa	1,00	0,26	0,72	0,08	88,61	80,78
La Ceja	Productos Avicor	3,30	0,49	0,46	0,05	51,66	197,18
Guarne	Senco Eurocerámica	180,00	1,49	1,34	0,38	22,19	21,68
Guarne	SIKA # 1	0,30	0,10	0,46	0,05	139,73	151,37
Guarne	SIKA # 2	0,30	0,41	0,70	0,05	177,98	171,35
La Ceja	Soc. Laguna Larga	75,00	0,83	0,46	0,10	10,27	0,00
Guarne	Tahamí # 1	0,30	0,15	0,46	0,05	16,16	194,83

Tabla 6.4.d. Resultados obtenidos en las muestras de aguas subterráneas

MUNICIPIO	USUARIO	Cloruros	Sulfatos	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Cadmio	Cobre	Bicarbonatos CaCO ₃ *1,22
		(mg/L Cl ⁻)	(mg/L SO ₄ 2)	(mg/L Ca)	(mg/L Mg)	(mg/L K)	(mg/L Na)	(µg/L Cd)	(µg/L Cu)	Mg/L
Guarne	Agropecuaria los Agapantos	1,00	2,00	9,88	2,59	10,80	11,50	0,04	2,75	82,80
Guarne	Alimentos Cárnicos	4,80	2,00	13,50	2,85	12,10	6,98	0,43	0,23	86,51
Guarne	Arclad	32,59	9,64	16,00	3,64	12,80	21,90	0,40	0,23	85,72
La Ceja	Avícola La María	19,80	11,04	23,00	1,98	25,60	11,50	0,50	0,23	57,19
El Carmen	Avinal	63,89	2,87	34,50	1,06	13,90	40,70	0,35	0,23	117,66
La Ceja	Cardona Ríos Inversiones	22,59	15,52	33,90	2,33	32,70	12,90	0,58	0,23	73,13
Guarne	Clínica Somer	7,50	4,41	8,27	1,63	16,60	8,28	2,97	0,52	47,46
Guarne	Colresin	18,60	11,43	11,40	3,15	4,59	12,00	0,52	2,24	44,35
Guarne	Corlanc	6,30	10,34	7,57	1,70	0,95	8,83	0,31	1,39	26,46
Guarne	Flores Altagracia	11,00	3,24	7,26	2,07	10,50	8,85	0,48	1,77	17,64
La Ceja	Flores El Capiro	267,44	265,04	4,54	0,31	10,00	340,00	0,22	0,23	186,46
El Carmen	Gustavo Hincapié	3,00	2,00	7,53	1,20	14,13	4,39	0,14	3,88	50,01
La Ceja	Inmunizadora Serye	4,40	2,04	18,90	1,13	11,40		0,48	13,94	73,49
Guarne	Inmunizar	6,20	2,00	7,86	2,16	10,90	7,81	0,29	2,86	153,50
Guarne	Marquillas	7,50	2,00	15,50	1,76	14,00	9,54	2,49	0,92	57,61
Guarne	Nal Chocolates # 1	9,80	32,02	11,70	2,74	5,32		0,23	5,25	41,37
Guarne	Nal Chocolates # 2	22,99	18,53	2,58	0,21	8,07	90,90	0,07	0,23	145,77
El Carmen	Novaventa	12,80	2,00	22,00	1,88	16,40	15,40	0,37	0,26	108,10
La Ceja	Productos Avicor	123,27	109,54	50,20	6,32	148,00	38,80	1,28	0,23	63,03
Guarne	Senco Eurocerámica	5,50	5,19	4,90	0,83	17,90	8,95	0,15	1,85	27,07

Guarne	SIKA # 1	13,40	4,24	39,70	3,31	6,96		0,47	4,47	170,47
Guarne	SIKA # 2	11,50	2,00	44,00	4,73	6,97		0,33	4,32	217,14
La Ceja	Soc. Laguna Larga	7,20	2,00	1,99	0,38	11,50	6,95	0,13	0,92	12,53
Guarne	Tahamí # 1	6,10	2,51	7,19	3,03	6,52	5,86	0,39	0,83	19,72

Control de calidad: Balance iónico

Frente a la necesidad del aseguramiento/control de calidad del trabajo analítico en la química del recurso hídrico, el cálculo del balance de iones resulta un procedimiento simple, preciso y cuyos datos son fáciles de interpretar; el mismo que provee una medida clara de la calidad analítica y, en algunos casos, permite ubicar errores analíticos al comparar los imbalances y datos de regresión inter-iones (Knights and Stenner, 1999).

El balance de iones es la verificación de que la suma de mili-equivalentes (meq) de aniones es aproximadamente igual a la suma de mili-equivalentes de cationes; esto último aprovechando la electro-neutralidad del agua, propiedad que puede distorsionarse si existen ciertos fenómenos, ocasionando el conocido y problemático imbalance de iones.

Existen varios criterios para definir cuando un balance está dentro de los rangos admisibles; algunos autores sugieren errores del 5 % como los máximos deseables, aunque en la literatura se menciona que el error admisible está en función de la conductividad que presenta el agua subterránea, siendo aceptables valores de hasta del 30% de error cuando la conductividad eléctrica alcanza valores de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El imbalance (ocasionado por errores altos) sugiere que el análisis químico puede estar incompleto, ser impreciso, o que las muestras han experimentado cambios químicos durante el tiempo de transporte desde el campo al laboratorio.

En el caso de las 24 muestras analizadas, se obtuvieron valores aceptables en su balance iónico; en la Tabla 6.5 se muestran los resultados obtenidos para cada muestra analizada.

Facies hidroquímicas

Para cada muestra de agua tomada en la zona de estudio se realizaron sus correspondientes diagramas de Stiff y de Piper con el fin de determinar las diferentes facies hidroquímicas.

La configuración de los diagramas Stiff, utilizados para el análisis de las muestras de agua subterránea, se presenta en la Figura 6.2, allí el eje horizontal superior representa a la izquierda las mayores concentraciones de la suma de los cationes de Sodio (Na^{2+}) y Potasio (K^{+}) y a la derecha, del Cloruro (Cl^{-}); el eje central permite identificar las mayores concentraciones de Calcio (Ca^{2+}) a la izquierda y de Sulfatos (SO_4) a la derecha; así mismo, el eje inferior muestra hacia la izquierda valores de Magnesio (Mg^{2+}) y a la derecha de bicarbonatos (HCO_3). En la tabla 6.5, presenta también las facies asociadas a cada una de

las muestras de agua subterránea recolectadas. Esta es la clasificación obtenida a partir de estos análisis, y cuya representación gráfica se presenta en la sección de resultados.

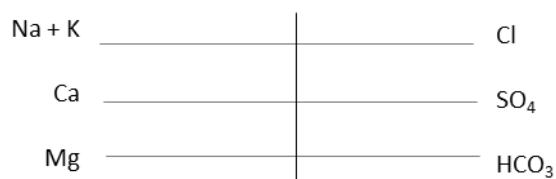


Figura 6. 2. Configuración de los ejes de diagramas Stiff utilizados en el análisis.

Tabla 6. 5. Balance iónico para las muestras de aguas subterráneas

MUNICIPIO	USUARIO	%HCO ₃	%SO ₄	%Cl	%Na+K	%Ca	%Mg	Balance	Facie
Guarne	Agropecuaria los Agapantos	95.10	2.92	1.98	64.36	40.87	17.67	-3.63	Bicarbonatada sódica
Guarne	Alimentos Cárnicos	88.90	2.61	8.49	50.59	55.59	19.35	-2.52	Bicarbonatada cálcica
Guarne	Arclad	55.64	7.95	36.41	62.42	38.94	14.61	1.91	Bicarbonatada sódica
La Ceja	Avícola La María	54.32	13.32	32.36	63.78	63.38	9.00	0.91	Bicarbonatada cálcica
El Carmen de	Avinal	50.88	1.58	47.55	59.39	48.10	2.44	1.29	Bicarbonatada sódica
La Ceja	Cardona Ríos Inversiones	55.52	14.97	29.52	57.17	69.20	7.84	-0.31	Bicarbonatada cálcica
Guarne	Clínica Somer	71.94	8.49	19.57	86.52	45.50	14.79	1.37	Bicarbonatada sódica
Guarne	Colresin	48.80	15.98	35.22	47.36	42.14	19.20	-2.62	Clorurada sódica
Guarne	Corlanc	52.46	26.04	21.50	45.28	41.89	15.51	3.88	Bicarbonatada cálcica
Guarne	Flores Altagracia	43.36	10.12	46.53	71.22	39.48	18.56	-27.43	Clorurada sódica
La Ceja	Flores El Capiro	18.96	34.24	46.80	100.02	1.51	0.17	-2.59	Clorurada sulfatada
El Carmen de	Gustavo Hincapié	86.65	4.40	8.95	83.00	56.47	14.84	-3.84	Bicarbonatada sódica
La Ceja	Inmunizadora Serye	87.85	3.10	9.05	28.14	91.03	8.97	-4.89	Bicarbonatada cálcica
Guarne	Inmunizar	92.08	1.52	6.40	67.99	43.12	19.54	-39.67	Bicarbonatada sódica
Guarne	Marquillas	78.85	3.48	17.67	57.98	58.01	10.86	26.43	Bicarbonatada sódica
Guarne	Nacional Chocolates # 1	41.82	41.12	17.05	16.81	72.14	27.86	-18.32	Sulfatada
Guarne	Nacional Chocolates # 2	69.79	11.27	18.94	101.47	3.14	0.43	9.26	Bicarbonatada sódica
El Carmen de	Novaventa	81.48	1.91	16.60	56.66	57.11	8.05	3.38	Bicarbonatada sódica
La Ceja	Avicor	15.21	33.59	51.20	116.13	53.15	11.03	-1.71	Clorurada sódica
Guarne	Senco Eurocerámica	62.77	15.29	21.95	120.61	34.81	9.76	25.91	Bicarbonatada sódica
Guarne	SIKA # 1	85.70	2.71	11.59	7.90	87.91	12.09	-17.61	Bicarbonatada cálcica
Guarne	SIKA # 2	90.67	1.06	8.27	6.90	84.94	15.06	-19.39	Bicarbonatada cálcica
La Ceja	Sociedad Laguna Larga	45.62	9.25	45.12	137.89	22.96	7.15	24.65	Clorurada sódica
Guarne	Tahamí # 1	59.02	9.55	31.43	48.86	41.57	28.89	-9.91	Bicarbonatada cálcica

Análisis geoquímicos de las muestras de agua

Resultados

Con el propósito de establecer tendencias de comportamiento de las variables, e identificar agrupaciones de valores por sectores, así como la presencia de anomalías puntuales, se elaboraron mapas asociados a los resultados de los parámetros físico-químicos. Dada la baja densidad de muestreo, y teniendo en cuenta que las mediciones son solamente representativas para la fecha de medición, no se procedió a generar

interpolaciones para la mayoría de las variables. Sólo se hizo interpolación para algunos de los parámetros físicos del agua.

Las siguientes contienen los mapas de las diferentes variables. La interpretación correspondiente o la identificación de anomalías de valores se presenta acompañando cada mapa.

Temperatura: La interpolación se ha restringido al sector con datos (rectángulo negro, Figura 6.3). Las temperaturas registran poca variación y no tienen una tendencia espacial muy definida; en términos regionales, las temperaturas se hacen ligeramente más frías hacia el sur occidente del sector, seguramente relacionado con la elevación topográfica.

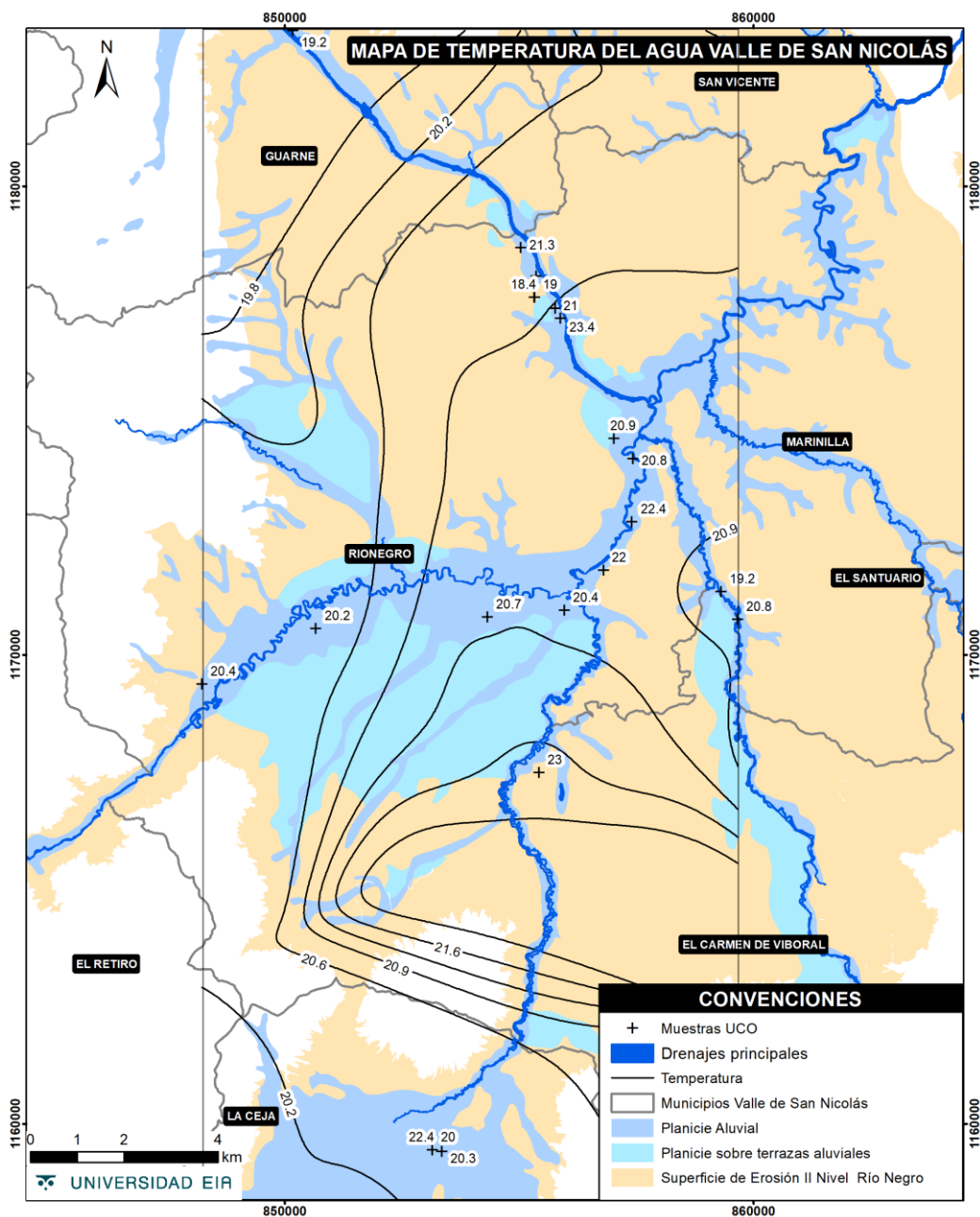


Figura 6. 3. Mapa de isótermas de temperatura del agua subterránea.

P.H: En general para el pH, se tiene que los valores óptimos son aquellos más cercanos a pH=7, por su condición de neutralidad. El pH evaluado en la zona de estudio, sugiere la presencia de aguas ligeramente ácidas (principalmente en las cercanías de Rionegro y Guarne), solamente se registró un valor asociado a aguas básicas en el municipio de la Ceja (Figura 6.4).

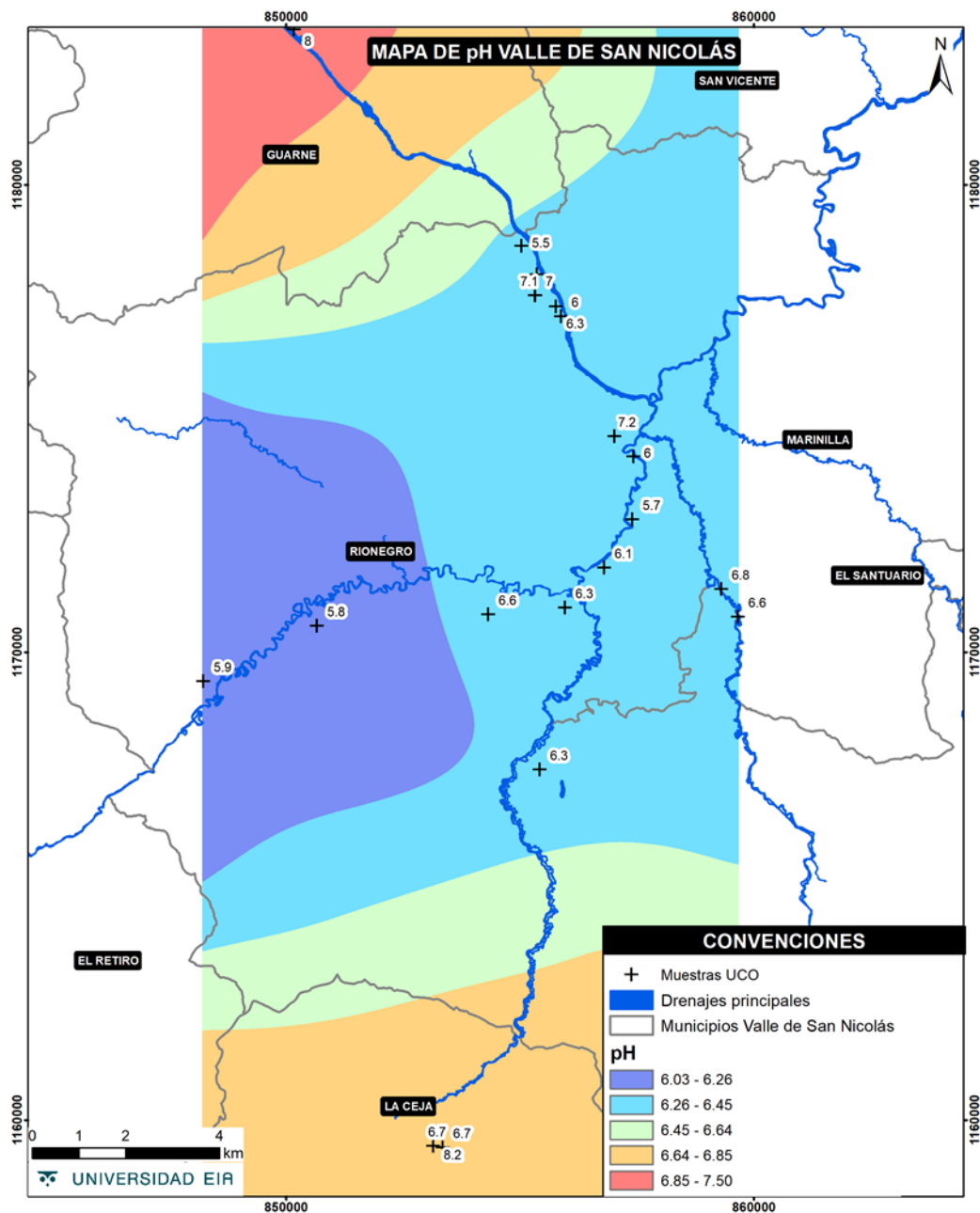


Figura 6. 4. Mapa de variación del pH del agua subterránea del VSN.

Turbiedad: La Figura 6.5 expone que en la mayoría de los casos las muestras presentan valores pequeños de turbiedad y que se encuentran dentro de los rangos admisibles por el Ministerio de Salud para el consumo humano (<5 mg/l). Existen algunas localidades donde el valor es anómalo tal como se resume en la tabla pequeña en la parte superior de la imagen.

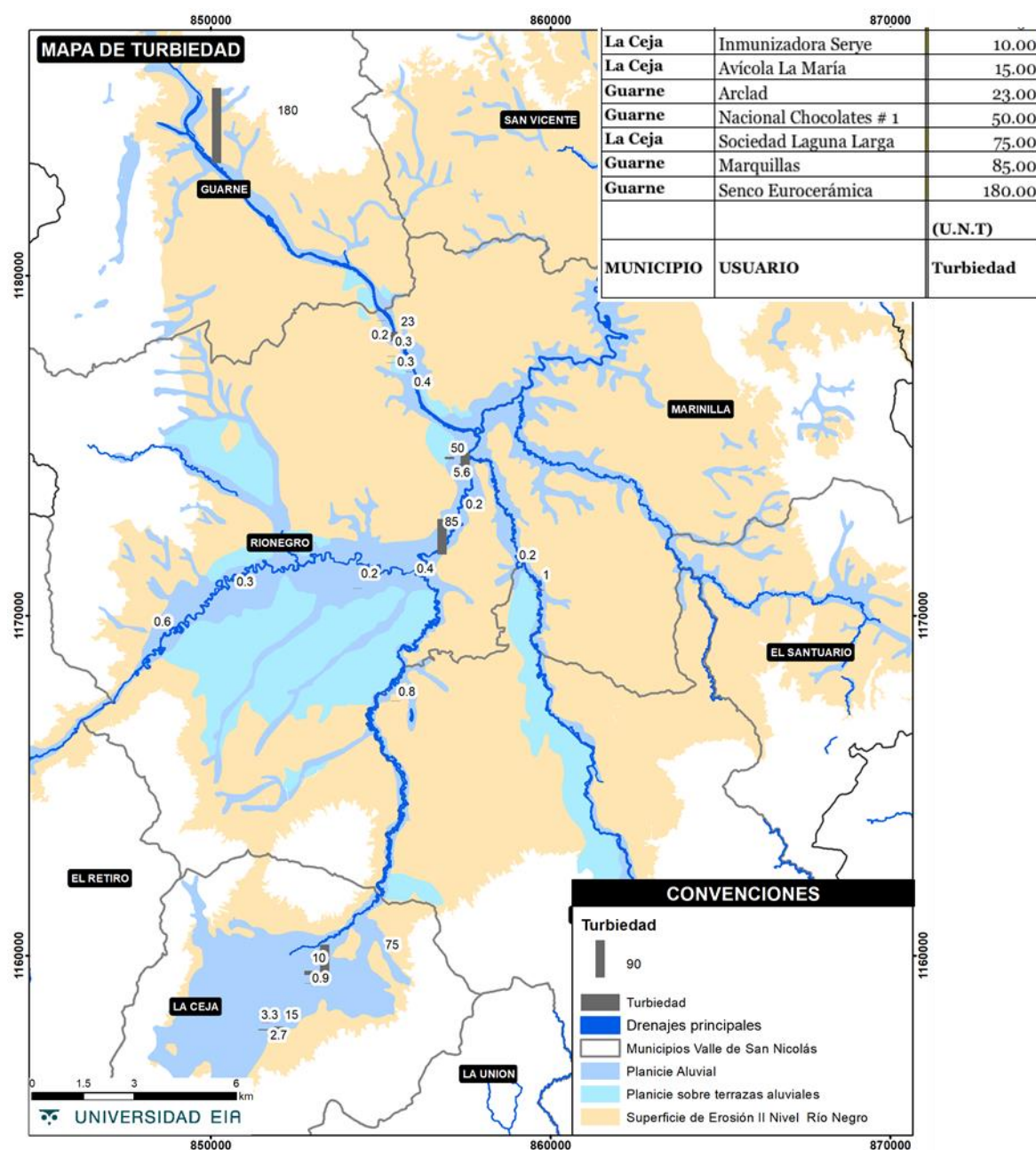


Figura 6. 5. Mapa de concentraciones de Turbiedad de las aguas subterráneas.

