



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Caracterización hidrogeológica y litoestratigráfica del sistema acuífero de Villa del Rosario en el predio La Casona, a partir de la interpretación de métodos geofísicos de perforación y de superficie.

Trabajo de grado modalidad investigación – Programa de Geología, Facultad de Ciencias Básicas

Departamento de Física y Geología, Universidad de Pamplona, Colombia.

Programa de Geología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona, Colombia.

E-mail: laura.carrero@unipamplona.edu.co

Esp. Julisa Torres - directora, Docente programa Geología, Universidad de Pamplona

Recibido: 17 junio 2021

Resumen	Abstract
<p>En el municipio de Villa del Rosario se encuentra ubicado el único acuífero de intra montaña transfronterizo de Colombia, que es aprovechado por sus habitantes por medio de pozos para la extracción de agua subterránea.</p> <p>Caracterizar este acuífero es importante para conocer la capacidad del subsuelo de almacenar y transmitir agua, optimizar la extracción, evitar la sobre explotación, disminuir costos en perforación y contribuir al conocimiento geológico de la región.</p> <p>Con el fin de mejorar el aprovechamiento del recurso hidrogeológico en el predio la Casona ubicado en el Municipio de Villa del Rosario, se analizaron los registros eléctricos de pozo, la interpretación de una tomografía eléctrica y un sondeo eléctrico vertical tomados en el mismo punto para obtener datos: litológicos, de porosidad, volumen de shale, saturación de agua y permeabilidad; se identificó la profundidad del acuífero y se presentaron los criterios básicos para la construcción del pozo que permita el aprovechamiento del agua.</p> <p>Palabras clave: acuífero, profundidad, porosidad, permeabilidad, Villa del Rosario.</p>	<p>In the municipality of Villa del Rosario is located the only cross border intra-mountain aquifer in Colombia, which is exploited by its inhabitants with wells for groundwater extraction.</p> <p>Characterizing this aquifer is important to know its capacity to store and transmit water, optimize extraction, avoid overexploitation, reduce drilling costs and contribute to the geological knowledge of the region.</p> <p>In order to improve the characterization and use of the hydrogeological resource in the Casona property located in the municipality of Villa del Rosario, the electrical well logs, the interpretation of an electrical tomography and a vertical electrical sounding, taken at the same point, were analyzed to obtain lithological data, porosity, shale volume, water saturation and permeability, the depth of the aquifer was identified and the basic criteria for the construction of the well that allows the use of water were presented.</p> <p>Keywords: Aquifer, depth, porosity, permeability.</p>

1. Introducción

En el departamento de Norte de Santander se encuentra ubicada la provincia hidrogeológica de montaña e intramontana del Catatumbo, dentro de la cual está ubicado el sistema acuífero Cúcuta – Villa del Rosario único con carácter transfronterizo. El acuífero tiene un flujo de aguas superficiales captadas por aljibes con una dirección suroeste – noreste hacia el río Táchira (1).

Debido a la baja precipitación, el municipio de Villa del Rosario, el aumento de la población y la sobre explotación del río

Táchira, depende del sistema acuífero Cúcuta – Villa del Rosario contando en el 2007 (2) con 542 pozos inventariados, lo que convierte en una necesidad primaria la exploración del acuífero y la identificación de sus características hidrogeológicas para su óptimo aprovechamiento.

Estudios geológicos, geomorfológicos, estratigráficos y estructurales de la zona, la mayoría de carácter regional de los que se resaltan Hubach (3), INGEOMINAS (4), Porta (5), Notestein et al (6), Oviedo (7), Royero (8), Torres

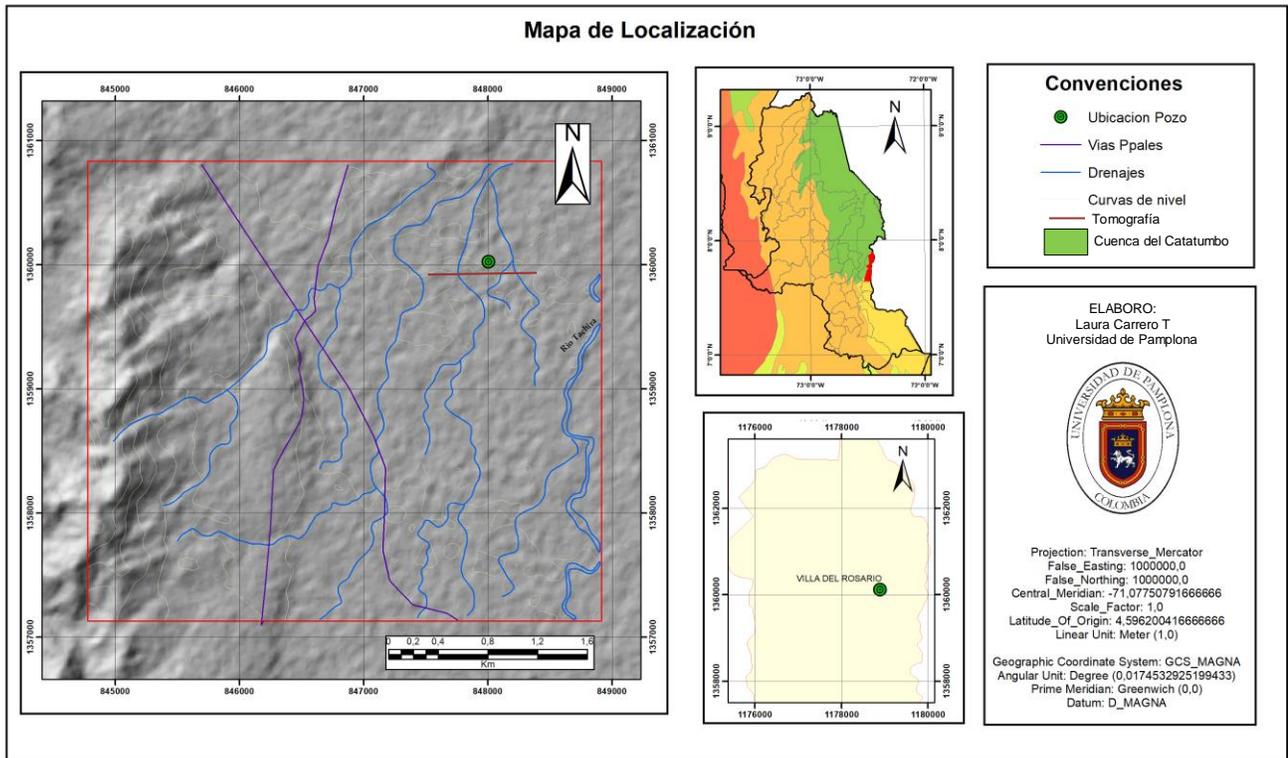


Figura 1. Localización del área de estudio

(9), Van Der Hammen (10) y Ward (11); sin embargo, los estudios hidrogeológicos son reducidos y puntuales, en su mayoría realizados por la Corporación Autónoma Regional de Norte de Santander (CORPONOR), por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y por la Universidad de Pamplona.

2. Localización

El área de estudio se encuentra ubicada sobre la cordillera oriental, departamento de Norte de Santander sobre la frontera con Venezuela, en la zona noreste del municipio de Villa del Rosario perteneciente al área metropolitana de Cúcuta, dentro del predio la casona (*Ver figura 1*) al oriente del río Táchira.

Dentro de las coordenadas del sistema MAGNA COLOMBIA BOGOTÁ ZONE:

	Norte	Este
P1	846.477	1.359.993
P2	848.700	1.359.993
P3	848.700	1.357.500
P4	846.477	1.357.500
Pozo	847.967	1.360.034

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio, sistema MAGNA COLOMBIA BOGOTÁ ZONE

3. Metodología

El desarrollo de este trabajo de investigación se realizó en varias etapas detalladas a continuación.

- Recopilación Bibliográfica

En esta etapa se recopiló y analizó información sobre el acuífero Cúcuta – Villa del Rosario como: ubicación, área e información para establecer posibles inferencias acerca del movimiento del agua subterránea como: mapas topográficos y geológicos, fotografías aéreas e imágenes satelitales, la geología de la zona y la metodología para la caracterización de un acuífero con métodos geofísicos.

- Interpretación de la información geológica

Se realizó el análisis e interpretación de la topografía, geomorfología, geología e imágenes satelitales para obtener un conocimiento preliminar de la localización del recurso hidrogeológico.