Dureza: Para el consumo humano el Ministerio de Salud en Colombia recomienda valores entre 30 y 150 mg/l. La tabla en la parte superior de la Figura 6.6, resume aquellos lugares donde se sobrepasa el valor. Sin embargo, en estos lugares el uso dado actualmente es industrial.

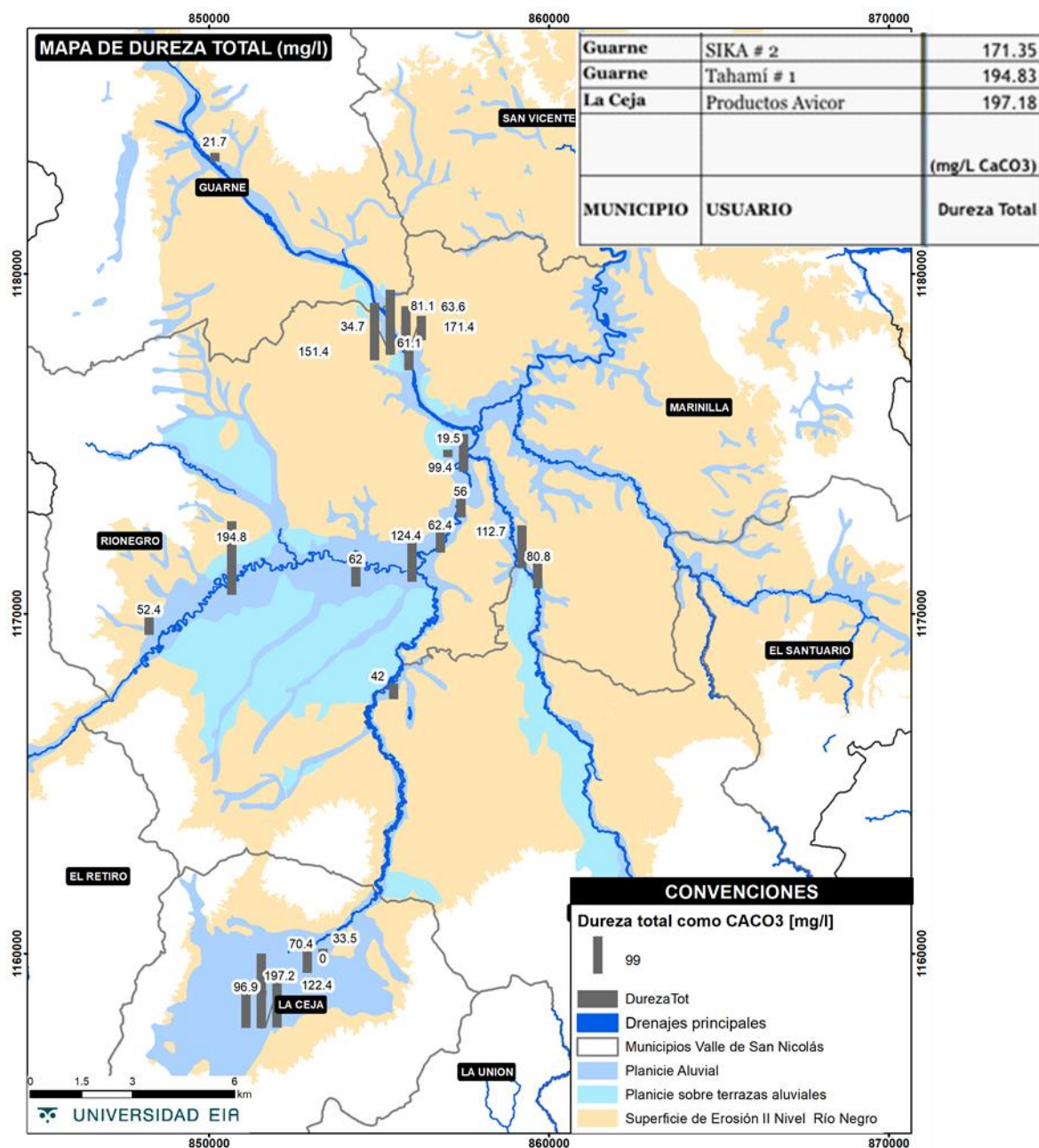


Figura 6. 6. Mapa de concentraciones de Dureza de las aguas subterráneas.

Hierro: Concentraciones de hierro mayores a 5 mg/l pueden afectar a las plantas, la tabla de la Figura 6.7, resume los usuarios con anomalías de hierro mayores a 5 mg/l. El valor permitido según el decreto 2105 para consumo humano es de 0.3 mg/l, nótese como en general las aguas subterráneas objeto de estudio indican valores muy bajos de este parámetro.

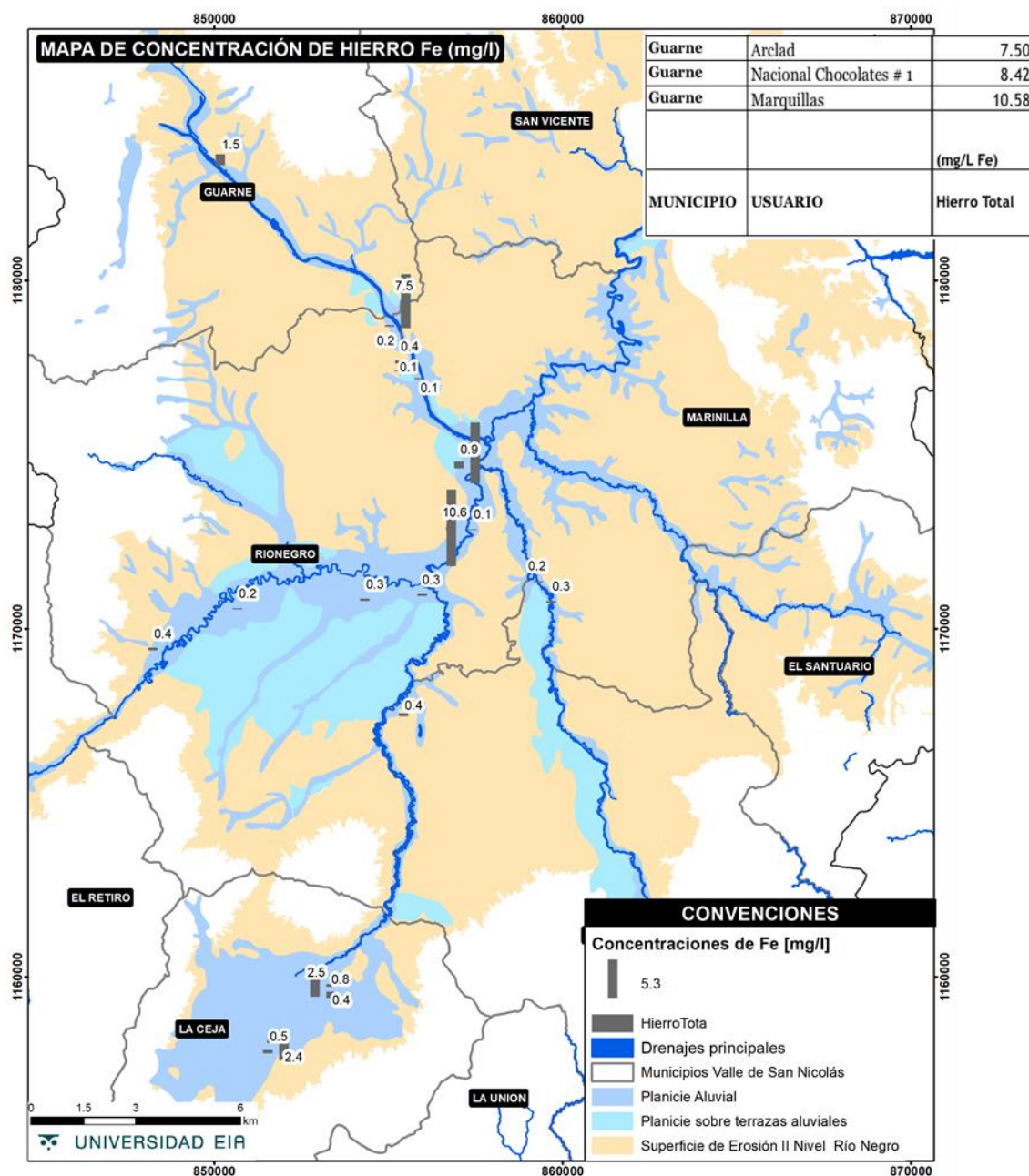


Figura 6. 7. Mapa de concentración del hierro.

Nitratos: La alta concentración de Nitratos se relaciona con contaminación de los acuíferos como consecuencia de la infiltración de aguas contaminadas en superficie. El límite saludable según Ministerio de Salud es >45 g/l, tres muestras superan estos valores (tabla en la esquina superior de la Figura 6.8) y ponen en evidencia la vulnerabilidad del acuífero a ser contaminado por las actividades antrópicas en superficie.

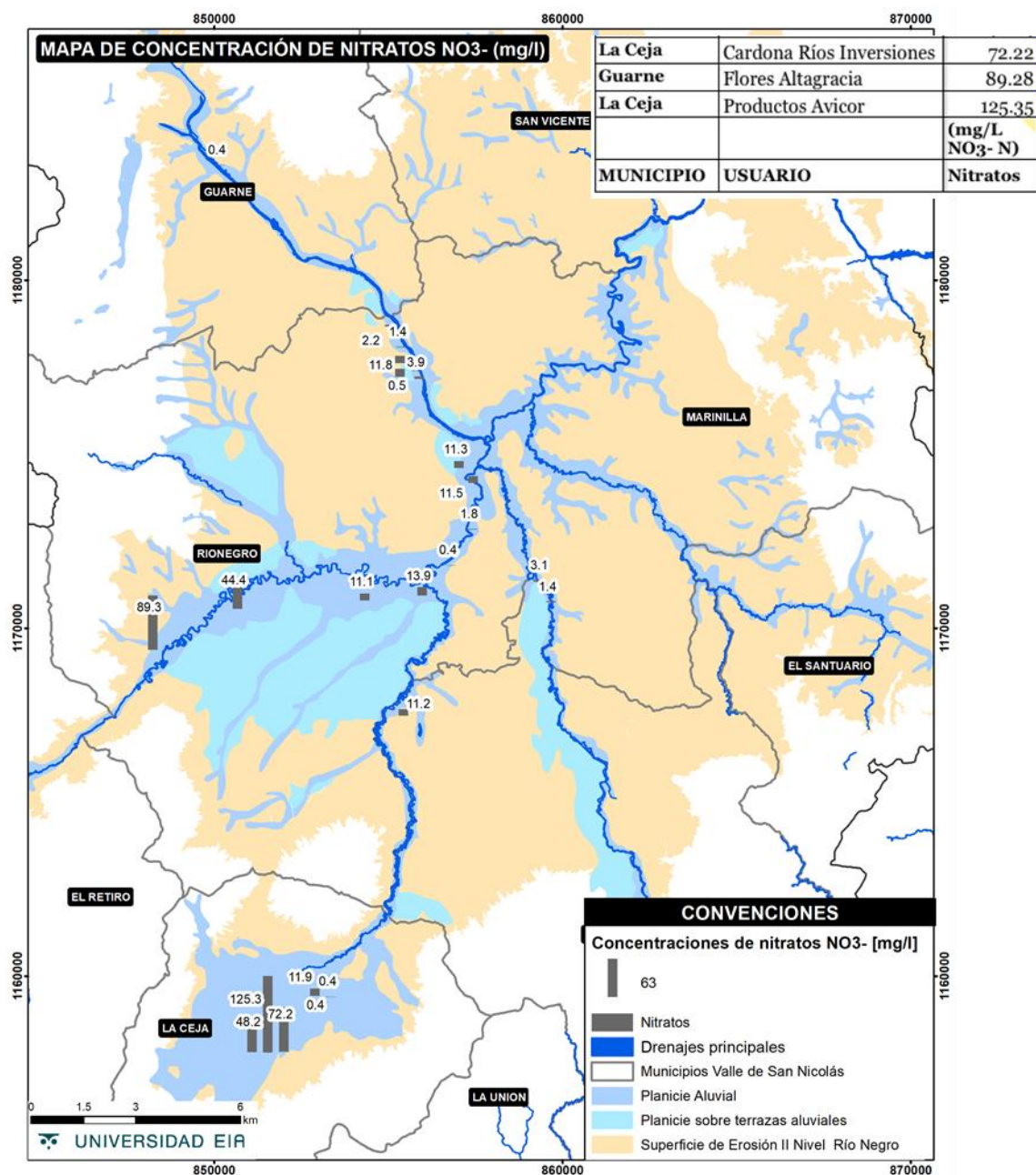


Figura 6. 8. Mapa de concentración de Nitratos.

Potasio: Nótese como muchos valores sobrepasan 10 mg/l, el cual es el valor máximo permitido, esto es evidencia de contaminación de aguas subterráneas por efecto de aguas residuales. Los valores más críticos se presentan en las muestras pertenecientes al municipio de La Ceja (Figura 6.9).

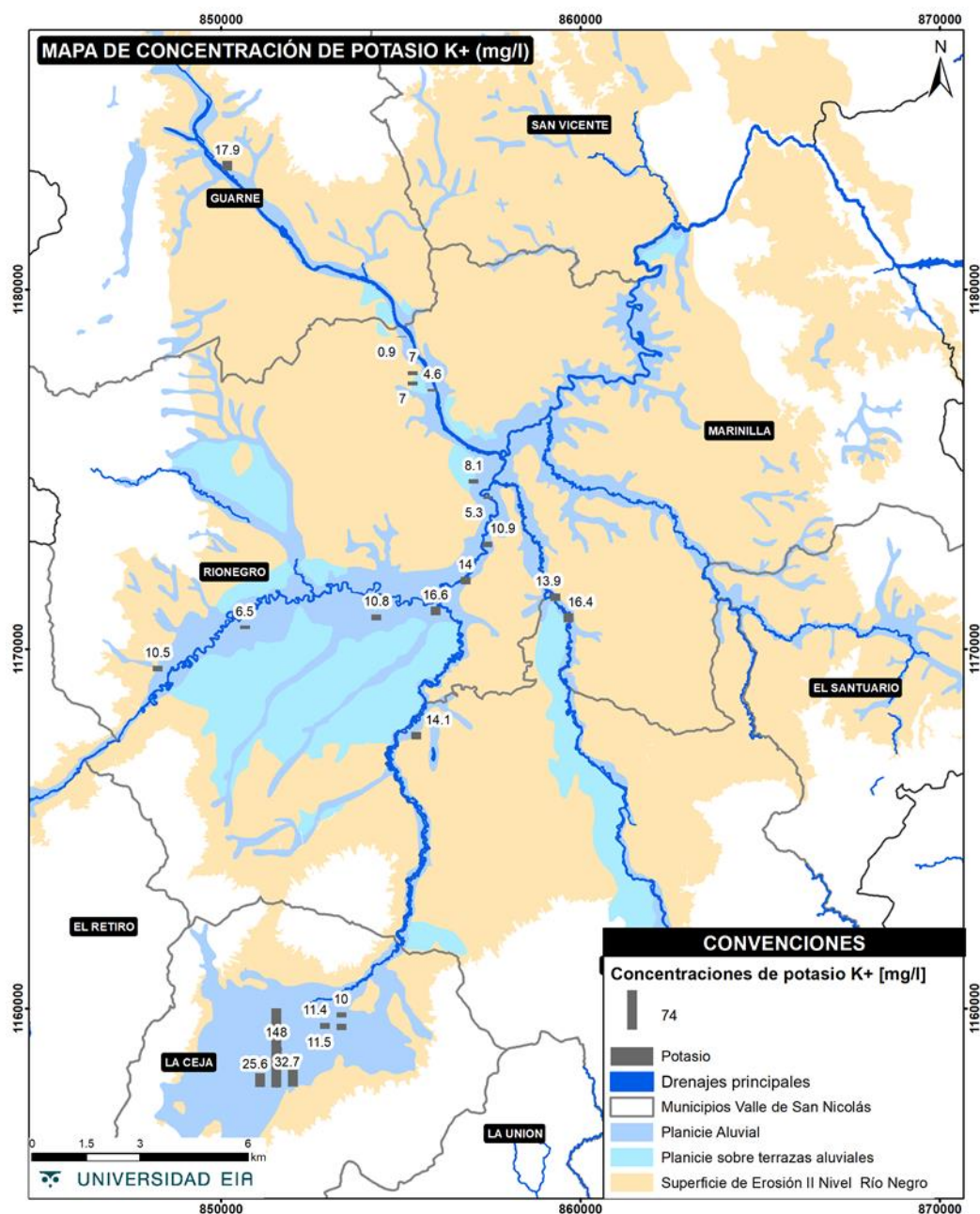


Figura 6. 9. Mapa de concentración de Potasio.

Sodio: Nótese en la Figura 6.10 como solamente una muestra, ubicada en la Ceja, presenta valores altos de Sodio (340 mg/l); este valor es consistente con el valor de conductividad típicamente elevado reportado para este mismo lugar. Sería necesario establecer si esto se debe a causas naturales o antrópicas.

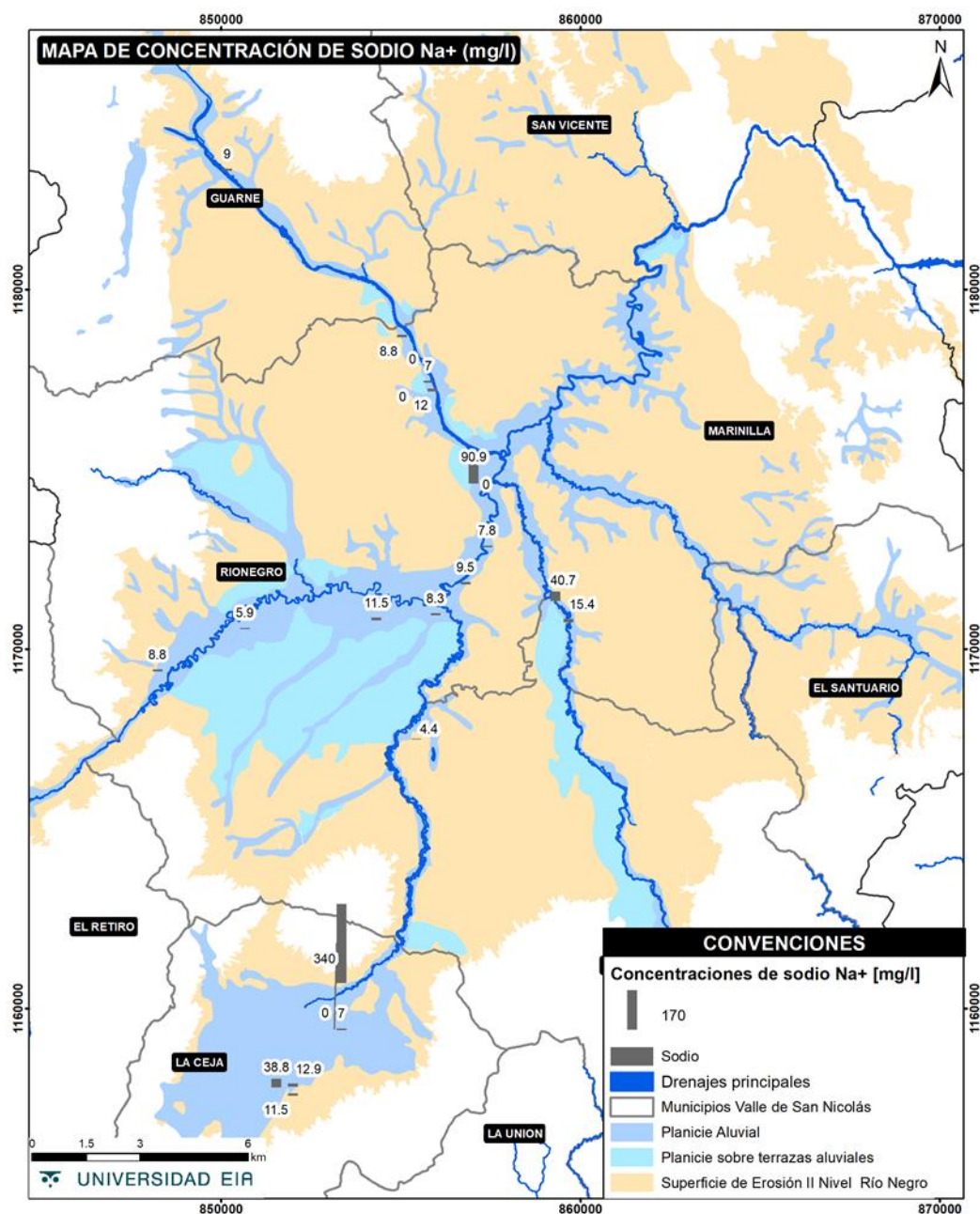


Figura 6. 10. Mapa de concentración del Sodio (Na).

Bicarbonatos: El mapa de la Figura 6.11 muestra que no se presenta una tendencia espacial para la distribución de valores de la concentración de bicarbonatos. Sin embargo existen dos áreas donde la mayoría de las muestras presentan valores mayores al promedio, una de las áreas se ubica al sur de Guarne y la otra, en la Ceja.

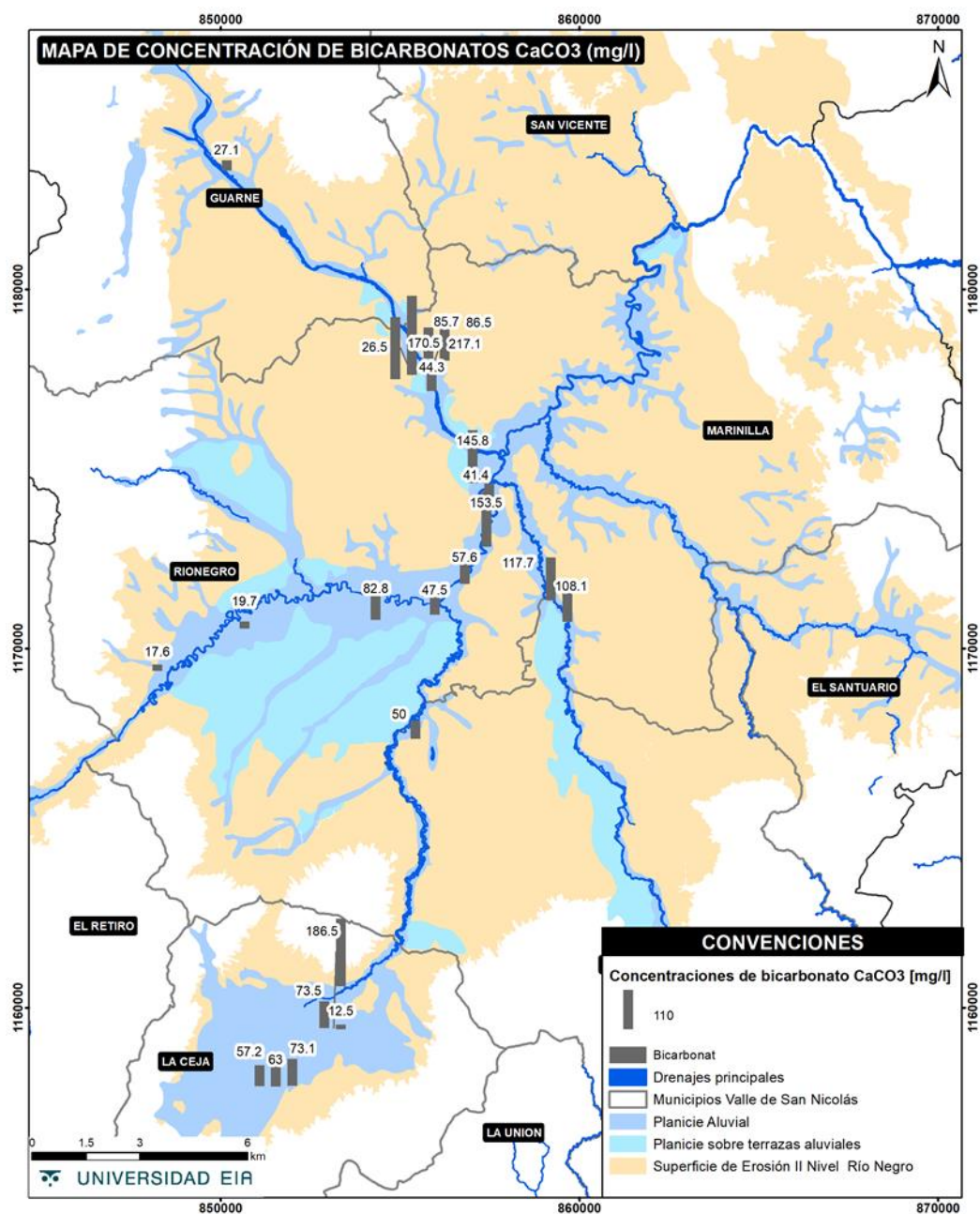


Figura 6. 11. Mapa de distribución espacial de valores de bicarbonatos en las aguas subterráneas.

Sulfatos: El único valor anómalamente alto se registra en la Ceja, en el mismo lugar donde se presentan valores altos para otros parámetros tales como conductividad y Sodio (Figura 6.12).

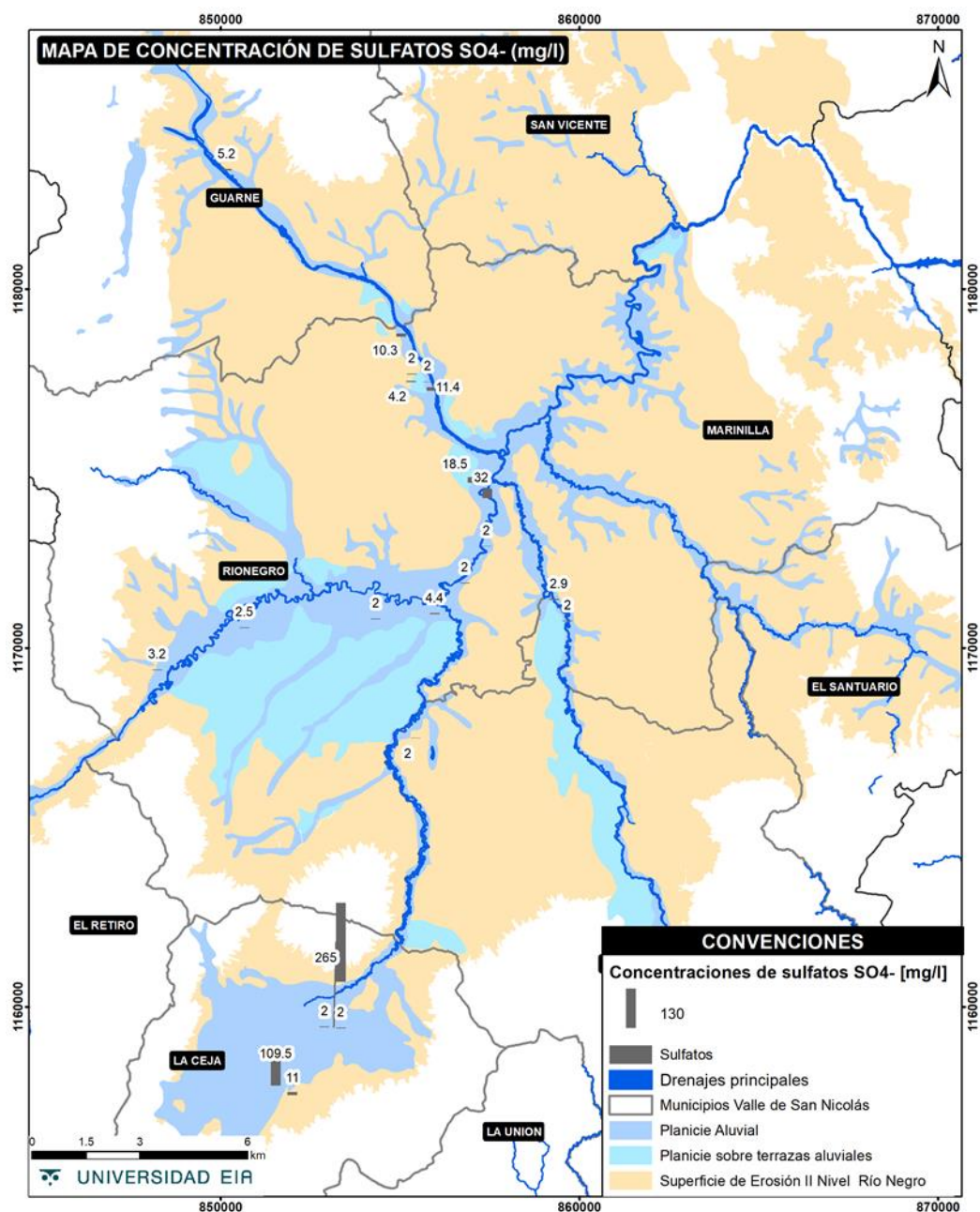


Figura 6. 12. Mapa de concentración de sulfatos.

Cloruros: El valor máximo permitido es 250 mg/l para el consumo humano, según Ministerio de Ambiente. Este valor solamente es excedido en la muestra tomada en Flores el Capiro, la Ceja (Figura 6.13).

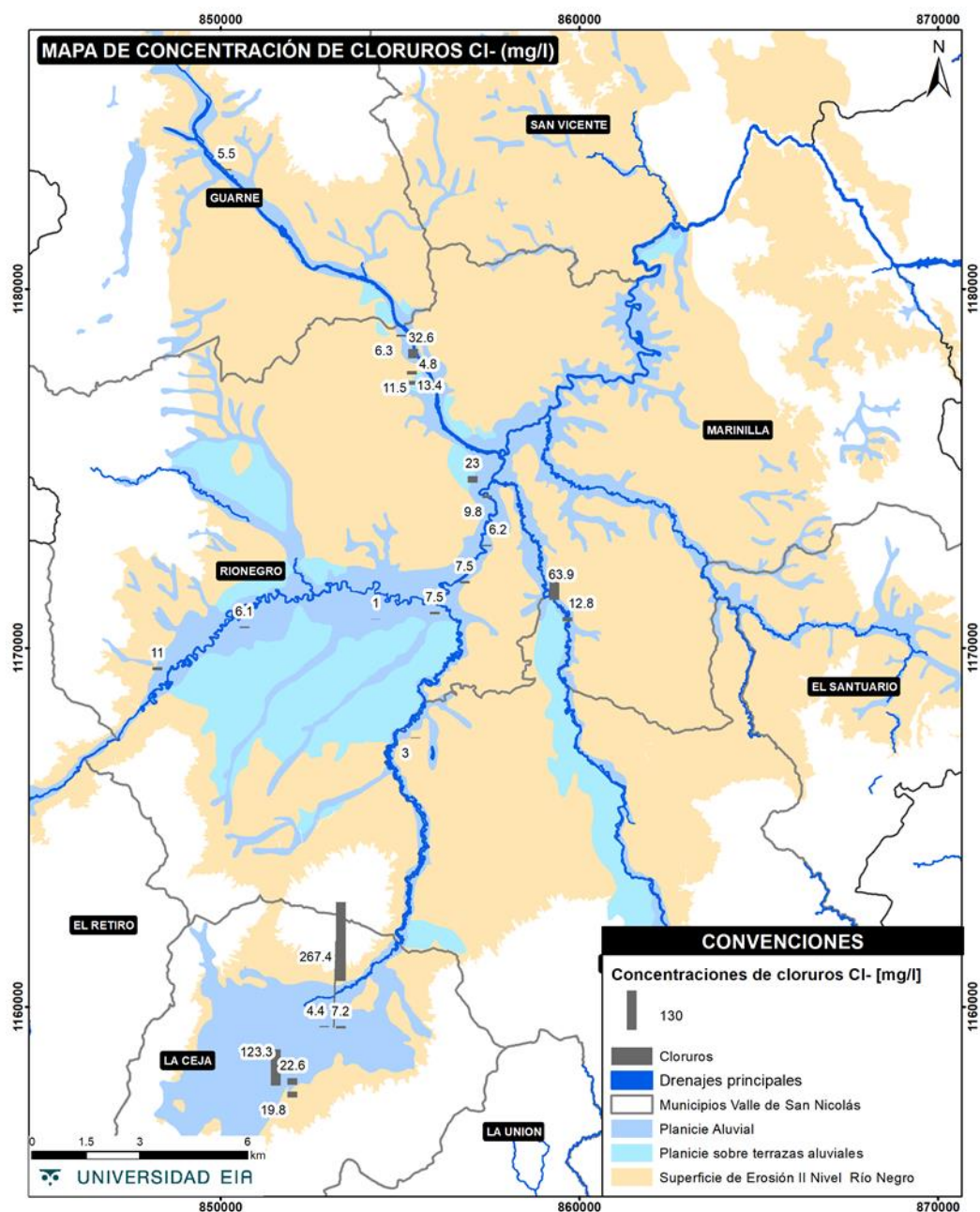


Figura 6. 13. Mapas de concentración de Cloruros.

Calcio: Ninguna de las muestras analizadas superan los valores máximos admisibles sugeridos por Ministerio del Medio Ambiente que es de 60 mg/l (Figura 6.14).

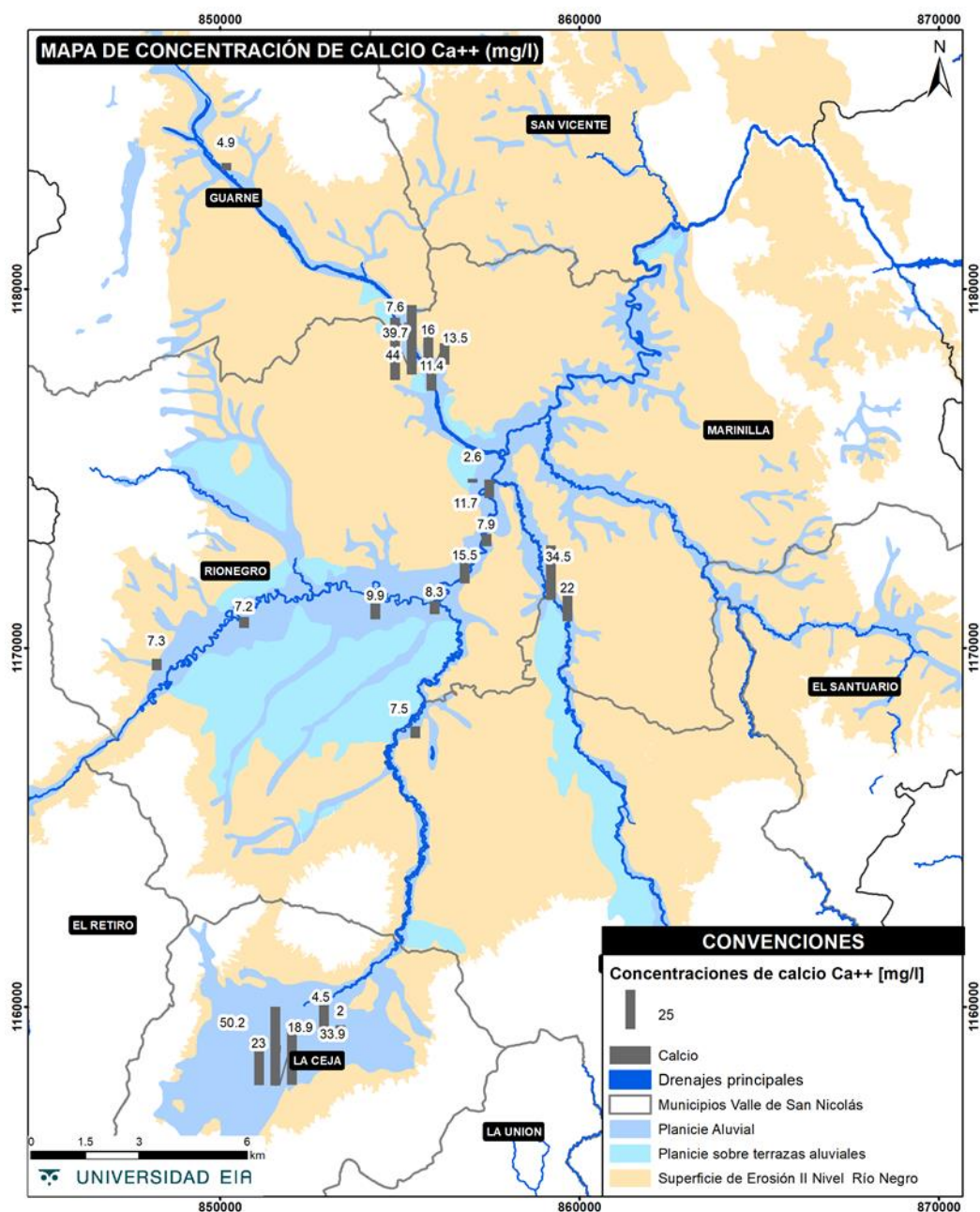


Figura 6. 14. Mapa de concentración del Calcio.

Magnesio: Ninguno de los valores reportados supera el valor máximo admisible de 36 mg/l, fijado por el Ministerio del Medio Ambiente. Este elemento no representa una amenaza por contaminación en las aguas subterráneas evaluadas (Figura 6.15).

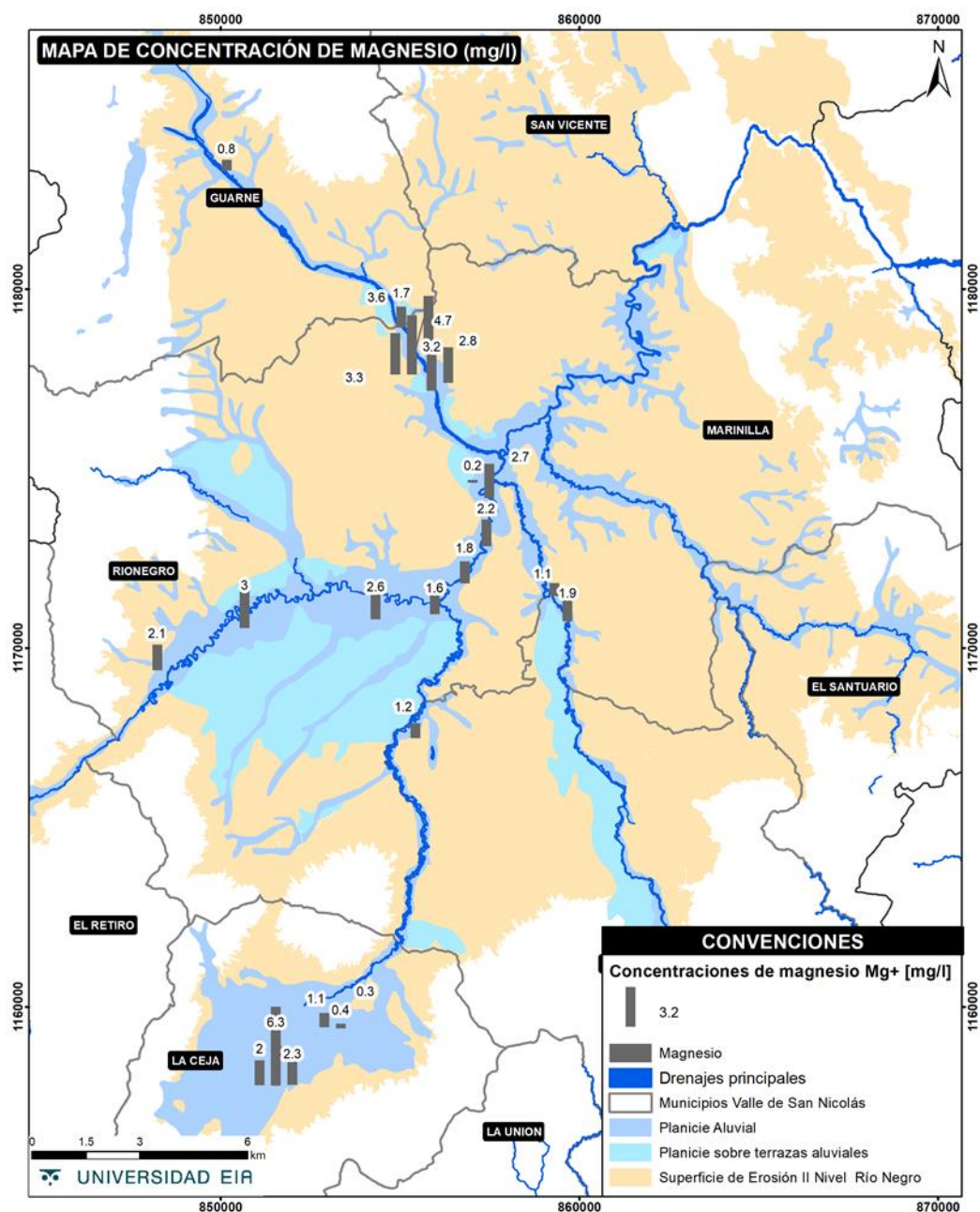


Figura 6. 15. Mapa de concentración de magnesio.

Manganeso: El valor máximo admisible por el Ministerio de Medio Ambiente es de 0.1 mg/l para uso humano y 0.2 mg/l para uso agrícola. Cuatro locaciones, en el municipio de Guarne, superan este valor (tabla en la parte superior de la Figura 6.16).

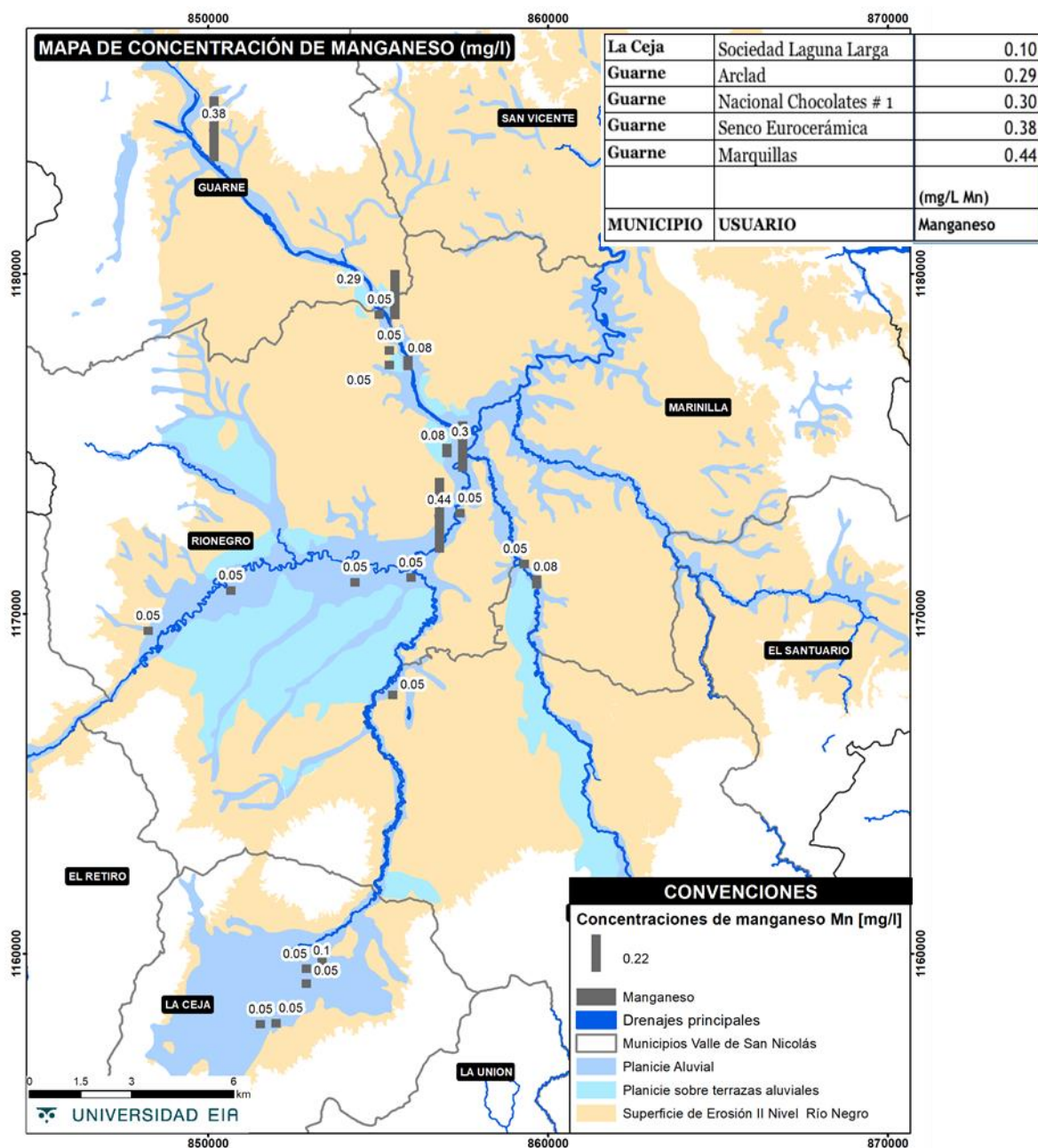


Figura 6. 16. Mapa de concentración de manganeso.