- Delimitación de la Cuenca

Se delimitó la cuenca del río Táchira y subcuencas, utilizando el modelo digital de elevación del terreno (MDET) y las capas de escurrimientos superficiales.

La demarcación de los polígonos se realizó con el software ARCGIS. Con base al modelo de elevación del terreno se generó el mapa de direcciones de flujo. Posteriormente se demarcaron las zonas de acumulación de agua para delimitar las cuencas según las direcciones de flujo y las zonas de acumulación; por último, convertimos el resultado a los polígonos de la cuenca del Río Táchira y sub cuenca Cúcuta-Villa del Rosario.

- Cartografía geológica superficial

Se elaboró la cartografía geológica como fuente de información directa sobre la composición litológica, granulometría, geomorfología y características estructurales de los afloramientos para obtener conocimiento sobre porosidad, meteorización, permeabilidad, planos de debilidad y fracturamiento.

- Interpretación de tomografía eléctrica.

Basado en la configuración del arreglo de adquisición; que para este caso fue Wener con los electrodos ubicados a diez (10) metros de distancia cada uno, se hizo la interpretación de los datos. Se realizó la revisión de la tabla de valores adquiridos y se descartaron los valores significativamente irregulares. Posteriormente se interpretaron los datos por medio del programa Surfer de licencia libre de la siguiente manera:

1. Se prepararon los datos para el procesamiento.
2. Se cargaron los datos procesados para obtener una gráfica de contornos preliminar.
3. Se generó el reporte estadístico de los datos
4. Con el método de gráfica King del software se hizo el modelado de los contornos preliminares, basado en el reporte estadístico, con el fin de generar la imagen de la tomografía eléctrica.
5. Por último, se seleccionó la paleta de colores elegida para visualización.

- Interpretación del registro eléctrico

Los registros eléctricos se trabajaron con la suite kingdom petrophysics del software Kingdom de IHS Markit en cuatro fases: digitalización, tratamiento, procesamiento e interpretación de los datos.

1. Digitalización

Para la digitalización del reporte con los registros eléctricos en formato original PDF fue necesario cargar la información de un registro eléctrico de pozo digital preexistente en formato LAS; en la interfaz del pozo dejar únicamente la profundidad, crear las curvas de cada registro (Resistividades, Gamma Ray, densidad) con los rangos y profundidades correspondientes, posteriormente enlazar la imagen de cada registro eléctrico a las curvas correspondientes, digitalizarlas sobre la imagen y por último exportar los datos en formato LAS.

2. Tratamiento de datos

Para realizar el tratamiento de los datos se creó un nuevo proyecto en Kingdom y se cargaron los registros eléctricos digitalizados en la suite kingdom petrophysics.

Se generaron las gráficas de cada registro y se evaluaron con la herramienta, el proceso finalizó con el suavizado de las curvas para disminuir los márgenes de error ocasionados en la digitalización.

3. Procesamiento

El procesamiento de los datos consistió en la interpretación litológica y la generación de las curvas: Volumen de Shale y porosidad.

– Interpretación Litológica

La interpretación litológica se hizo a partir del registro Gamma Ray. Primero se generó la gráfica del registro, para crear un histograma y establecer los rangos de valores correspondientes para cada litología; estos rangos fueron definidos con bibliografía y detallados por el autor basado en los resultados de la gráfica y las descripciones de campo.

– Generación de curvas: Volumen de Shale y Porosidad

El software Kingdom tiene integradas las formulas matemáticas necesarias para el cálculo de porosidad y volumen de shale; se pueden realizar con los registros eléctricos: Gamma Ray, Neutrón/Densidad o Valor Gamma Ray mínimo/Neutrones densidad.

Porosidad: Para el cálculo de la porosidad se seleccionó de parámetro de entrada la resistividad intermedia y el Gamma Ray para obtener de formato de salida porosidad; se generó la curva de porosidad con valores que varían de 0 a 100% para posteriormente a partir de la gráfica creada obtener la tabla cualitativa de valores.

Volumen de Shale: Para el cálculo del Volumen de Shale se seleccionó de parámetro de entrada la resistividad baja y el Gamma Ray, para así obtener de formato de salida VSh.

Con este procedimiento se creó la curva de VSh, con valores que varían entre cero (0) y cien por ciento (100%) para posteriormente, a partir de esta gráfica generar la tabla cualitativa de los valores representados.

4. Interpretación

A partir de los datos generados en el procesamiento es posible interpretar la permeabilidad del subsuelo y la saturación de agua:

– Permeabilidad

La permeabilidad se calculó al superponer las curvas de porosidad y volumen de shale, se configuró que los valores que partieran del 0% hasta la curva de Volumen de Shale (VSh) se graficara como arcilla, los valores desde la curva de Volumen de Shale hasta la curva de porosidad se interpretaran como arena y los valores desde la curva de porosidad hasta el 100% quedaran en blanco representando la permeabilidad (Los poros que no están rellenos con partículas tamaño arcilla).

Por último, se generó la tabla de datos de la gráfica de permeabilidad.

– Saturación de agua

Para el cálculo de la saturación de agua se seleccionó de parámetro de entrada porosidad y resistividad profunda para obtener de formato de salida Saturación de agua.

Debido a que los datos de saturación de agua tienen un alto porcentaje de error, este resultado solo se usó para verificar que los valores más altos coincidieran

con las profundidades a las que el reporte del pozo registraba presencia de agua.

- Correlación de las interpretaciones geológicas y geofísicas.

Para generar un modelo del subsuelo integral, en el programa de digitalización Corel se superpuso los resultados de la interpretación de los métodos geofísicos. Se digitalizaron los rasgos en 2D obtenidos por la tomografía y detallados por las características 1D obtenidos con la interpretación de los registros eléctricos del pozo.

Se correlacionaron visualmente las anomalías de la tomografía con los datos del pozo y se extrapolaron sobre todo el perfil para generar el modelo interpretativo.

4. Marco Geológico

La Geología de la zona de estudio está conformada en su gran mayoría por depósitos cuaternarios del río Táchira y rocas miocenas de la Formación Guayabo (*Ver figura 8*).

4.1 Formación Guayabo (N1g)

Fue descrita por primera vez en la cuenca del Catatumbo en la concesión Barco en 1944 (6), el nombre deriva del Cerro Guayabo en el Distrito de Colón Venezuela.

Su espesor y contactos son difíciles de establecer debido a que el techo de la Formación está erosionado. En su sección tipo consta “de base hacia la parte superior por arcillas arenosas y grises con areniscas (186 m), arcillas y arcillolitas arenosas intercaladas con areniscas (181 m) y capas medias a gruesas de areniscas con arcillolitas localmente moteadas (436 m)”. Allí alcanza un espesor estimado de 803 metros (6).

En el área de estudio se encuentra aflorando en el extremo oeste, donde la topografía se eleva progresivamente.

Está conformada por capas medias y gruesas de areniscas de grano medio, subredondeados, moderadamente seleccionados, de composición variable entre litoarenitas a sublitoarenitas intercaladas con capas medias de arcillolitas con estratificación plano paralela discontinua. Debido a las deformaciones tectónicas las capas se encuentran altamente fracturadas y plegadas (Figura 2 y 3).



Figura 2 Afloramiento de la Formación Guayabo en el área de estudio, conformado por capas medias y gruesas de sublitoarenitas intercaladas con capas gruesas de arcillolitas.



Figura 4. Contacto discordante erosivo entre una secuencia sedimentaria conformada por una capa muy gruesa de litoarenitas intercaladas por capas muy gruesas de arcillolitas de la Formación Guayabo y la Terraza aluvial Qa11



Figura 3. Afloramiento característico de la Formación Guayabo en el área de estudio.

A la Formación Guayabo le fue asignada una edad de Oligoceno superior a mioceno con palinología (10) con ambiente sedimentario interpretado como terrestre fluvial (9) y se encuentra suprayacida en contacto discordante con los depósitos cuaternarios tipo terraza aluvial.

4.2 Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios se encuentran en contacto discordante erosivo con la Formación Guayabo (Ver figura 4), son predominantemente de origen fluvial ubicados sobre el valle del río Táchira (Ver figura 5), la zona de interés se encuentra ubicada en las terrazas aluviales del río que están caracterizadas por su edad y evolución.