En este estudio fueron incluidos tres elementos traza: Cobre, Cadmio y Plomo. Su origen está normalmente asociado con residuos de actividad industrial y los valores admisibles para la salud humano son extremadamente bajos.

Cobre: Varias muestras superan los valores permitidos (<2 mg/l) pero debe prestarse atención a los valores presentes en el punto correspondiente a La Inmunizadora Serye, la Ceja, dado que sugieren contaminación puntual por actividad industrial (Figura 6.17.).

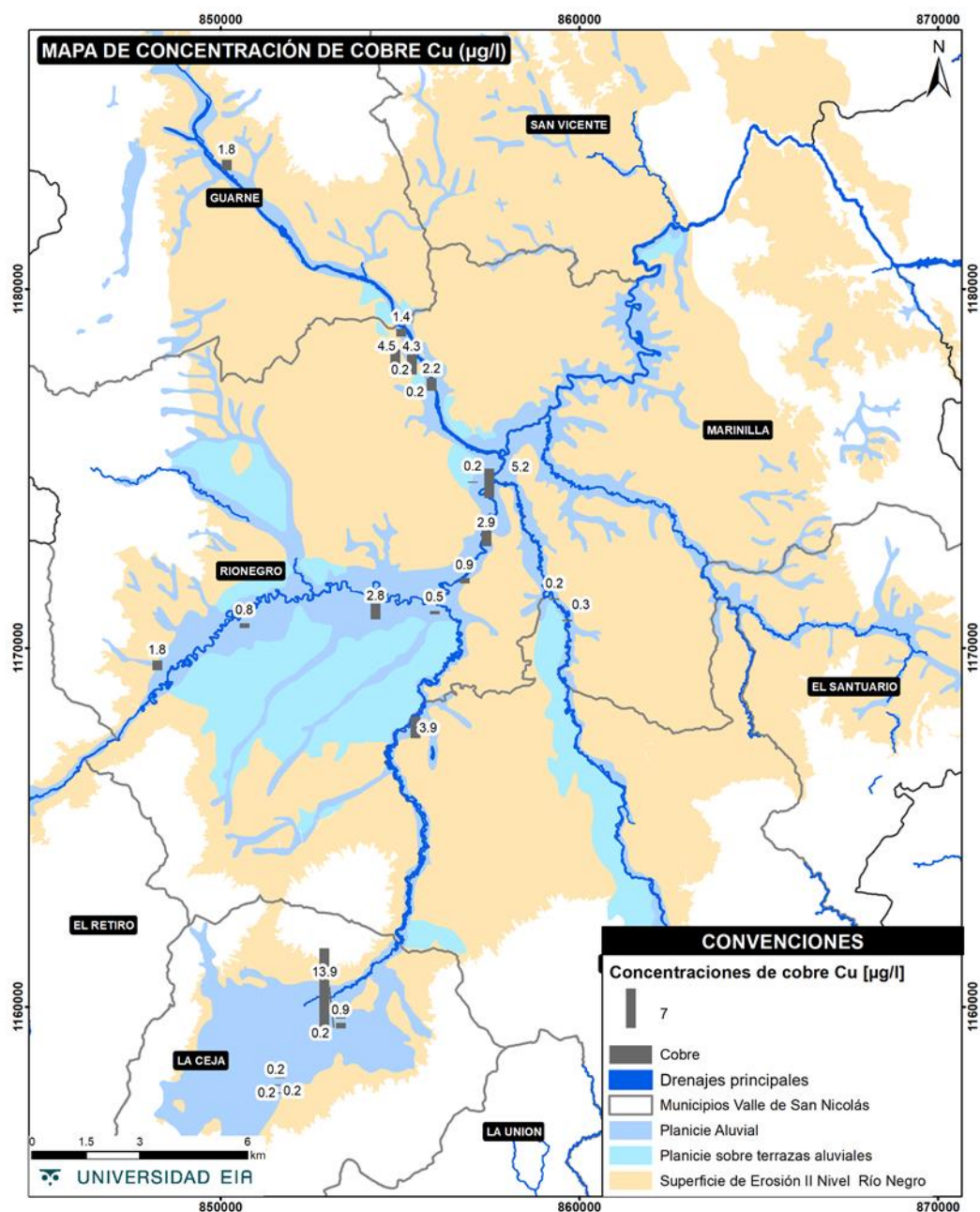


Figura 6. 17. Mapa de concentración de Cobre.

Plomo: Ninguna muestra supera los valores permitidos (<0.1 mg/l), por lo tanto puede concluirse que el plomo no representa una fuente de contaminación para las aguas subterráneas (Figura 6.18).

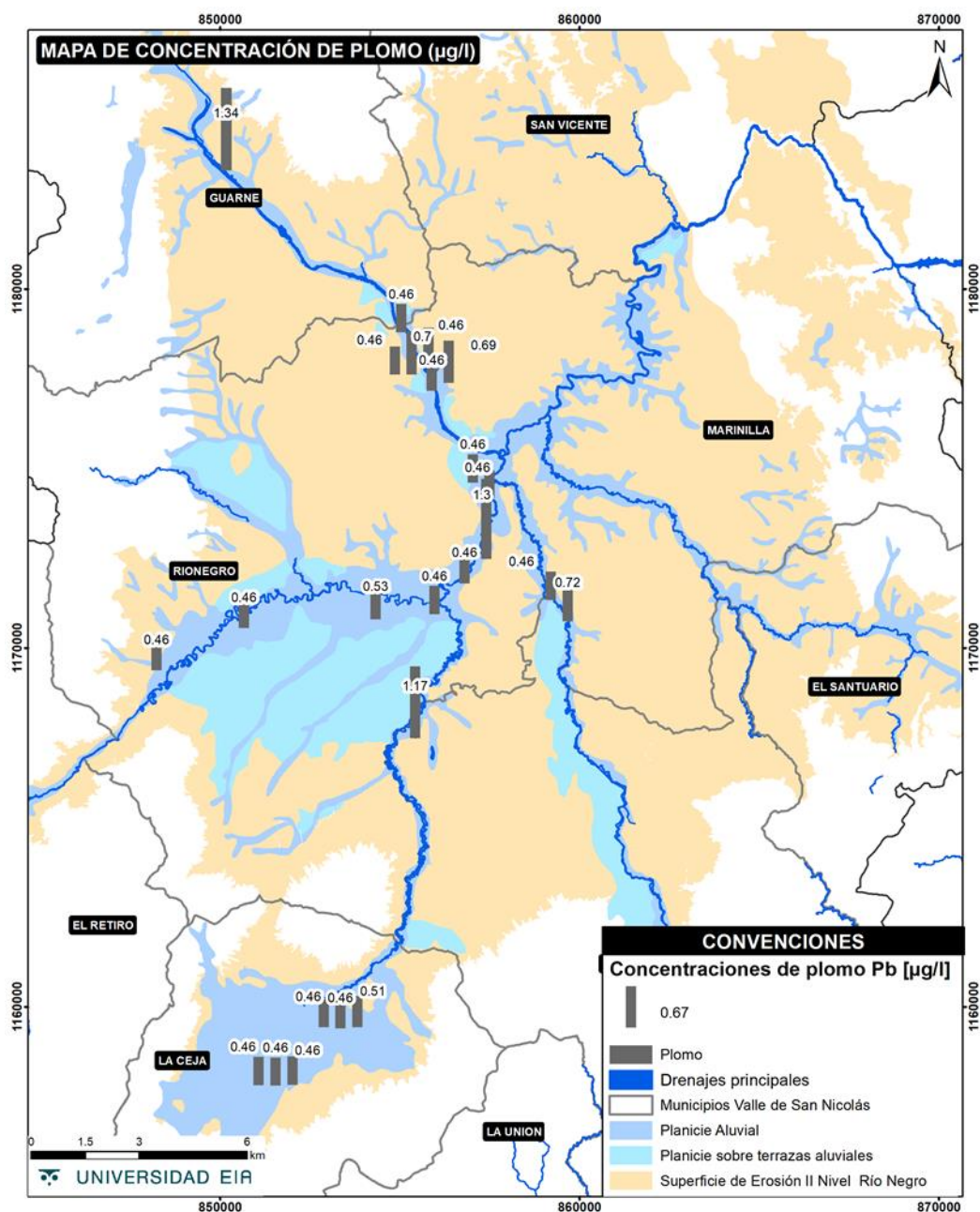


Figura 6. 18. Mapa de concentración de Plomo. (Unidades en microgramo por litro)

Cadmio: El valor máximo permitido en agua potable es de 0.005 mg/l. Por lo tanto, bajo este estudio puede concluirse que el cadmio representa una fuente de contaminación para las aguas subterráneas en varios lugares del VSN como se evidencia en la Figura 6.19. Debe prestarse atención en la Ceja y algunas localidades de Rionegro.

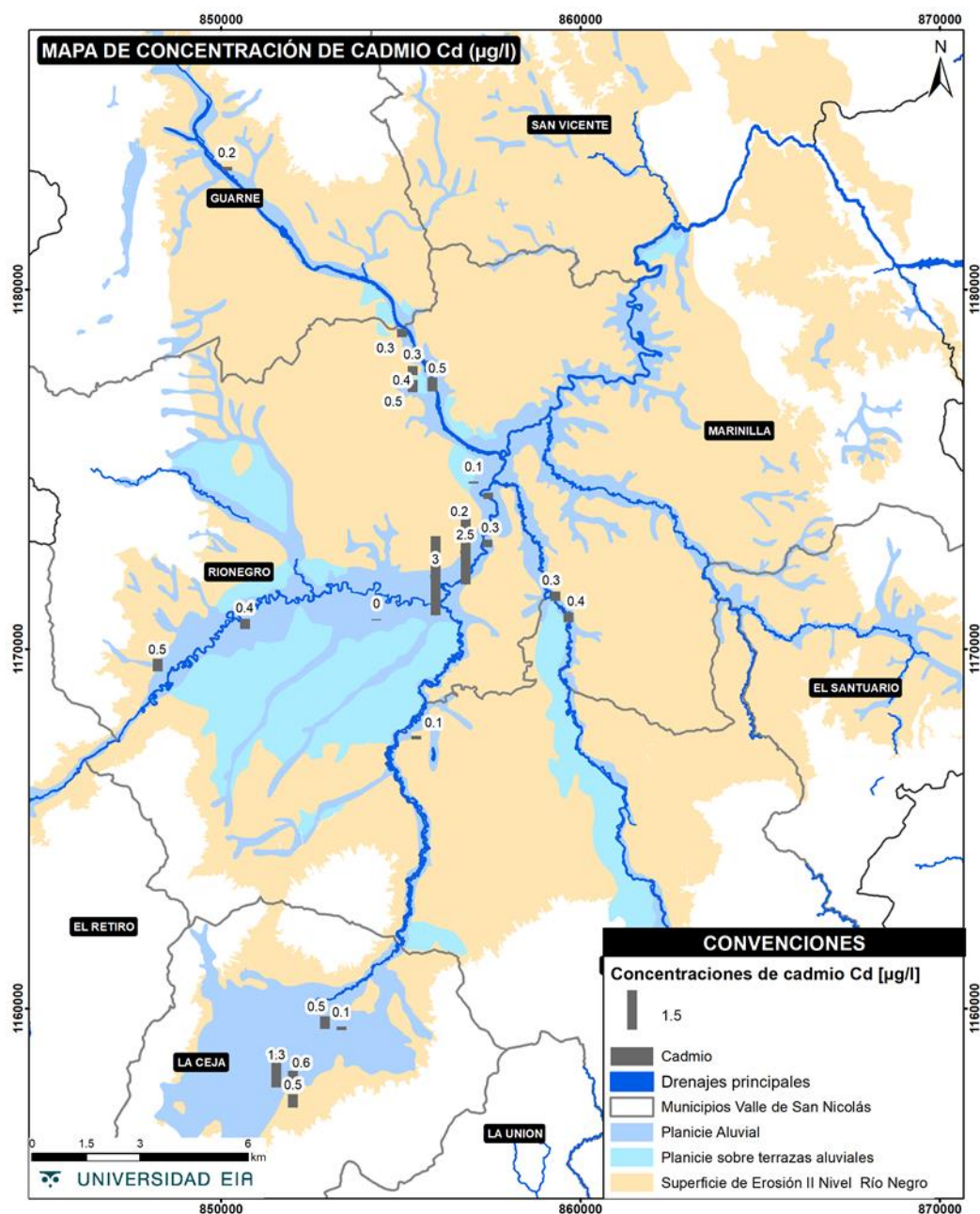


Figura 6. 19. Mapa de concentración de Cadmio.

Coliformes fecales: Su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura. Algunos usuarios, sin embargo, están por encima de cero que es el valor deseado. Los coliformes son agentes contaminantes relacionados con el manejo inapropiado de desechos fecales. La Figura 6.20 muestra los usuarios que tienen valores anómalos para este parámetro. Según el decreto, los rangos admisibles varían para los diferentes usos del agua.

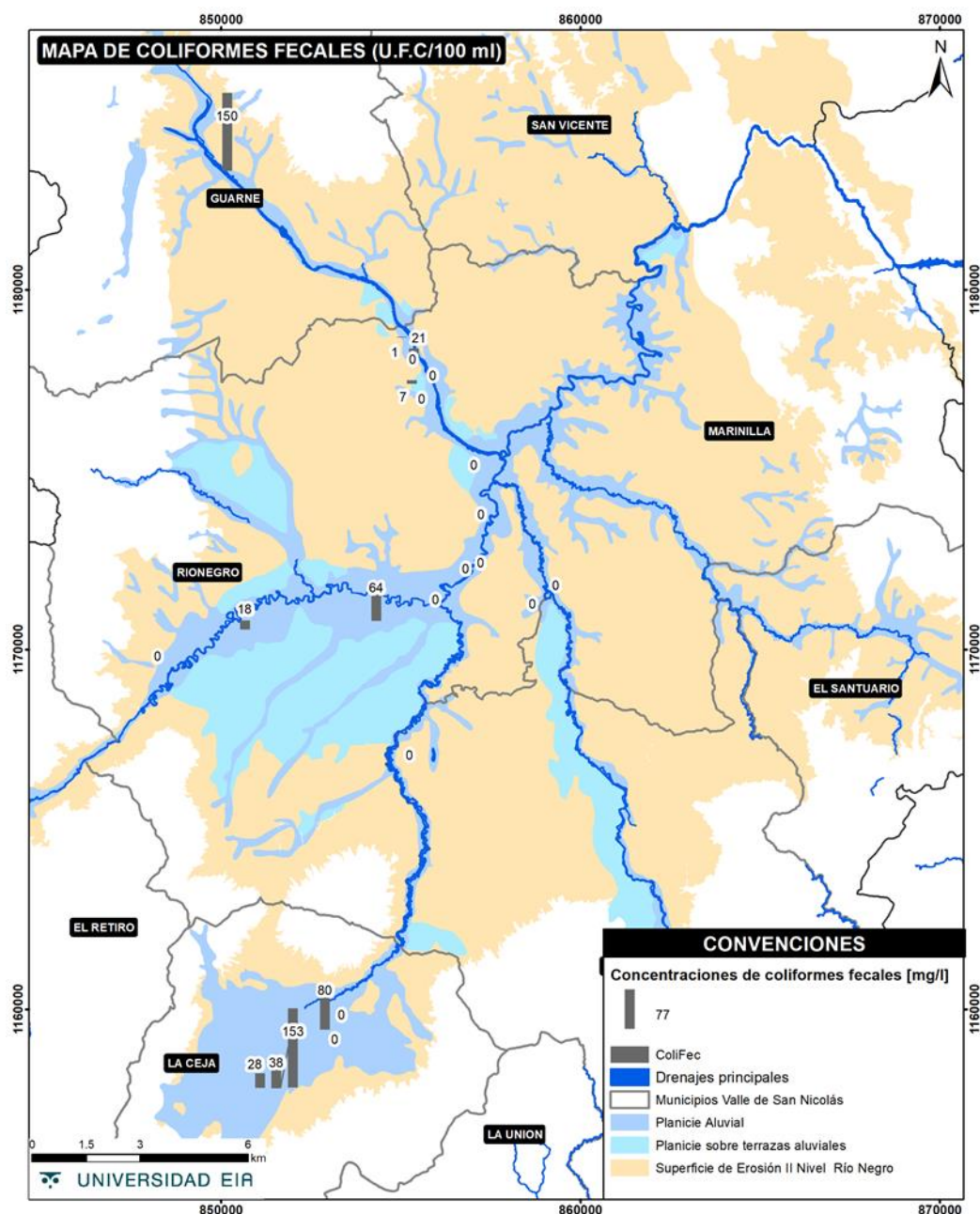


Figura 6. 20. Mapa de concentración de coliformes fecales.

Coliformes totales: Los coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. En general, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos de fondo de ríos y lagos. Valores bajos son admisibles para diferentes usos del agua en la Figura 6.21 se muestra la distribución espacial de los valores reportados por el laboratorio. Para consumo humano el valor recomendado es cero.

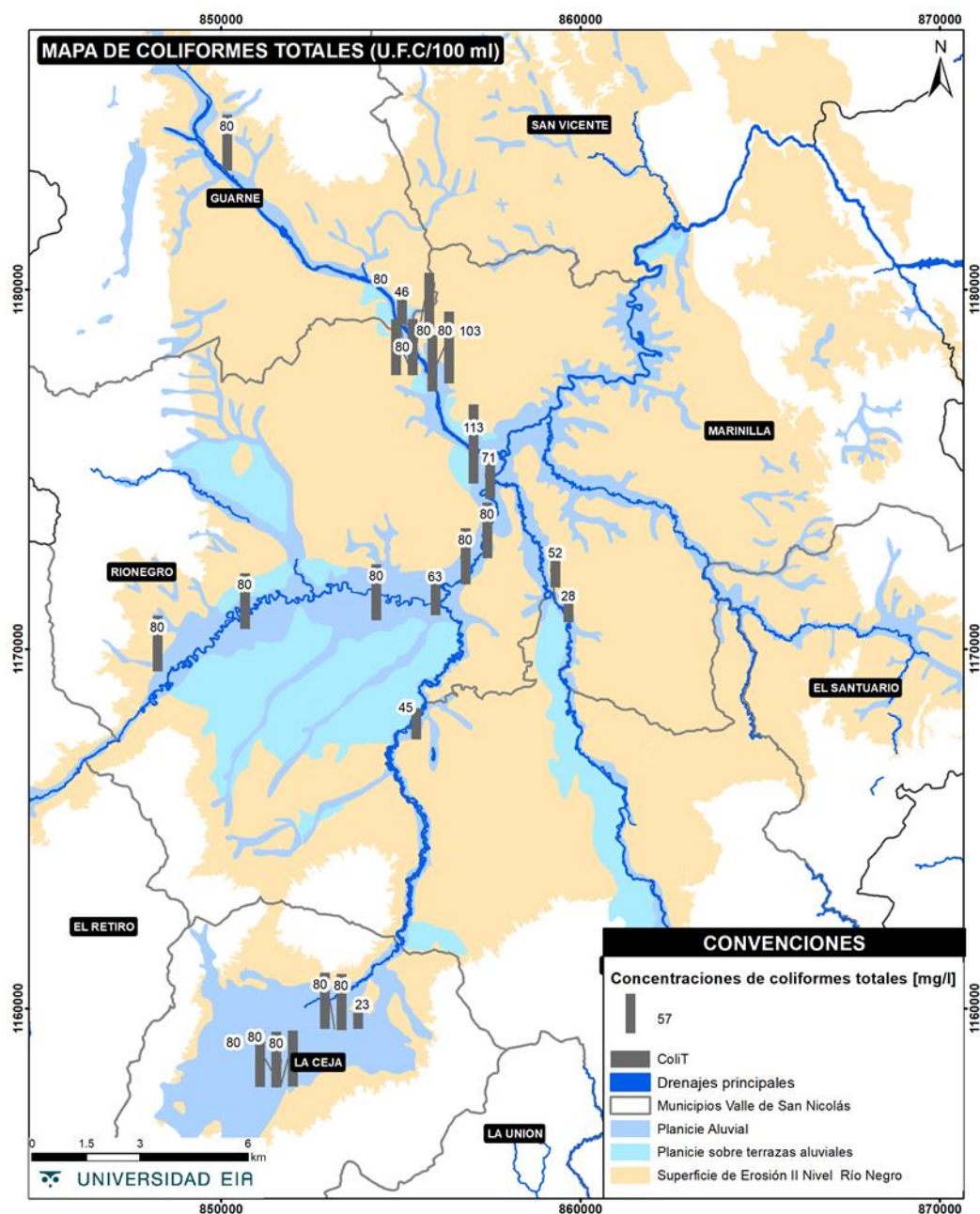


Figura 6. 21. Mapa de Coliformes totales.

Análisis de facies hidroquímicas

Diagramas de Piper

Los diagramas de Piper permiten determinar las facies hidroquímicas del agua y establecer relaciones entre las muestras tomadas. La Figura 6.22, presenta los resultados de las muestras de aguas subterráneas colectadas.

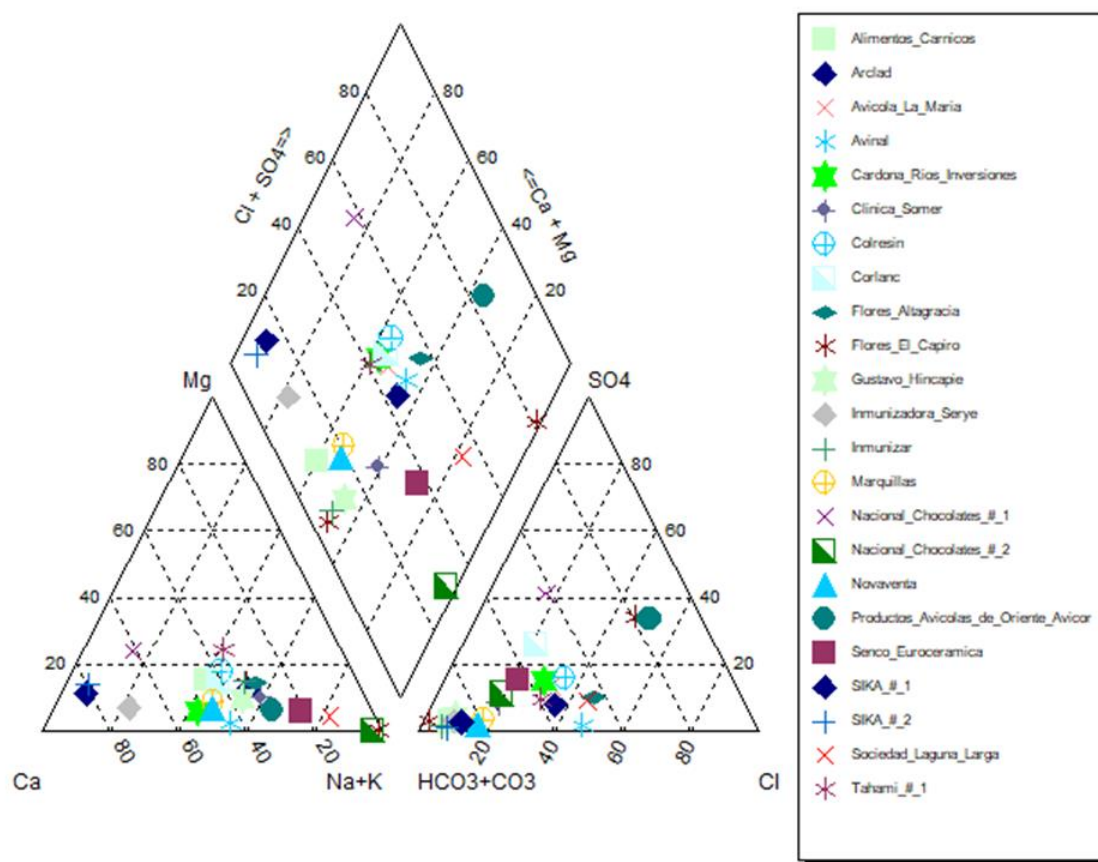


Figura 6. 22. Diagrama de Piper para las muestras colectadas.