Figura 5. Terraza aluvial Qa11

4.2.1 Coluviones (Qc)

Los depósitos de coluvión, se encuentran formados por compuestos por limos y cantos rubificados. Litológicamente formados por bloques, guijarros y gravas bien redondeados y esfericidad alta, de arenisca cuarzosa de grano fino a grueso con alto contenido de cemento síliceo. El espesor de la unidad es variable entre un par de metros a decenas de metros (7).

4.2.1 Terraza antigua Qt1

Delimitada principalmente por la diferencia de altura y caracterizada por encontrarse en el margen distal del río. A diferencia de la terraza aluvial reciente (Qt2) presenta rasgos de erosión más marcados, como la profundidad de los drenajes. Esta terraza es el resultado de los cambios en los niveles base del río, que se conservan como llanura aluvial antigua.

Está conformada por cantos finos a gruesos, redondeados con esfericidad alta mal seleccionados, clasto soportados en una matriz de guijarros, guijos y arenas gruesas angulares, con esfericidad baja y mal seleccionado, compuestos por rocas sedimentarias en su mayoría cuarzoareniscas de grano medio, moderadamente seleccionada y de esfericidad media, localmente los afloramientos presentan imbricación que permite analizar la dinámica de flujo que la depositó (Figura 5).

4.2.2 Terraza aluvial reciente Qt2

Sobre la terraza aluvial reciente se encuentra ubicado el objeto de este estudio, corresponde al oriente del área y está conformada por gravas de guijos finos a gruesos matriz soportados en arena de grano grueso, moderadamente seleccionada y redondeada. intercalados con lentes medios y gruesos de arenas gruesas y espesores reportados de más de 30 metros (Ver figura 7).



Figura 6. Terraza antigua Qt1 del río Táchira, ubicada sobre la vía Cúcuta- Villa del Rosario