Como se observa en la Figura 6.22, algunas de las aguas subterráneas analizadas tienen un carácter mixto(aquellas que se sitúan en los bordes de los rombos que limitan las facies). También se presentan aguas bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cálcicas. Dos de las muestras presentan una marcada composición clorurada sódica y una sola muestra presenta tendencia clorurada cálcica. No se cuenta con la evidencia que indique que no hay mezcla de aguas de diferentes niveles al momento de hacer la toma de las muestras en campo, por lo tanto, no puede establecerse ninguna relación de profundidad y estos valores, como es lo usual para dar encontrar la explicación de la variabilidad composicional.

Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff son útiles para hacer comparaciones rápidas entre muestras de aguas que pueden ser provenientes de varias fuentes, así como para ilustrar la evolución hidrogeoquímica dentro de una línea de flujo. A continuación, se presentan los diagramas Stiff asociados a las muestras recolectas.

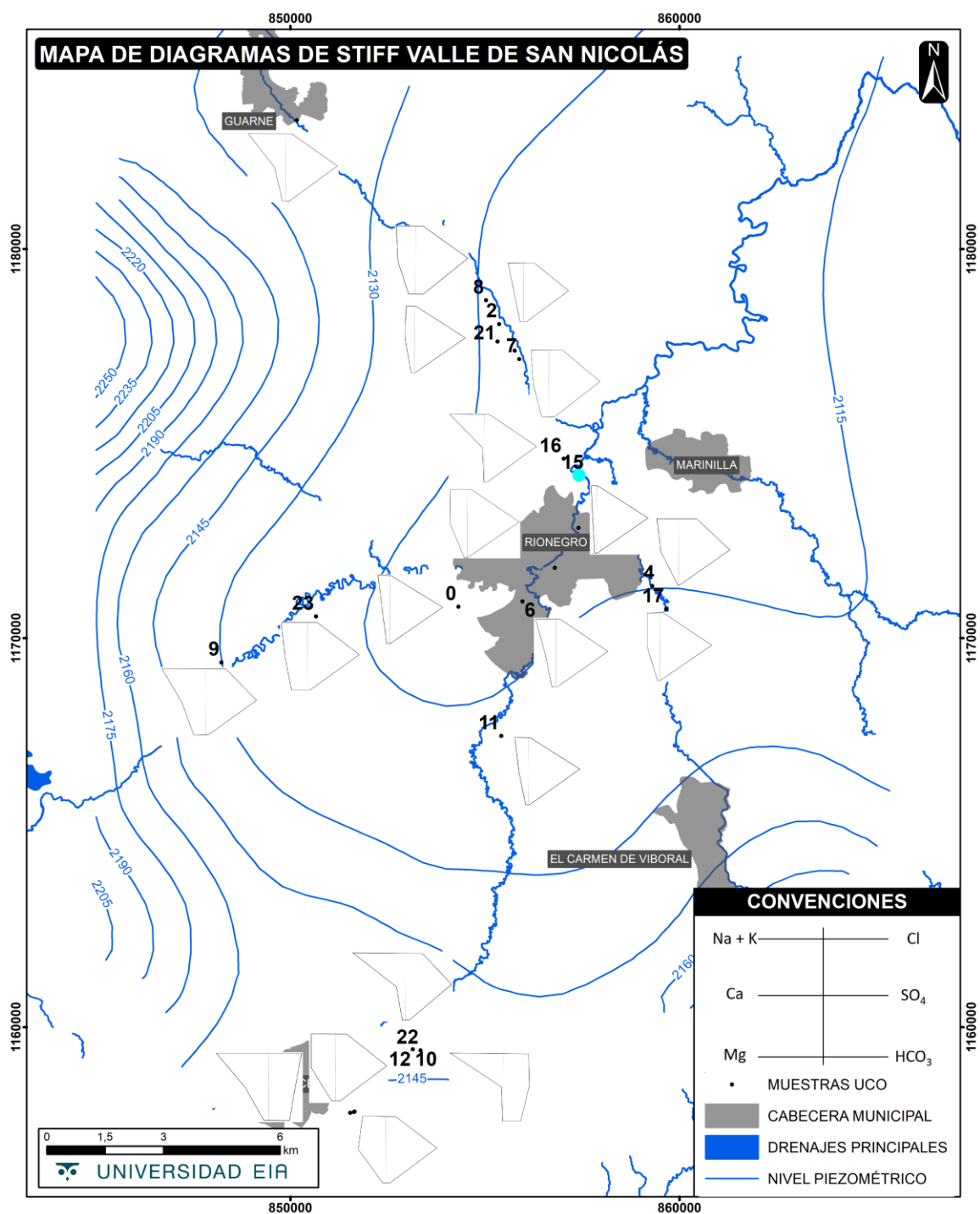


Figura 6. 23. Mapa con diagramas de Stiff para las muestras de agua subterráneas

Guarne: Nótese como las muestras 1, 2, 7 y 8, tienen una distribución de iones-cationes similar, sugiriendo igual procedencia. A diferencia de esto, la muestra 19 al Norte de Guarne, presenta una distribución diferente sugiriendo un origen distinto.

La Ceja: Nótese como las muestras 10 y 22 son ricas en sales y ligeramente carbonatadas. Por su parte las muestras 3 y 5 parecen representar aguas carbonatadas y una proveniencia similar. A pesar que geográficamente la muestra 18 está muy cerca de 3 y de 5 y, sus concentraciones sugieren estar menos carbonatadas y con aportes de sales tanto cloradas como en sódicas.

Alrededores de Rionegro (Sur): En general, las muestras evidencian la presencia de aguas carbonatadas. Algunas también con sales.

Rionegro al Centro: En general son aguas carbonatadas. Dos de los lugares muestreos sugieren la presencia de aguas salobres (9 y 27).

Conclusiones y recomendaciones

Las muestras estudiadas, si bien son pocas, sus resultados son importantes toda vez que se concentran en el área de la zona de estudio alrededor de la cual ocurre la mayor explotación del acuífero. Adicionalmente, permiten definir un concepto en relación a la ocurrencia de lugares anómalos y hacer seguimiento.

La gran mayoría de las muestras de agua subterráneas del VSN analizadas evidencian su naturaleza ácida. ($\text{pH} < 7$). Son aguas mayoritariamente poco turbias, con algunas pocas excepciones.

La mayoría de las muestras del VSN presentan contaminación por coliformes totales y casi todas las muestras de la Ceja, por coliformes fecales. Esto es un resultado muy crítico porque estos resultados son inaceptables para el uso de consumo humano.

Adicionalmente si el uso se destina para el riego, esto implicaría contaminación de alimentos de futuro consumo humano condición de poca sanidad. La contaminación en las aguas por coliformes son evidencia de falta de alcantarillados, mal uso o ausencia de pozos sépticos y/o mal manejo de aguas residuales.

Algunos lugares muestran evidencias de contaminación en varios parámetros como es el caso de varios usuarios en la Ceja (cadmio, sulfatos, sodio, nitratos) y en algunos sectores de Guarne (Hierro). Dado que tanto en la Ceja como en Rionegro, los lugares identificados como fuentes de contaminación estarían ubicados en el acuífero Llanura de inundación, el cual posee las mayores conductividades hidráulicas, debe prestarse atención puesto que existe la posibilidad de que los contaminantes se propaguen fácilmente dentro del acuífero deteriorando su calidad.

Se recomienda seguir realizando estudios periódicos de monitoreo de calidad así como buscar estrategias de gestión que permitan restaurar los lugares que hoy se identifican como fuentes de contaminación. Una vez se cuente con mayor densidad de muestreo, se recomienda incluir valoración del agua subterránea mediante el establecimiento de índices de calidad, los cuales son base para definir los criterios de gestión y control ambiental.

Una fase posterior de estudio se deberá diseñar e implementar una red de monitoreo de calidad, con el fin de contar con la información necesaria para conocer la evolución de la calidad del agua subterránea, y aplicar un índice de calidad, elemento fundamental para determinar si las aguas subterráneas son óptimas o no para diferentes usos (consumo humano, uso industrial o uso agrícola). Esta red debe ser complementada con una red de

monitoreo hidrogeoquímico que permita validar las líneas de flujo identificadas en este trabajo; dichas redes de monitoreo deben ser sostenidas en el tiempo y contemplar monitoreos en los diferentes periodos hidrológicos representativos.

Un estudio posterior podrá correlacionar los valores de los diagramas de Stiff con valores de aguas superficiales de las corrientes cercanas a la colección de las muestras para establecer la influencia hidroquímica de las aguas superficiales sobre las subterráneas.

Referencias

Edmunds W. M. y Smedley P. L., 1996. Groundwater Geochemistry and Health: an overview. En: Environmental Geochemistry and Health. Editado por: J. D. Appleton, R. Fuge, G. J. H McCall. Geological Society Special Publication. (113) 264 p.

IGME, 2017, Instituto geológico y minero de España. Recuperado en www.igme.es

Fetter, C. (2000). Applied Hydrogeology (Cuarta edi). Universidad de Wisconsin - Oshkosh.V.

Knights and R. D. Stenner, (1999): The role of ion balances in examining the reliability of analytical data: A case study of Mendip stream (somerset). Proc. Univ. Bristol. Spelaeol. Soc., 21(3): 235-249.

Ministerio de Salud, 2012, DECRETO 1640.

Johnson D Iivision (1975). El agua subterránea y los pozos. 513 p.

Pérez P., J. A., 1997. Manual de Potablización del Agua. 3ra edición. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 504 p.

Unesco- Matsuura, Koichiro (2004). La UNESCO y la idea de humanidad / Koichiro Matsuura. - Brasilia: UNESCO, 2004. 604p.

Vélez, M. V. (1999). Hidráulica De Aguas Subterráneas (2da edició). Medellín: Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia.

Análisis la ocurrencia de zonas potenciales de acuíferos mediante el uso de los SIG y los sensores remotos

evaluación multicriterio

Introducción

Este análisis busca delinear las zonas con potencial de acuíferos usando SIG e información de sensores remotos. Los sensores remotos no solo permiten el estudio de zonas más amplias gracias a las observaciones espacio temporales, también ahorran tiempo y dinero. Se proponen como proceso de prefactibilidad que permitan delimitar zonas con mayor probabilidad de encontrar este recurso natural y con esto disminuir el número de muestreos directos necesarios en la etapa de exploración para hallar con éxito los acuíferos.

Recientemente, se han desarrollado metodologías que permiten mapear el potencial de agua subterránea mediante modelos que relacionan diversas variables de la naturaleza asociadas a la ocurrencia de acuíferos. Las variables utilizadas incluyen la litología, la pendiente, los drenajes, el suelo, los usos del suelo, la pluviosidad y los lineamientos (Magesh, Chandrasekar y Soundranayagam, 2012; Krishnamurthy, Mani, Jayaraman y Manivel, 2000; Krishnamurthy, Mani, Jayaraman y Manivel, 2000). Realizando análisis multicriterio obtienen un mapa de potencial del área de estudio con zonas clasificadas en muy bajo, bajo, alto y muy alto potencial de ocurrencia de agua subterránea que brinda una propuesta de exploración para futuros proyectos.

Datos y métodos

Según Ingeominas (2004) los principales criterios técnicos para identificar zonas potenciales de ocurrencia de agua subterránea son: la génesis y edad de rocas y sedimentos, litología (textura y porosidad), fracturamiento y alteración de las rocas (densidad, tipos de fracturas y grado de meteorización), tipo de estructura geológica (zonas favorables para acumulación de agua) y geometría de las estructuras

hidrogeológicas (espesores, profundidades, cambios litológicos). A continuación, se definen los criterios que se proponen en la literatura para el estudio de las aguas subterráneas y que se acogieron para el análisis del VSN, los mapas fueron obtenidos de CORNARE y pertenecen al POMCA de 2015, tienen una escala 1:100.000. La pendiente fue calculada a partir del DEM de alta resolución de ALOS PALSAR escala 1:25.000.

Litología

La porosidad y la permeabilidad son variables que se relacionan con la textura, el tamaño de los granos, la compactación y cementación de las rocas y de los depósitos recientes. Una roca puede ser porosa y permeable, pero también puede ser porosa y relativamente impermeable si los poros no están conectados o si éstos son demasiado pequeños.

La granulometría fina (arcillas y limos) se caracteriza por tener baja permeabilidad y porosidad efectiva, aunque presenta alta porosidad total. En esta litología el volumen total de agua almacenada es elevado, pero el volumen extraíble es escaso. Las granulometrías medias (arenas) y, particularmente, las gruesas (gravas) son lo suficientemente porosas para almacenar el agua y con la permeabilidad necesaria para permitir que el agua fluya a través de ellas en cantidades importantes, por lo cual se consideran de mayor interés hidrogeológico. Por otro lado, la porosidad generada en el medio fracturado está sujeta a la densidad de la fractura y al grado de alteración de las rocas, lo que favorece también su permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de agua (Ingeominas, 2004).

A partir del mapa geológico (Figura 2.2.) que se obtiene de los datos suministrados por Cornare se realiza una reclasificación de las unidades litológicas asociadas al agua subterránea en el VSN. Los depósitos aluviales y el Batolito Antioqueño tienen los valores más altos y las rocas metamórficas de acuerdo con su grado de metamorfismo tienen valores intermedios y bajos. Los valores asignados se presentan en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Reclasificación de las unidades litológicas

Litología	Puntaje
Depósitos Aluviales	5
Depósitos antrópicos	5
Terrazas	4
Depósitos Palustres	3
Depósitos de Ladera	3
Dunitas de Medellín	3
Sedimentitas de la Fe	3
Batolito Antioqueño	2
Complejo Cajamarca - Esquistos de Ancón	2
Anfibolita de La Ceja/Medellín	1

Litología	Puntaje
Gabro de Carrizales	1
Gneis de La Ceja	1
Gneis milonítico de Sajonia	1
Granofels de Normandía	1
Migmatitas de Puente Peláez	1

Suelos

A partir de los suelos de la zona de estudio (Figura 7.1.) que se obtienen de la información suministrada por Cornare se realiza una reclasificación de los suelos más apropiados para la acumulación de agua subterránea. Los depósitos de arenas, gravas, limos y bloques tienen los puntajes más altos, por otro lado, la roca aflorante y los limos, debido a su baja permeabilidad, los puntajes más bajos. Los valores asignados se presentan en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Reclasificación de los suelos

Composición	Tipo de material	Puntaje
Arenas y gravas	Depósito	5
Limos, bloques y cantos de roca angulares	Depósito	5
Arenas y gravas finas	Depósito	5
Limos y arenas limosas	Roca sedimentaria	4
Limos, bloques y cantos de roca angulares	Depósito	4
Limos y arenas limosas	Suelo Residual	2
Limos y arcillas	Depósito	2
Limos	Depósito	1
Roca	Roca Metamórfica	0

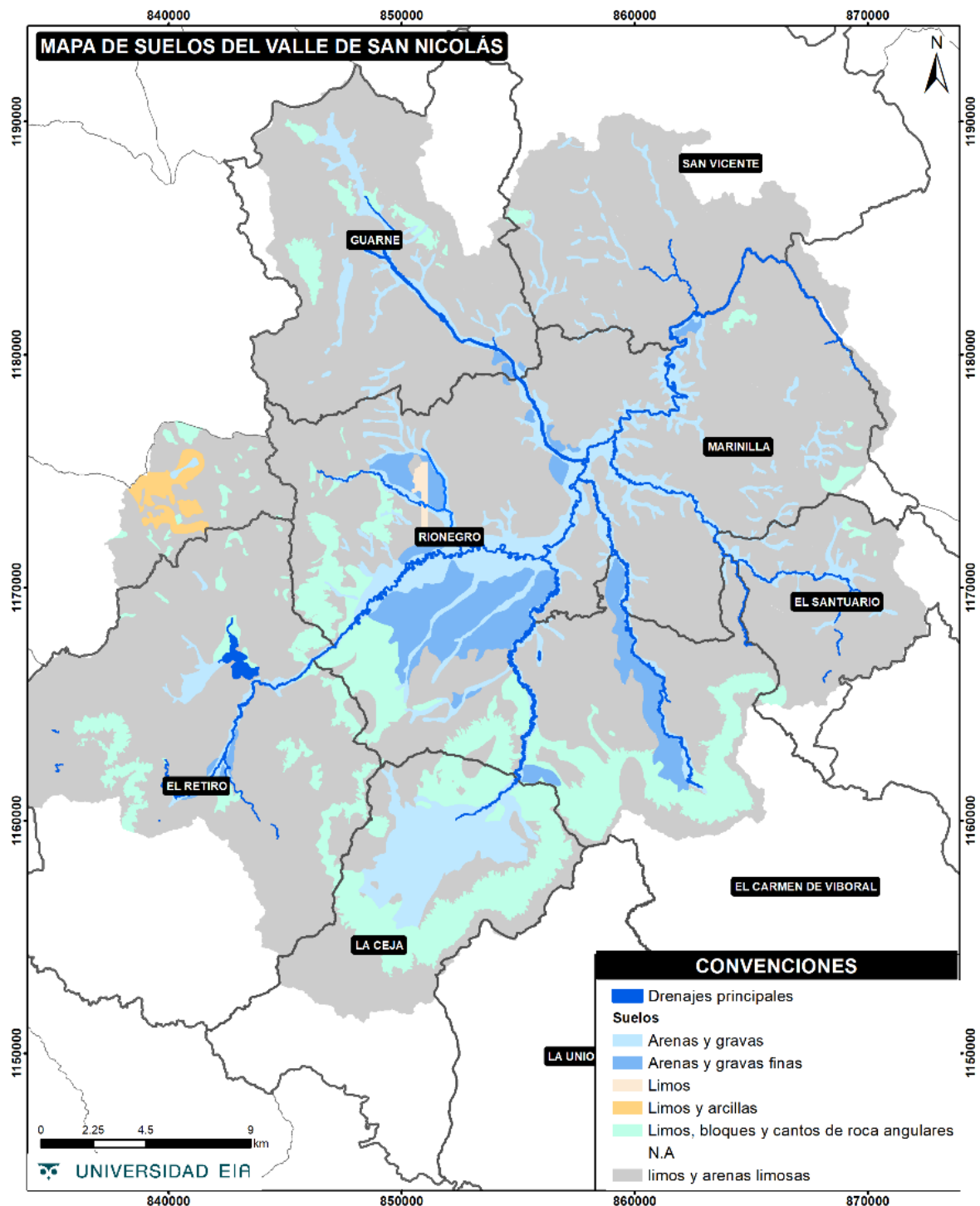


Figura 7. 1. Mapa de suelos. Escala 1:100.000. Adaptado del POMCA de Rionegro (2015).

Lineamientos

Son características lineales o curvilíneas controladas estructuralmente, que pueden ser identificadas a partir de las imágenes satelitales. Estas características se expresan en la topografía superficial. Son un factor importante en hidrogeología ya que, pueden ser caminos para el movimiento del agua subterránea. Además, pueden conferir permeabilidades secundarias a rocas con baja permeabilidad primaria y adicionalmente

pueden favorecer procesos de recarga de los acuíferos, tanto en zonas de alta pendiente como en zonas de baja pendiente.

La distancia (Figura 7.2.) y la densidad (Figura 7. 3.) de lineamientos se obtienen con las herramientas distancia Euclideana (*Euclidean distance*) y densidad de líneas (*Line density*) del software ArcGIS. Los valores de estas dos variables fueron normalizados de 0 a 5.

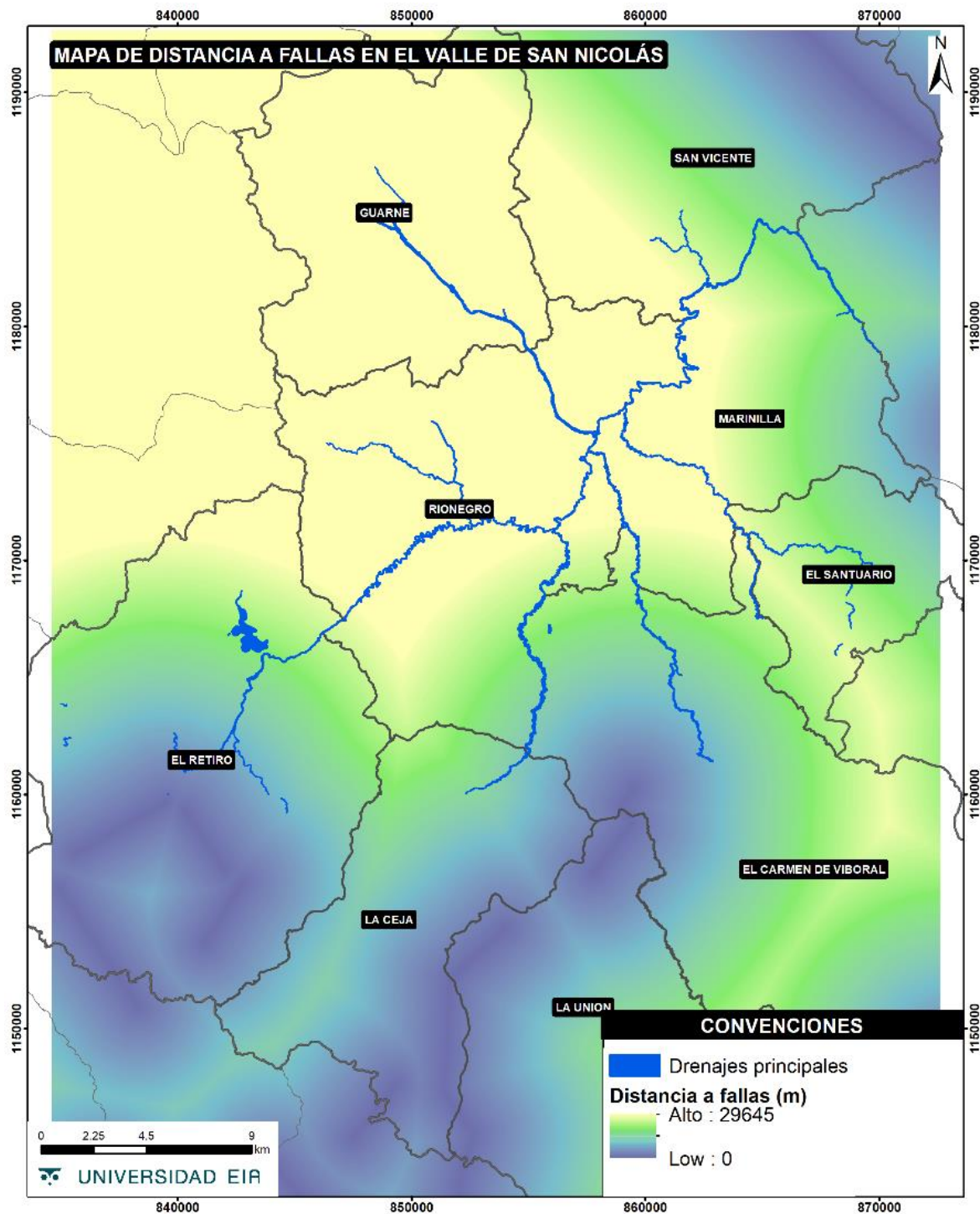


Figura 7. 2. Mapa de distancia a lineamientos

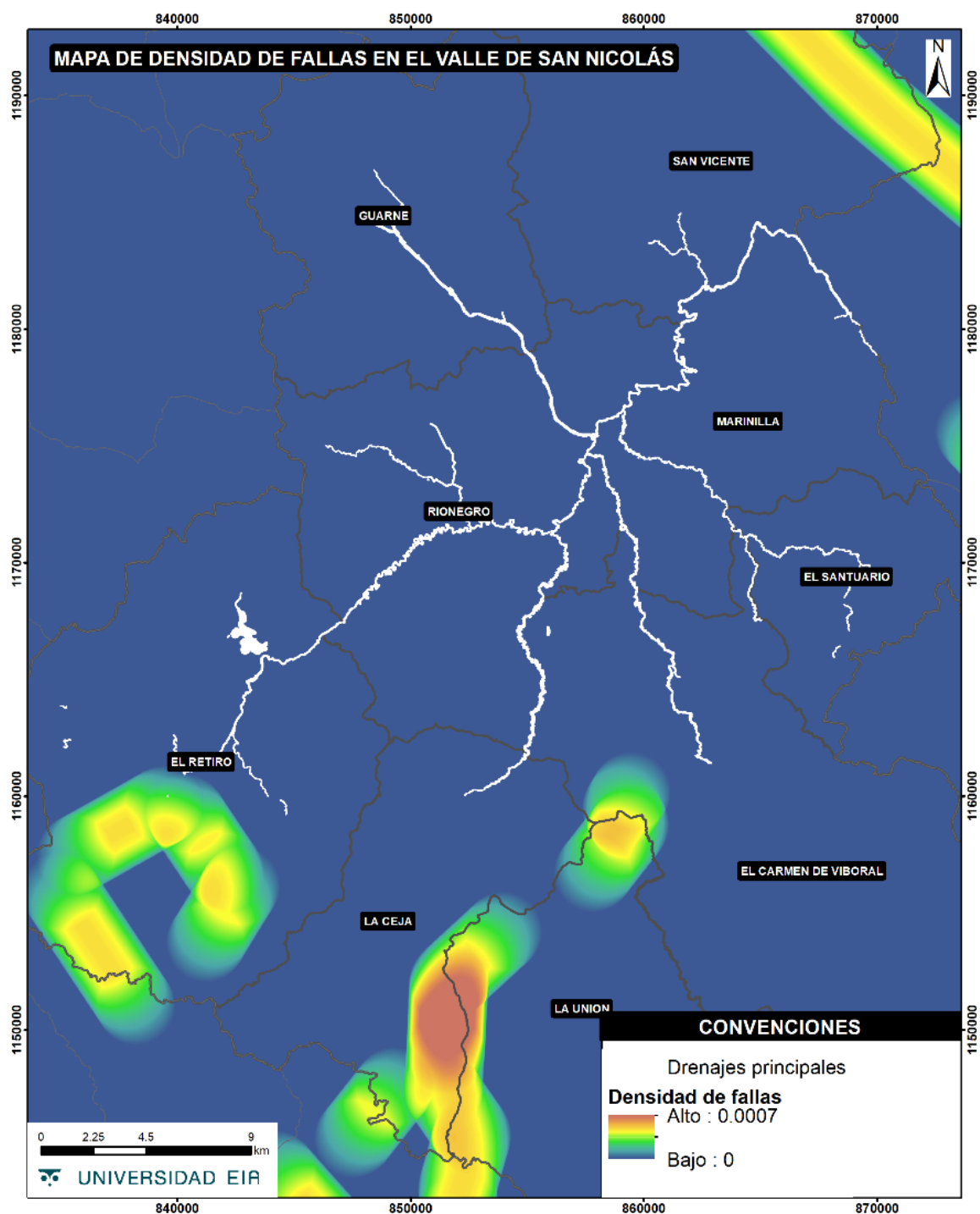


Figura 7. 3. Mapa de densidad de lineamientos

Topografía

La topografía es decisiva, ya que, por ejemplo, cuanto mayor es el grado de pendiente más rápido fluye el agua y se incrementa la tasa de erosión, las pendientes suaves favorecen la infiltración, siempre y cuando la zona vadosa no esté completamente saturada y las propiedades de permeabilidad del suelo la favorezcan también.

Para el área de estudio la pendiente en grados se calcula a partir del modelo de elevación digital del satélite Alos Palsar (resolución 12,5 m), usando la herramienta pendiente

(Slope) del software ArcGIS. En la Figura 7. 4 se presenta el mapa de las pendientes, donde el rojo representa los valores más altos y el verde representa los valores más bajos.

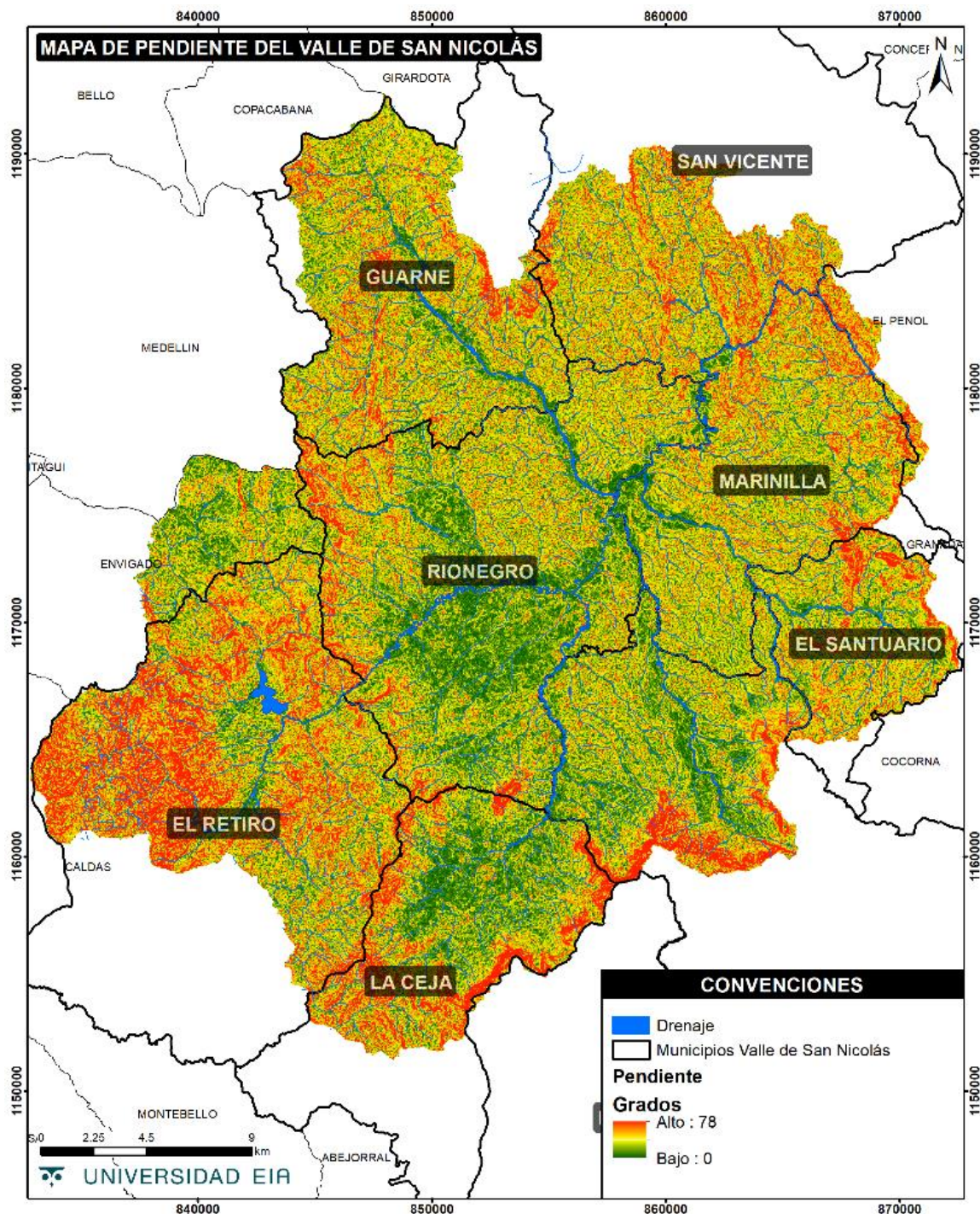


Figura 7. 4. Pendientes

Para el análisis multicriterio, esta variable es reclasificada, las pendientes menores tienen una calificación más alta, puesto que favorecen la infiltración, mientras que las pendientes altas tienen puntajes menores, debido a que lo que se presenta en estas zonas es principalmente escorrentía superficial, aunque sí se presenta infiltración, pero en menor proporción. Los valores asignados se presentan en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Reclasificación de la pendiente

Pendiente (°)	Puntaje
0 - 2	5
2 - 4	4
4 - 8	3
8 - 20	2
20 - 30	1
30 - 86	0

Precipitación

El mapa de precipitación media anual multianual se realiza a partir de los datos de las estaciones del IDEAM y de EPM. Se utiliza una interpolación con *Kriging* ordinario, con modelo de semivariograma esférico en el software ArcGIS, cuyas especificaciones y resultados se presentan en el Figura 4.2. Este es uno de los factores más importantes, cuanto mayor sea la pluviosidad, mayor es la probabilidad de generar una recarga directa al acuífero. Los valores de esta variable se normalizan entre 0 y 5.

Densidad y distancia a drenajes

Es definida como la cercanía entre los canales de flujo de agua. Es una medida de la longitud total de un segmento de flujo por unidad de área. La densidad de drenaje es una función inversa a la permeabilidad, cuando menos permeable es una roca, menor es la filtración del agua lluvia, por lo que tiende a concentrarse en escorrentía superficial.

A partir de los drenajes sencillos, dobles y cuerpos de agua se calcula la densidad de drenajes utilizando la herramienta densidad de líneas del software ArcGIS (*Line density*), en celdas de 12,5 m (Figura 7.5) en el cual el azul más oscuro representa las zonas con mayor densidad de drenaje y el azul claro baja densidad. Los valores asignados en la reclasificación de esta variable se presentan en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Reclasificación de la Densidad de drenaje

Densidad de drenajes	Puntaje
0 - 2.4	5
2.4 - 4.8	4
4.8 - 7.3	3
7.3 - 9.7	2
9.7 - 12.1	1

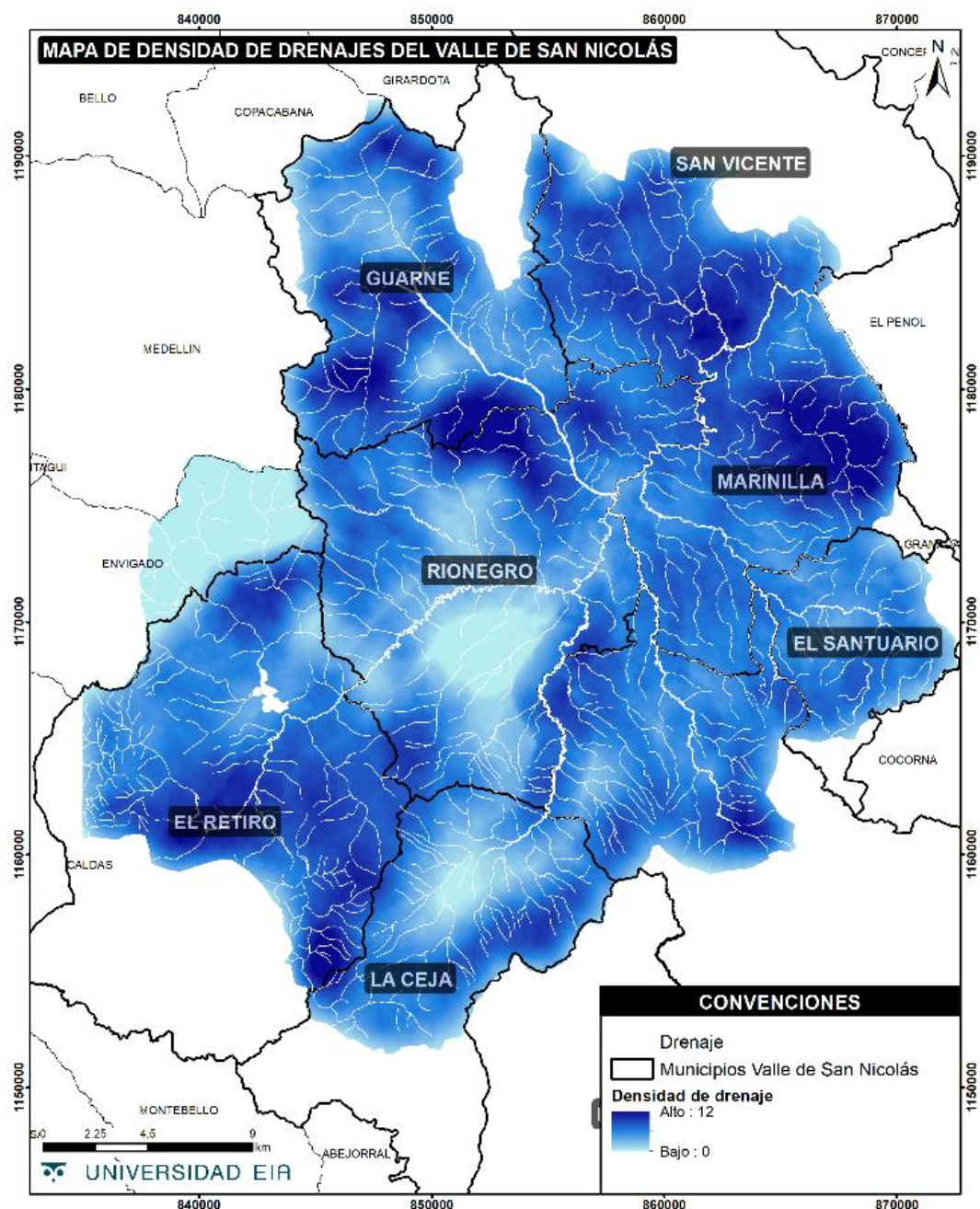


Figura 7. 5. Densidad de drenaje

La segunda variable calculada a partir de los drenajes es la distancia desde estos, para lo cual se usa la herramienta distancia euclidiana (*Euclidean distance*) del software ArcGIS (Figura 7.6), donde el azul claro significa poca distancia a drenajes y el azul oscuro distancias mayores.

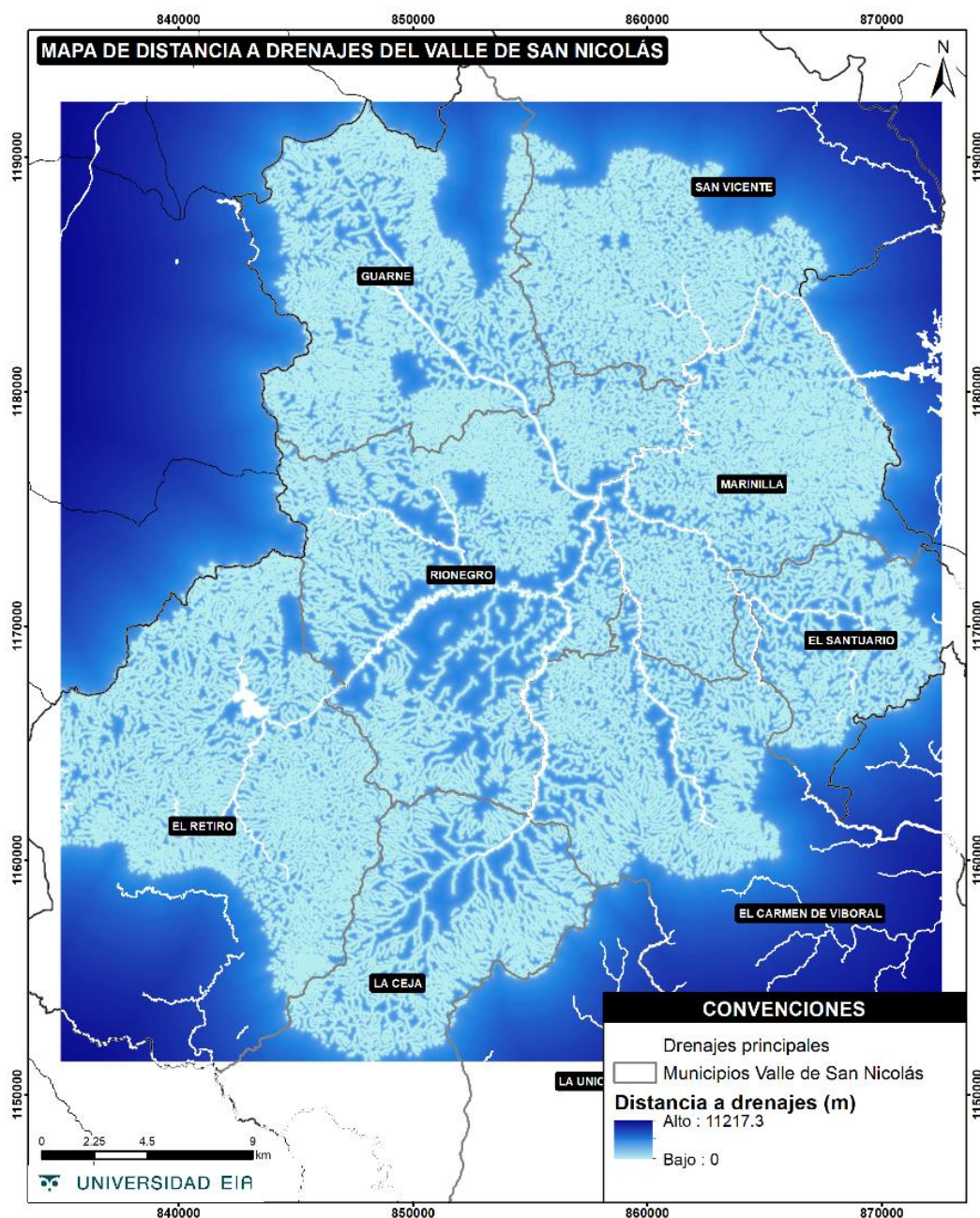


Figura 7. 6. Distancia a drenajes

Los valores asignados en la reclasificación de esta variable se presentan en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. Reclasificación de la distancia a drenajes

Estilo de tabla 1	Estilo de tabla 1
0	5
0 - 87	4
87 - 1139	3
1139- 3680	2
3680 - 11217	1

Espesor de ceniza

El espesor de la ceniza (Figura 2.3.) se obtiene de los datos suministrados por Cornare y se realiza una clasificación donde los mayores espesores de ceniza tienen los valores más altos en la reclasificación para los análisis, ya que están asociados a una infiltración efectiva y los menores espesores tienen valores más bajos. Los valores asignados en la reclasificación de esta variable se presentan en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6. Reclasificación del espesor de ceniza

Espesor ceniza (cm)	Puntaje
250 - 300	5
200 - 250	4
150 - 200	3
100 - 150	2
50 - 100	1

Coberturas del suelo

Con la información de las coberturas del suelo (Figura 7.7) obtenidas de los datos suministrados por Cornare, se realiza una reclasificación donde las zonas construidas (más impermeables) tienen el valor más bajo, mientras que las coberturas vegetales naturales tienen el valor más alto, y los cultivos, pastos y rastrojos tienen valores intermedios. Los valores asignados en la reclasificación de esta variable se presentan en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7. Reclasificación de las coberturas del suelo

Cobertura	Puntaje
Bosque Plantado	5
Bosques Naturales Primarios	5
Bosques Naturales Secundarios	5
Cultivos Permanentes	4
Pasto Natural	4
Cultivos Transitorios	3
Nube	3
Pasto Manejado	3
Rastrojo Bajo	3

Cobertura	Puntaje
Ríos	3
Sombras	3
Áreas Construidas	0
Cuerpos de Agua	0

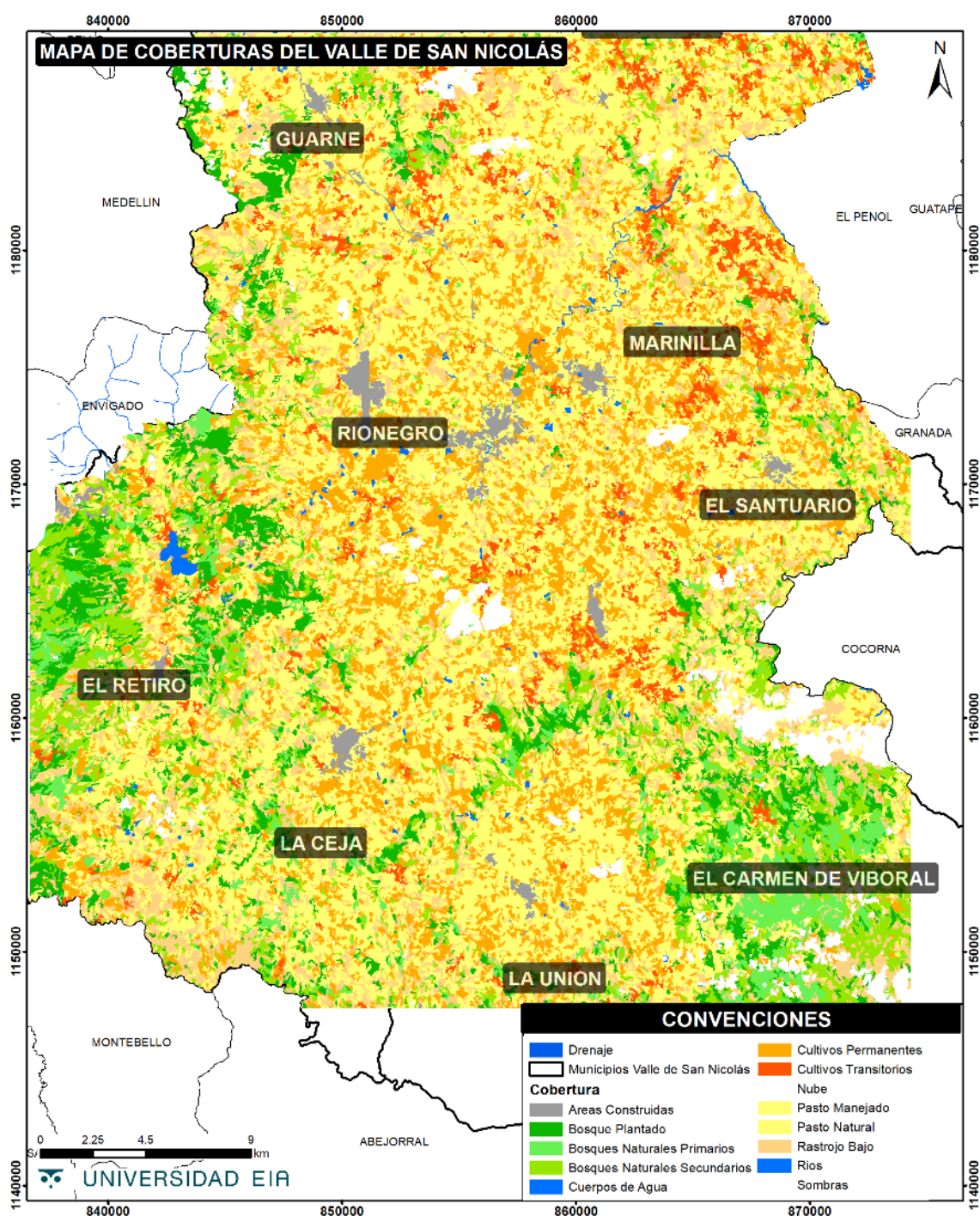


Figura 7. 7. Coberturas del suelo

Variable dependiente: Zonificación del potencial

El mapa que se usa como zonificación del potencial es el de conductividad (Figura 7. 8), calibrado con el modelo numérico, el cual se desarrolla bajo el marco del código MODFLOW 2005 y con las especificaciones descritas en el capítulo 5. Durante el proceso de calibración del modelo, se modificaron las conductividades hidráulicas asignadas a las unidades hidrogeológicas planteadas, manejando rangos que respetan el criterio dado por las texturas predominantes en cada unidad hidrogeológica, con lo cual, las estratigrafías más arenosas tienen conductividades hidráulicas mayores que las más arcillosas.

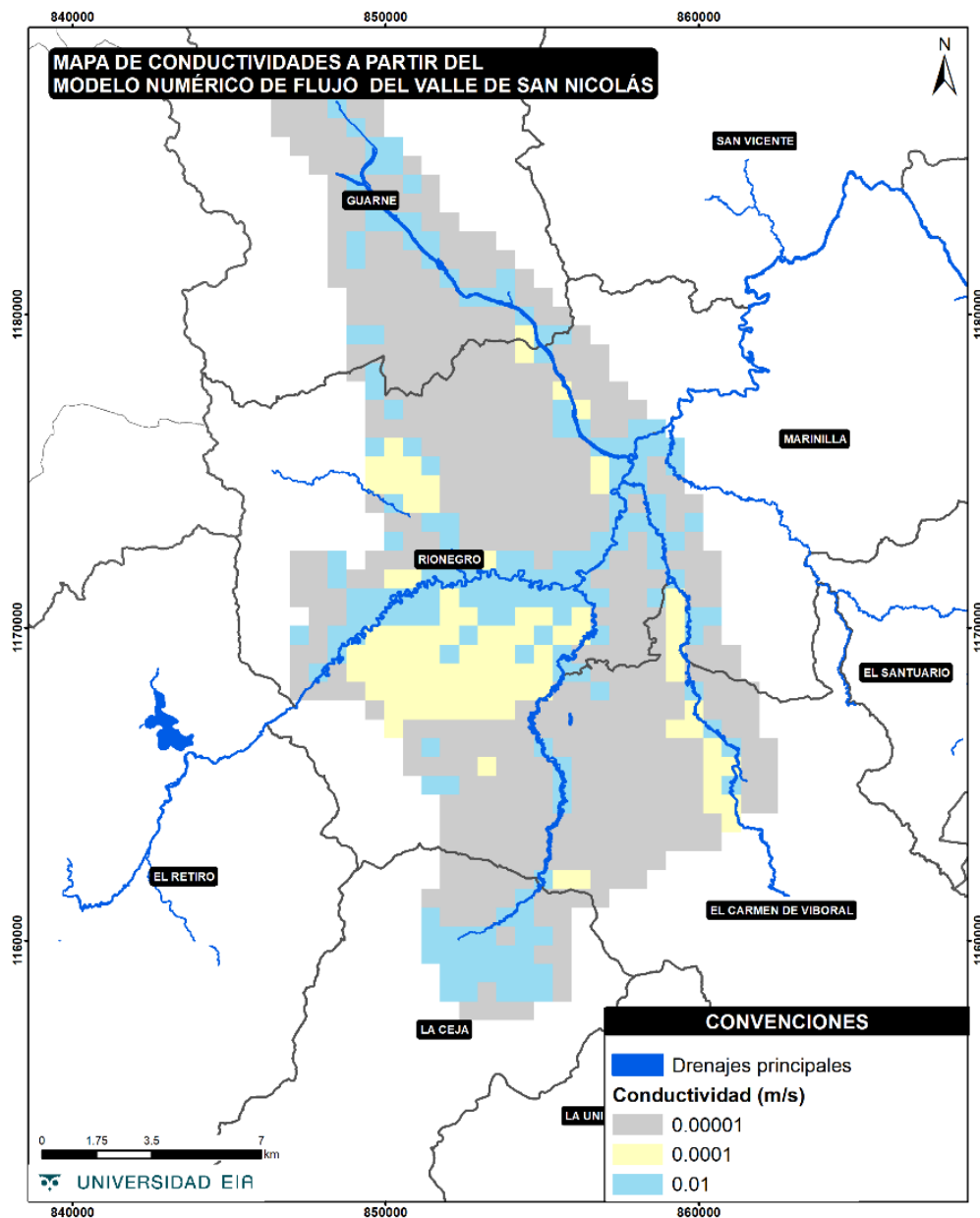


Figura 7. 8. Mapa de conductividades a partir de la calibración del modelo numérico de flujo del Valle de San Nicolás.

Análisis estadístico de correlación de variables

Para evaluar que las variables utilizadas en el análisis multicriterio sean independientes, es decir, que conocer el valor de una de ellas no aporta ninguna información acerca de la distribución de la otra variable, se realizó un análisis estadístico de correlación utilizando un muestreo con puntos aleatorios dentro de la zona de estudio. Se utilizó la herramienta crear puntos aleatorios (*Create Random Points*) del software ArcGIS, para la cual se debe tener en cuenta la distancia mínima entre los puntos teniendo en cuenta el tamaño de las celdas (12,5 m) para no obtener puntos que correspondan a dos celdas continuas, considerando la regla de los 8 vecinos, por lo que se estableció una distancia de 17,68 m como distancia mínima permitida entre los puntos (Figura 7.7). La cantidad máxima de puntos aleatorios que se pudieron generar fueron 490.000, los valores de todas las capas de información usadas en el análisis fueron extraídos para cada punto, obteniendo una matriz de 490.000 valores por 11 columnas (el id del punto, los valores de las 9 variables explicativas propuestas y el de la variable dependiente).

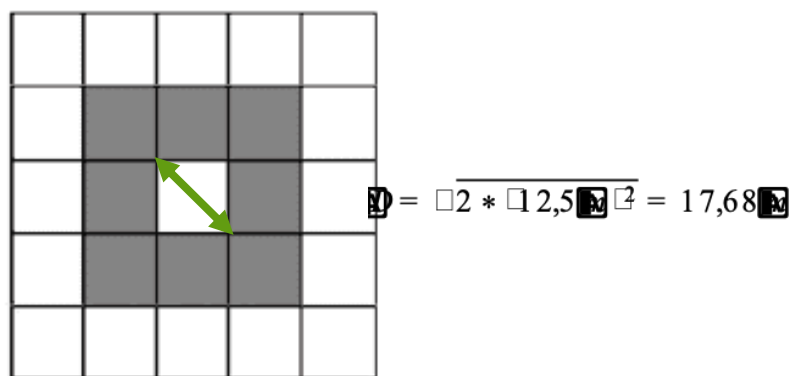


Figura 7. 9. Distancia mínima para la generación de puntos aleatorios no continuos considerando la regla de los 8 vecinos

Para la evaluación de la correlación entre las variables se usó el coeficiente de Pearson, para lo cual se usó el lenguaje de programación Python usando la matriz con los valores obtenidos mediante el muestreo. Los resultados se muestran en la Figura 7.8, donde los colores más claros representan una menor correlación (valores cercanos a 0) y los colores más intensos representan correlaciones mayores (valores cercanos a 1, bien sean positivos o negativos).

Las variables con correlaciones más altas son litología y suelos (0,82) y precipitación y distancia a fallas (0,90). La primera correlación es esperada pues los suelos residuales tienen una relación estrecha con la roca madre, además el mapa de suelos no es producto de una cartografía con mediciones directas en campo y por ello se usa para los análisis la variable litología. La segunda correlación es alta, pero se sabe que estas variables no tienen relación en la naturaleza y por lo tanto no es redundante usar ambas variables en el análisis.

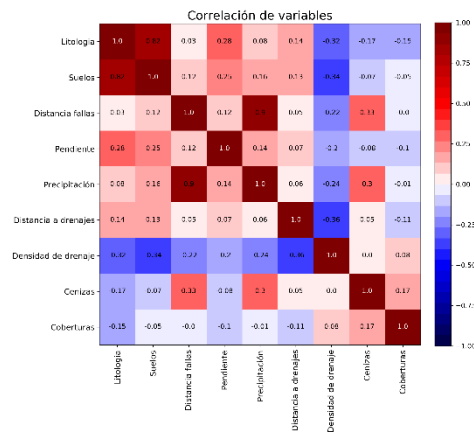


Figura 7. 10. Matriz de correlación de variables

Análisis multicriterio

Se realiza un algebra de mapas utilizando una ponderación de las variables definidas según el modelo hidrogeológico conceptual (MCH). Se hizo una primera ponderación considerando todas las variables y utilizando la ponderación que se presenta en la Tabla 7.8.

Tabla 7.8. Peso de las variables según el MCH

VARIABLE	PESO
Pendiente	30.0%
Litología	20.0%
Cobertura	15.0%
Precipitación	15.0%
Cenizas	7.5%
Densidad drenaje	5.0%
Distancia drenaje	5.0%
Distancia fallas	2.5%
TOTAL	100%

Regresión lineal multivariada

Una regresión lineal global de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) permite generar una predicción o modelar una variable dependiente en términos de sus relaciones con un conjunto de variables explicativas o independientes. Se realiza una regresión exploratoria (*Exploratory regression*) en ArcGIS para probar todas las combinaciones posibles de variables explicativas y ver qué modelos aprueba todos los diagnósticos de OLS necesarios.

Validación de resultados

Con el propósito de evaluar los resultados del potencial de ocurrencia de acuíferos obtenido mediante el análisis multicriterio con respecto a la información existente en la zona sobre los pozos o aljibes, se extrae el valor de potencial en estos puntos utilizando la herramienta extraer valores según puntos (*Extract Values to Points*) del software ArcGIS y a partir de estos valores se generaron histogramas que permitieran concluir sobre la validez de los resultados.

Resultados

Análisis multicriterio

Al realizar el análisis multicriterio con la ponderación preliminar se obtiene el mapa presentado en la Figura 7. 11, en el cual el potencial de ocurrencia de acuíferos menor se representa con el color naranja y la mayor con azul.

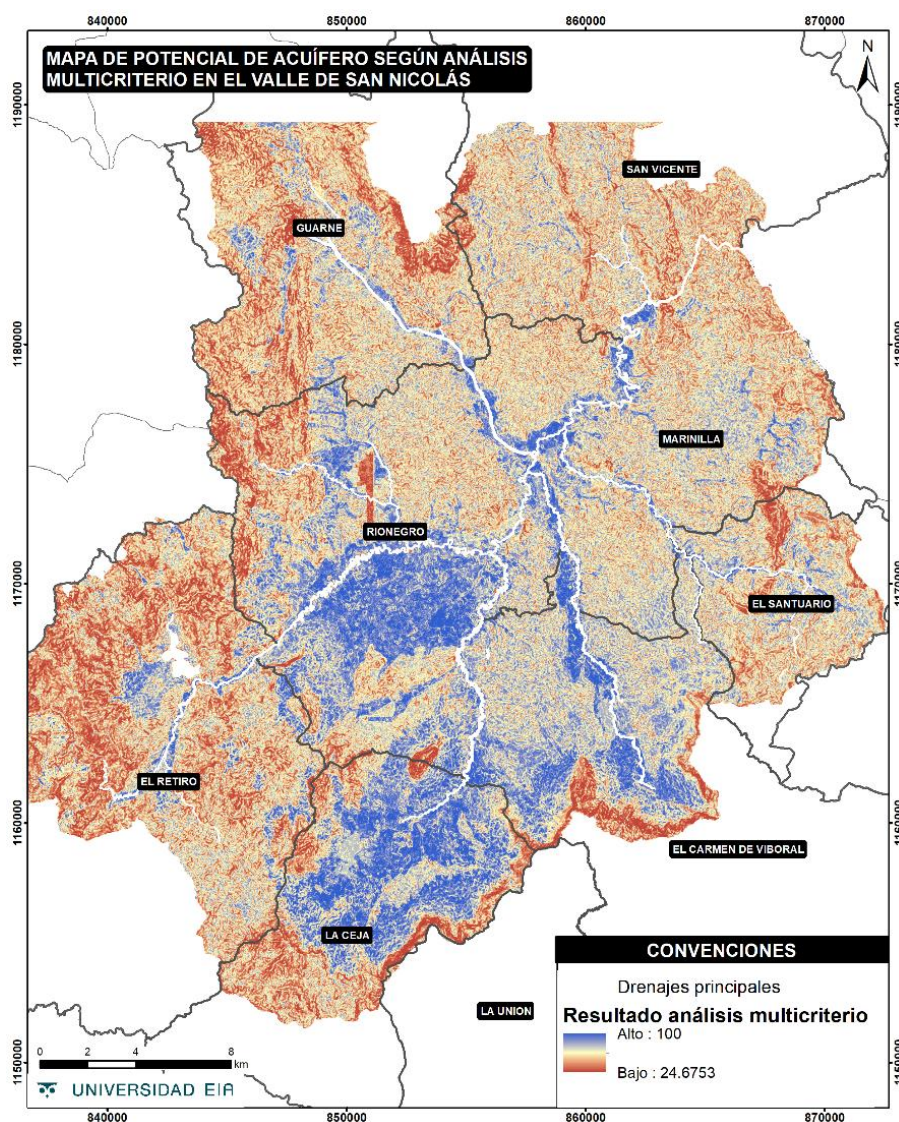


Figura 7. 11. Resultado de la ponderación con los pesos de MCH

Regresión lineal multivariada

Con la regresión exploratoria se encuentra que el modelo que mejor predice los valores de la variable dependiente (zonificación del potencial) es el que contiene todas las variables: suelos, litología, distancia a fallas geológicas, cenizas, precipitación, coberturas del suelo, pendiente, densidad y distancia a drenajes. Sin embargo, este modelo tiene un valor R^2 ajustado de 0,2678, el cual es bastante bajo. El resumen de significancia de las variables se presenta en la Tabla 7. 9, donde se puede observar que las primeras cinco variables son significativas en el 100% de los modelos evaluados (para este caso fueron 465, resultado de evaluar todas las posibles combinaciones de las variables). Adicionalmente, esta tabla permite si la variable es principalmente positiva o negativa en los modelos evaluados.

Al evaluar el modelo que contiene solo las 5 primeras variables que son significativas en todos los modelos, igual se obtiene un R^2 ajustado de 0,2673 indicando que posiblemente añadir las 4 siguientes no aporta mucho más a la predicción del valor de la zonificación.

Tabla 7.9. Resumen de significancia de las variables

VARIABLE	% DE SIGNIFICANCIA	% NEGATIVOS	% POSITIVOS
Suelos	100,00	51,22	48,78
Litología	100,00	0,00	100,00
Distancia a fallas	100,00	45,93	54,07
Cenizas	100,00	100,00	0,00
Precipitación	100,00	98,78	1,22
Coberturas	90,65	48,78	51,22
Pendientes	85,77	0,00	100,00
Densidad de drenajes	77,64	85,77	14,23
Distancia a drenajes	49,59	43,50	56,50

En la Figura 7. 12 se presenta el mapa generado a partir de la regresión lineal usando las 8 variables, donde los pesos de las variables quedan definidos por los coeficientes presentados en la Tabla 7. 10.

Tabla 7.10. Resultados de la regresión lineal

VARIABLE	COEFICIENTE
----------	-------------

Intercepto	0,019308
Suelos	-0,000321
Pendiente_	0,000030
Litología	0,001726
Distancia a fallas	0,000585
Distancia a drenajes	0,000006
Densidad de drenajes	-0,000034
Cobertura del suelo	0,000100
Cenizas	-0,000248
Precipitación	-0,005042

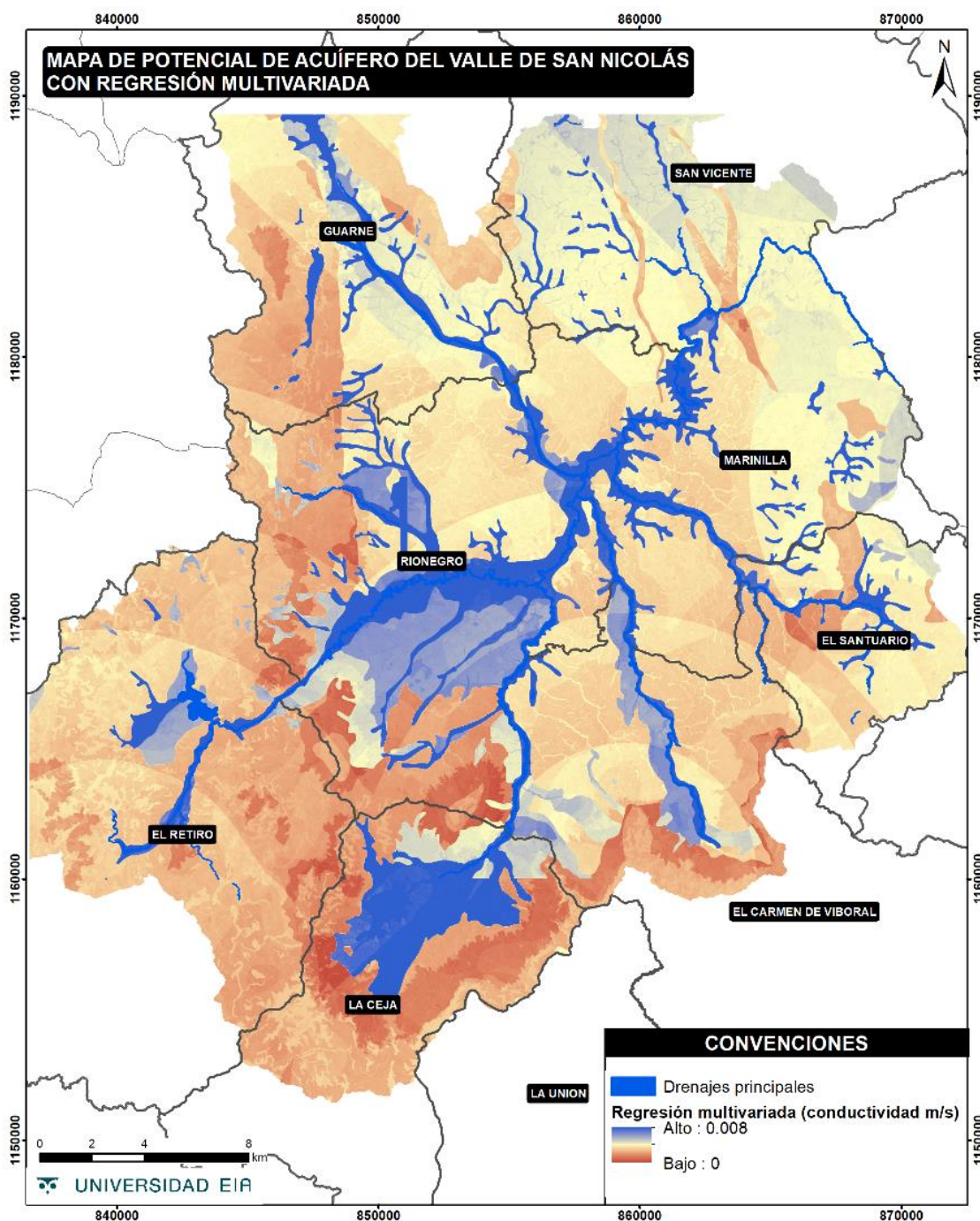


Figura 7. 12. Regresión lineal multivariada

Validación de resultados

El resultado de la ponderación preliminar cruzado con los pozos o aljibes se presenta en la Figura 3, donde se puede evidenciar que la mayoría de los pozos coinciden con valores de potencial altos, es decir entre 65 y 100 lo que sugiere que hay una verdadera relación entre las variables utilizadas y la ocurrencia de agua subterránea.

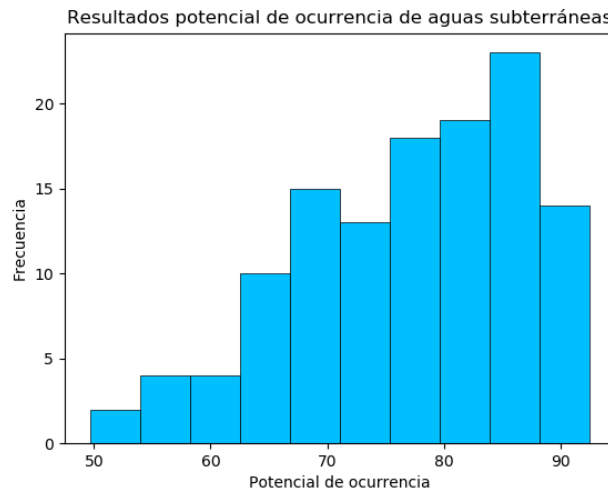


Figura 7. 13. Histograma de frecuencias del potencial de ocurrencia de aguas subterráneas con análisis multicriterio MCH

Por su parte, el valor de conductividad estimado usando la ecuación encontrada mediante la regresión lineal multivariada, se contrasta también con los pozos o aljibes, los resultados se presentan en la Figura 7.14, donde se puede observar que el valor más alto encontrado es 0.008 m/s y que no hay una marcada relación entre dicha conductividad y los pozos o aljibes que se encuentran en la zona de estudio. Esto podría deberse a que hay puntos de agua que aprovechan el acuífero más permeable asociado a los depósitos aluviales y otros en la zona de menor permeabilidad que se asocia al saprolito del batolito antioqueño, pero no hay información suficiente para entender mejor este fenómeno.

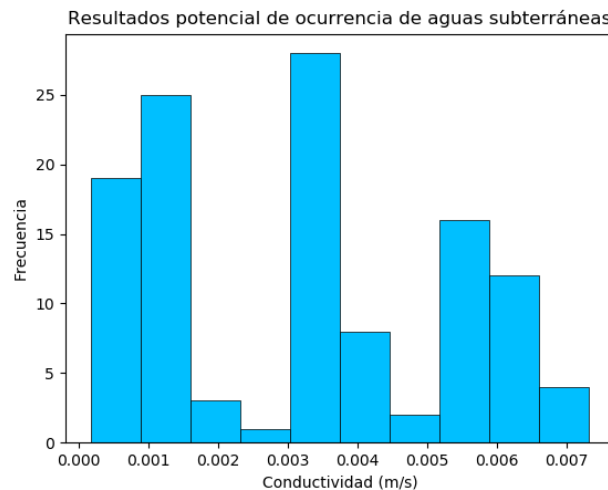


Figura 7. 14. Histograma de frecuencias del potencial de ocurrencia de aguas subterráneas con OLS

Discusión y conclusiones

El análisis de correlación muestra que las variables de mayor correlación son litología y suelos, lo que no resulta extraño puesto que el tipo de suelo, si es residual depende de la roca madre (geología), así que físicamente estas variables tienen una relación. Existe también una correlación alta entre la precipitación y la distancia a fallas, pero se conoce

que estas variables no tienen relación en la naturaleza y por lo tanto no es redundante usar ambas variables en el análisis.

La variable cobertura del suelo que se utilizó en este análisis es la suministrada por Cornare, sin embargo, en el caso de no contar con este mapa, esta se podría derivar a partir de las imágenes satelitales usando una clasificación mediante índices de vegetación

Los resultados obtenidos indican una buena relación entre las variables empleadas y el potencial de ocurrencia de aguas subterráneas desde el análisis multicriterio usando los pesos obtenidos del modelo hidrogeológico conceptual (MCH). Sin embargo, desde la regresión lineal multivariada se puede observar que esta combinación de variables no aporta suficiente información para predecir los de la variable de respuesta (valores de conductividad), dado que el máximo coeficiente R^2 ajustado que se encontró es de tan solo 0,27, el cual es muy bajo.

Por lo tanto, con las variables usadas y los resultados obtenidos no se puede determinar si existe una posible combinación de variables que permitan predecir el potencial de ocurrencia de acuíferos y mucho menos si se puede extrapolar a otros casos de estudio o a otras zonas de análisis, puesto que el análisis multicriterio que al parecer se aproxima más a la realidad, depende de las ponderaciones obtenidas mediante el modelo hidrogeológico conceptual (MCH) y por lo tanto, dicha conceptualización es imprescindible para llegar a un resultado que se aproxime más a la realidad.

Referencias

- Ingeominas. (2004). *Programa de Exploración de Aguas Subterráneas*. Bogotá.
- Krishnamurthy, J., Mani, A., Jayaraman, V., & Manivel, M. (2000). Groundwater resources development in hard rock terrain - an approach using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(3), 204–215. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85015-1](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85015-1)
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007>
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., & Voudouris, K. (2015). A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*, 525, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.056>

Zonificación hidrogeológica regional del Valle San Nicolás

Introducción

Una vez cumplido el objetivo de lograr una actualización al modelo hidrogeológico conceptual (Capítulos 2 al 6 de este libro), se quiso aplicar una metodología que permitiera hacer la zonificación del potencial hidrogeológico en áreas en donde únicamente se dispusiera de información superficial (escala 1:25.000, detalles en el Capítulo 7) y poderlo contrastar con los resultados logrados a partir de modelamiento numérico (Capítulo 5). Es así como el Capítulo 7 mostró que se puede llegar a una buena aproximación de zonificación hidrogeológica, siempre y cuando se establezcan apropiadamente las variables que tienen relación con la ocurrencia de sistemas acuíferos. Finalmente, se llega a este Capítulo 8, que propone en una zonificación del potencial hidrogeológico regional, que incluye todos los resultados del proyecto. Para lograrlo, se emplea la misma metodología la definida en el Capítulo 7, pero se incluyen dos consideraciones adicionales: Para el análisis multivariable, se incorporan resultados del subsuelo (profundidad del basamento, mapa resultado del Capítulo 4) con el que se genera una zonificación regional para toda el área de estudio. Adicionalmente, se presenta una zonificación hidrogeológica con un fundamento cuantitativo, restringida para el área alrededor del Municipio de Rionegro (escala 1:600.000), la cual es una zonificación que se interpreta a partir de los resultados del modelamiento numérico del flujo subterráneo. (detalles metodológicos Capítulo 5.).

Resultados y conclusiones

La definición geométrica y de tipo de roca (Capítulo 3) permitió establecer la presencia de tres acuíferos libres, cada uno de ellos caracterizados estratigráficamente mediante núcleos de perforación. Dichos acuíferos inicialmente estarían delimitados lateralmente por los límites geomorfológicos. En el caso específico del área de estudio, al interior del VSN, las unidades geomorfológicas tienen una alta correspondencia genética con la configuración estratigráfica del subsuelo.

Posteriormente, el modelo numérico de flujo subterráneo (Capítulo 5) soporta la existencia de tres unidades hidrogeológicas. Es decir, los tres acuíferos libres, propuestos con la interpretación geoelectrica, presentan un comportamiento hidráulico distintivo entre ellos los que les confiere el carácter de unidad hidrogeológica. Adicionalmente el

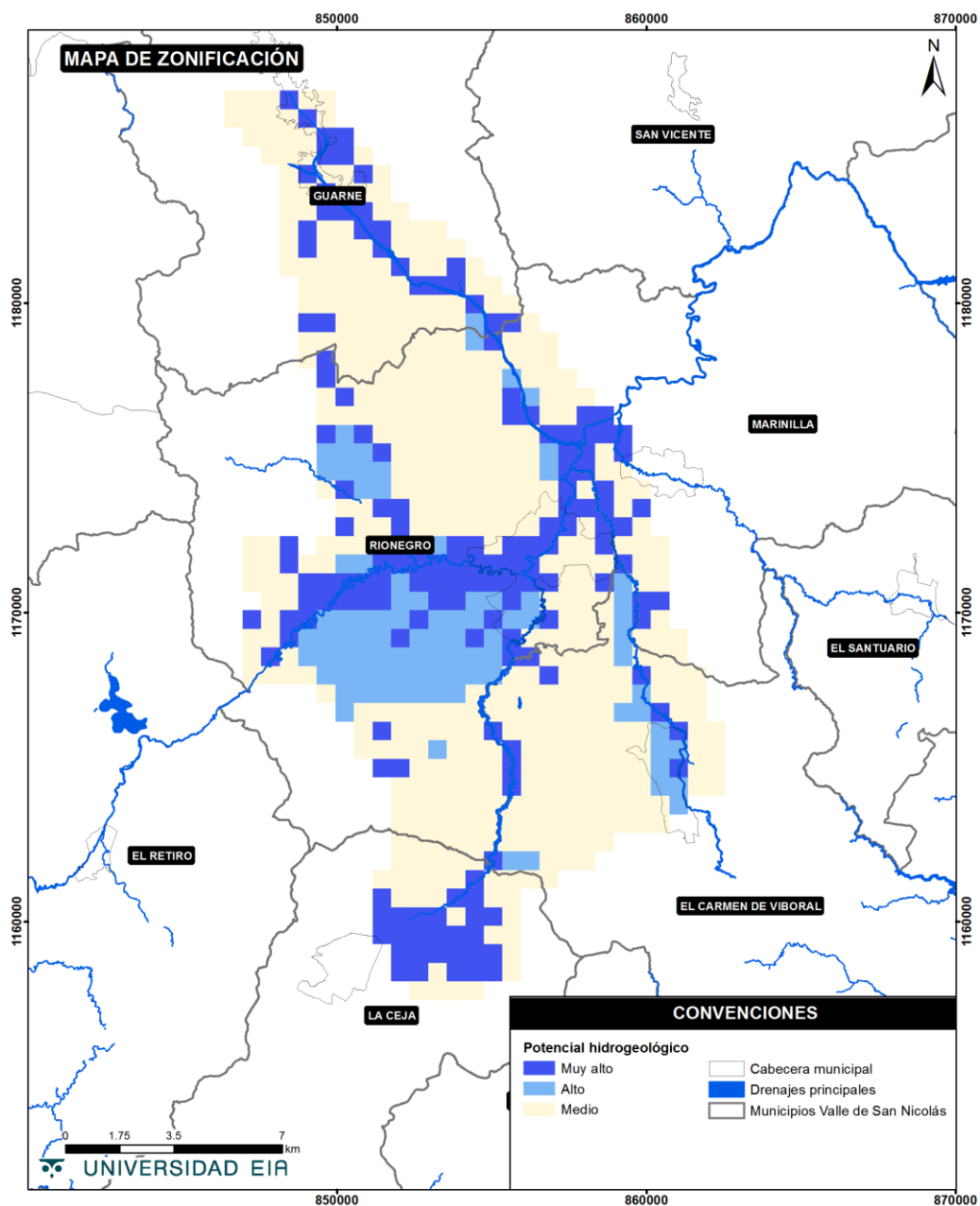
modelo muestra como están conectados en un mismo régimen de flujo subterráneo. Según los resultados del modelo numérico, cada acuífero cuenta con al menos un valor de conductividad hidráulica diferenciable de los otros dos acuíferos. Es así como se puede proponer la existencia de una unidad hidrogeológica asociada genéticamente con los depósitos aluviales recientes, la cual presenta los mayores valores de conductividad hidráulica; una segunda unidad hidrogeológica asociada genéticamente a depósitos recientes de terrazas aluviales con valores intermedios de conductividad hidráulica y una tercera unidad hidrogeológica con valores menores de conductividad (y probablemente de comportamiento anisotrópico) asociada genéticamente a la Superficie de erosión II de Rionegro. Esta unidad hidrogeológica corresponde estratigráficamente, con un saprolito desarrollado a partir de un avanzado proceso de meteorización química (lo que le confiere una permeabilidad secundaria).

Por lo tanto, desde el punto de vista de la evaluación geoelectrica y del modelamiento numérico puede concluirse que la unidad hidrogeológica de los depósitos de llanura de inundación posee el mayor potencial hidrogeológico (muy alto), le sigue la unidad hidrogeológica depósitos de terrazas aluviales, con un potencial (alto) y finalmente la unidad hidrogeológica saprolito de la superficie de erosión II de Rionegro con un potencial medio. (Figura 8.1).

La zonificación del potencial hidrogeológico lograda vía regresión multivariada (escala 1:25.000) (variables y pesos empleados se presentan en la tabla 8.1.) permite llegar a las mismas conclusiones e ilumina las mismas áreas del resultado presentado en el mapa de la Figura 8. Esta regresión permite además, definir cuáles son las áreas de bajo potencial hidrogeológico dado que esta regresión abarca un área mayor a la contemplada en el modelamiento numérico. (Figura 8.2), por lo tanto, empleando ambas aproximaciones, puede definirse un mapa ((Figura 8.3) de zonificación del potencial hidrogeológico para el Valle de San Nicolás. En este tercer mapa, se proponen cuatro zonas de potencial hidrogeológico para el Valle de San Nicolás. Este resultado excluye el altiplano donde se ubica el Municipio de La Unión, del cual se sospecha que presenta una unidad hidrogeológica adicional, la cual se recomienda sea estudiada posteriormente y se establezca si existe o no conectividad subterránea con la descrita para el resto del VSN.

Tabla 8. 1. Asignación de pesos de las variables contempladas para la Zonificación del potencial hidrogeológico. Nótese la inclusión de variables superficiales y del subsuelo.

Variable	Peso (%)
Pendiente	25
Geomorfología	20
Basamento	20
Cobertura	10
Precipitación	10
Cenizas	5



Variable	Peso (%)
Densidad de drenaje	5
Distancia drenaje	5
Total	100 %

Figura 8. 1. Figura 8.1. Zonificación del potencial hidrogeológico del VSN mediante modelamiento numérico. Las Celdas en Azul oscuro corresponden con

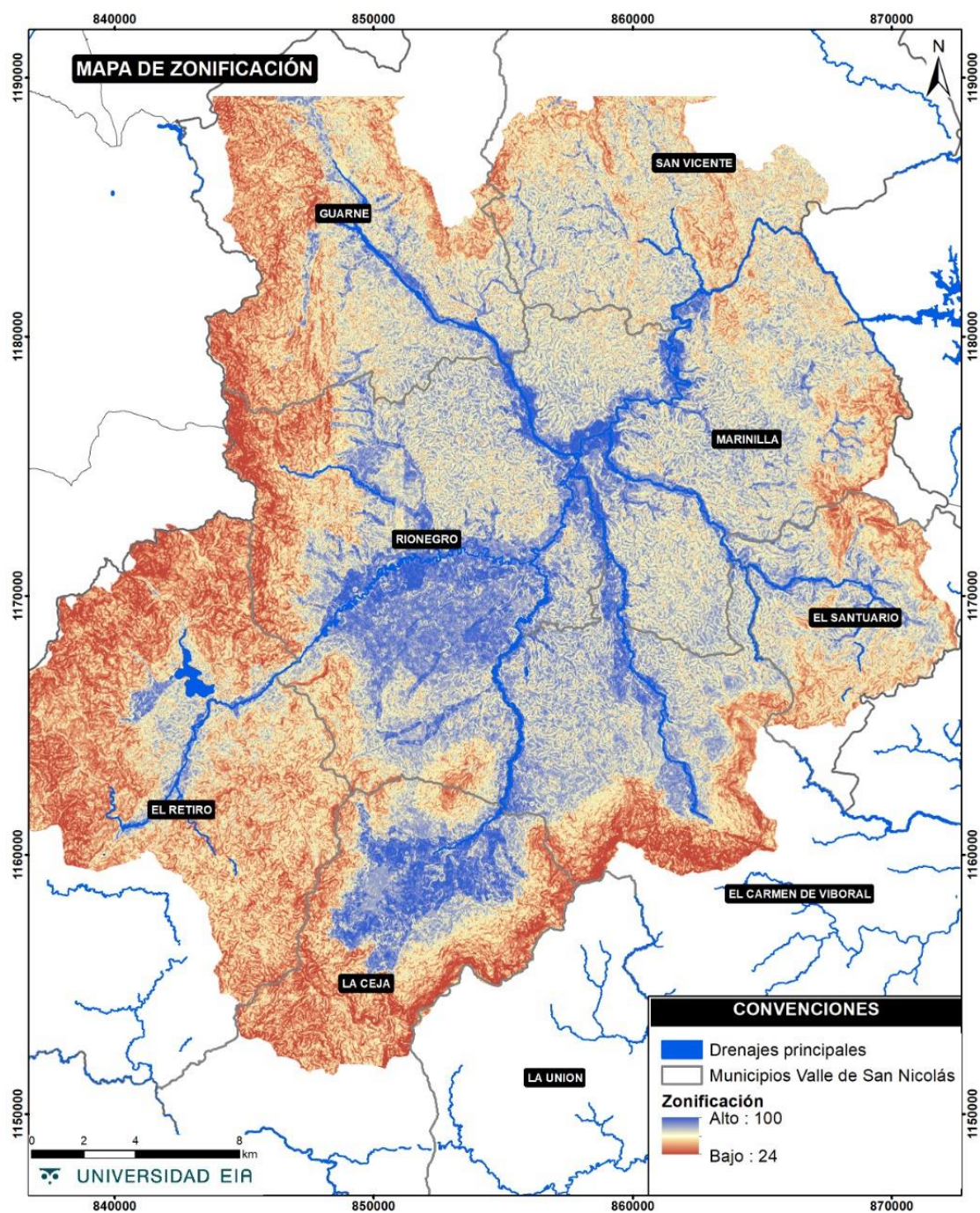


Figura 8. 2. Zonificación del potencial hidrogeológico del Valle de San Nicolás a partir de la regresión multivariada (variables consideradas en la Tabla 8.1). Los Colores azules indican muy alto potencial y se concentran principalmente en el área del acuífero de la llanura de inundación. Azules menos intensos se concentran en el área de el acuífero de las Terrazas aluviales. En color amarillo crema se ubican las áreas de potencial hidrogeológico intermedio, acuífero de la superficie de erosión II de Rionegro. Finalmente, en Rojo, áreas de potencial hidrogeológico bajo.

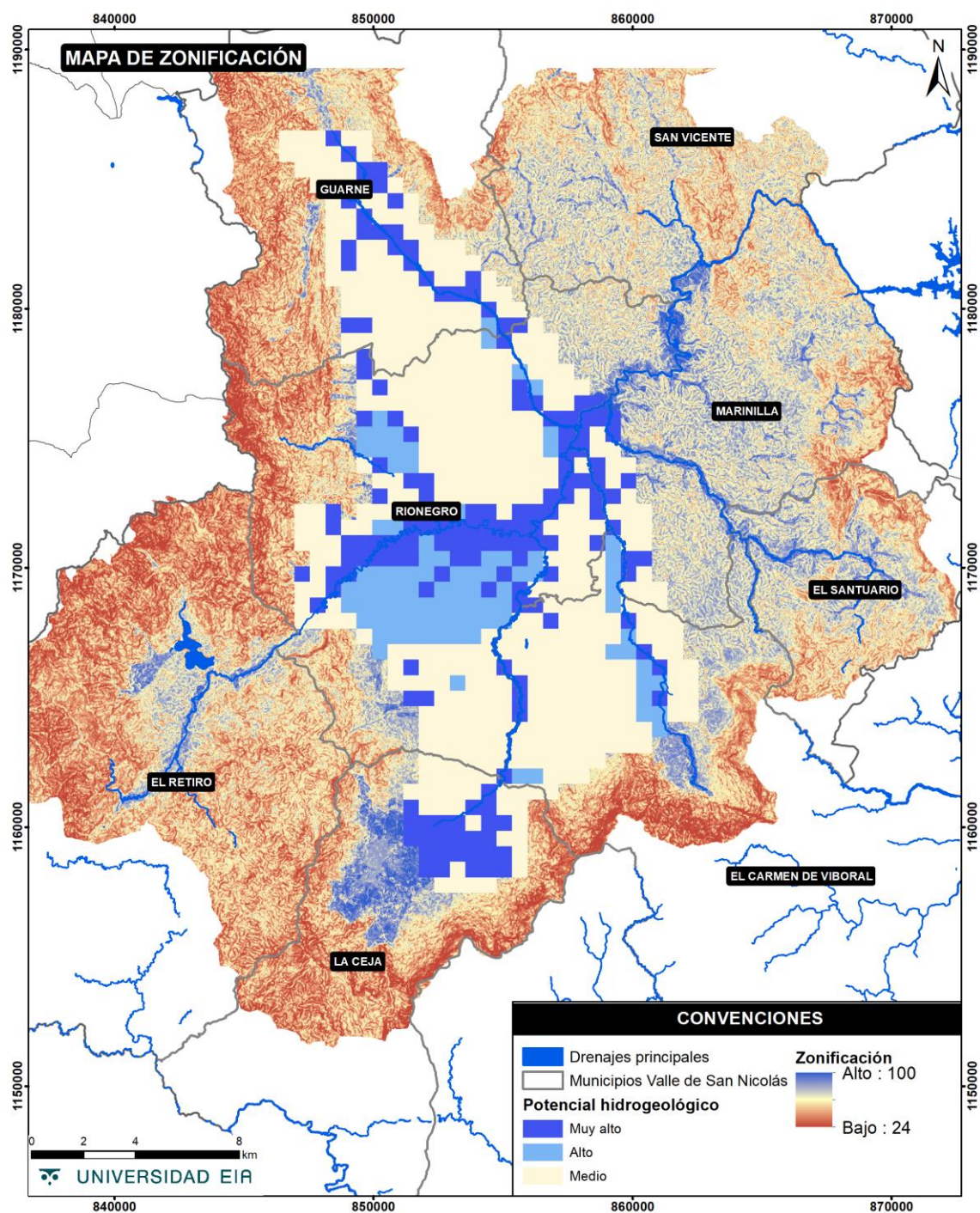


Figura 8. 3. Zonificación del potencial hidrogeológico del Valle de San Nicolás a partir de los resultados del modelamiento numérico (área más interna, modelada a escala 1:600.000). En la parte externa, zonificación lograda a partir de la regresión multivariada (modelada a escala 1:25.000). (variables empleadas para la regresión en la Tabla 8.1). Los Colores azules indican muy alto potencial y se concentran principalmente en el área del acuífero de la llanura de inundación. Azules menos intensos se concentran en el área de el acuífero de las Terrazas aluviales. En color amarillo-crema se ubican las áreas de potencial hidrogeológico intermedio, correspondiente principalmente con el acuífero de la superficie de erosión II de Rionegro. Finalmente, en Rojo, áreas de potencial hidrogeológico bajo.

Respecto a la zonificación hidrogeológica a la luz de la evaluación de la calidad del agua subterránea (Capítulo 6), el sistema acuífero no presenta todavía información de carácter isotópico para validar por esta vía el modelo el flujo subterráneo. Sin embargo, dado que las unidades hidrogeológicas propuestas tienen una primera aproximación a su conductividad hidráulica, es de destacar que existe una relación directa entre el potencial hidrogeológico y su vulnerabilidad a la contaminación toda vez que las unidades de mayor potencia hidrogeológica son a su vez las más conductivas y por lo tanto, en caso de presentarse contaminación puntual en el acuífero, se logrará una propagación del contaminante de manera más rápida por el subsuelo, logrando afectar de manera mayor más volumen de agua allí almacenado. Adicionalmente, dado que las zonas de mayor potencial hidrogeológico se encuentran más cercanas a la red de drenaje del Río Negro, y como se describió en el Capítulo 5, existe una conductancia entre el acuífero y el río, entonces existe una segunda fuente de vulnerabilidad a la contaminación a partir de contaminación existente en las aguas superficiales y que puede acceder al acuífero en aquellas épocas de laño hidrológico en donde se posibilite la recarga desde el río al acuífero.