Figura 8. Terraza más reciente del Río Táchira

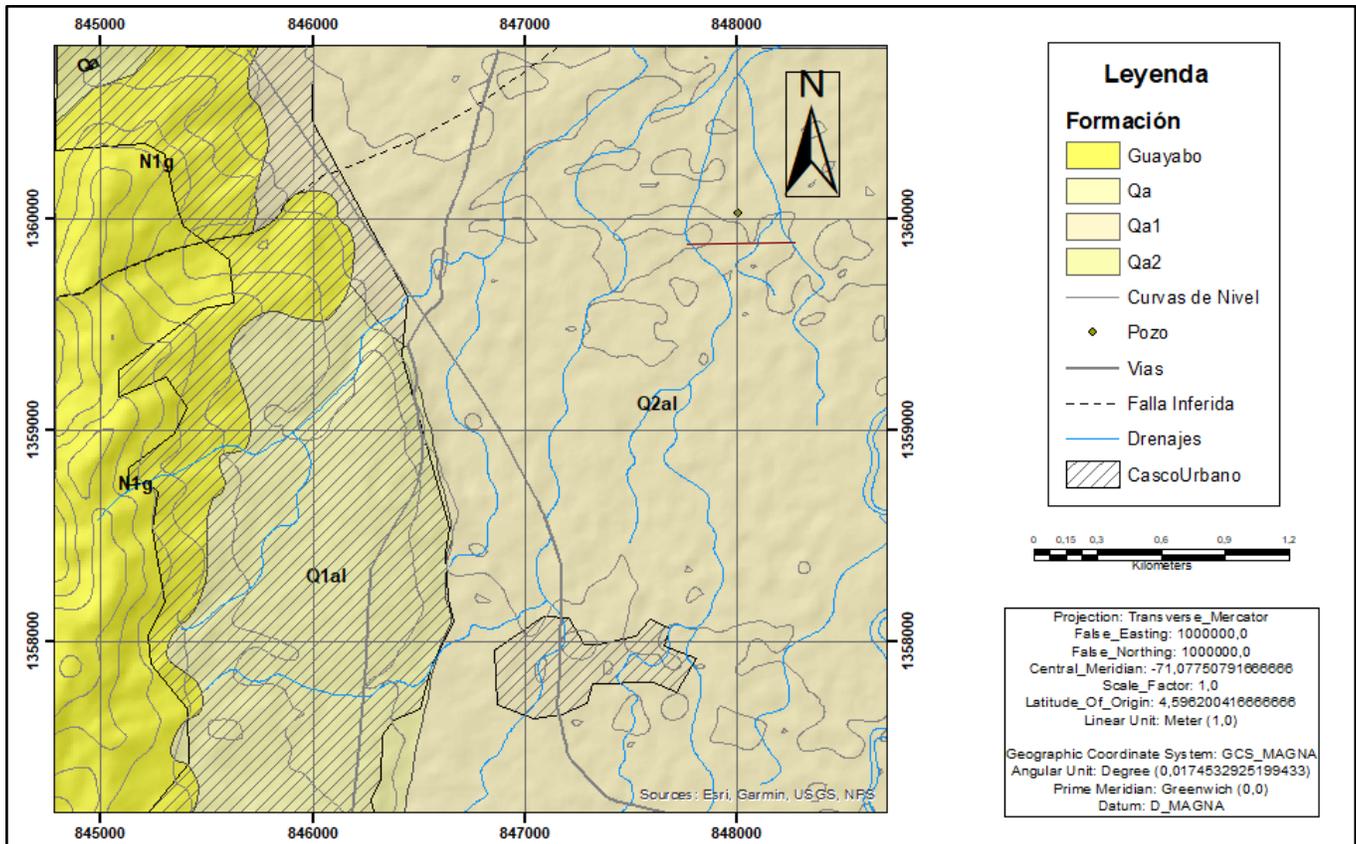


Figura 7. Mapa Geológico de la zona de estudio-

5. Marco Hidrogeológico

Las provincias hidrogeológicas son definidas con unidades litoestratigráficas separadas por rasgos estructurales que coinciden con límites de cuencas geológicas mayores y que desde el punto de vista hidrogeológico, corresponde a barreras impermeables representadas por fallas regionales y altos estructurales (12).

Las provincias hidrogeológicas agrupan cuencas sedimentarias con características litológicas, estructurales y geomorfológicas similares que presentan un comportamiento hidrogeológico homogéneo, por sus potencialidades de flujo y geometría.

Las unidades hidrogeológicas pueden agruparse en tres categorías de acuerdo a su posición geográfica (12):

- Costeras e insulares: provincias que comparten ambientes costeros y litorales
- Montañas e intramontanas: Provincias que se localizan en la zona andina y sus valles intramontañosos.
- Pericratónicas: entre el piedemonte de la cordillera oriental y el escudo de Guyana localizado en la parte más oriental del territorio colombiano.

La delimitación de Colombia en provincias hidrogeológicas fue elaborada por el Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales en el 2010, a partir de las unidades tectónicas y cuencas sedimentarias de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (13).

5.1 Provincia hidrogeológica del Catatumbo

El instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales (13) describe que de las cinco provincias de montaña e intramontana solo la provincia del Catatumbo es transfronteriza, coincidiendo en sus límites norte y oriente con Venezuela, el sur con rocas cretácicas de la Cordillera Oriental y el occidente con el macizo de Santander.

Esta provincia se encuentra limitada por el basamento jurásico y un complejo de fallas que pueden actuar como límite impermeable.

Dentro de la provincia hidrogeológica del Catatumbo se encuentra sistema acuífero Cúcuta – Villa del Rosario que tiene un flujo de aguas subsuperficiales captadas por aljibes con una dirección suroeste – noreste hacia el río Táchira.

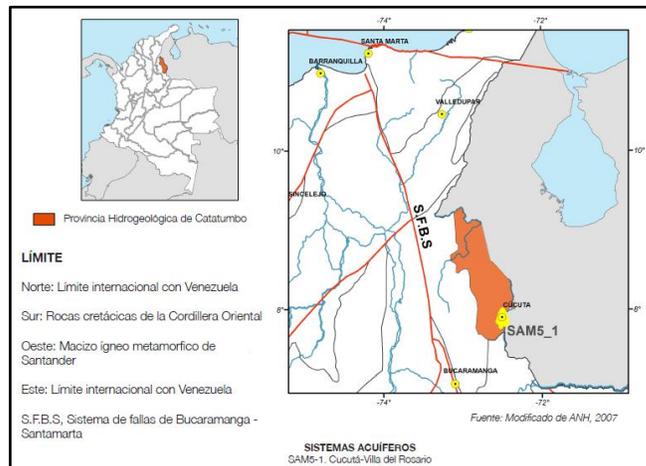


Figura 9. Provincia hidrogeológica del Catatumbo. Fuente: (1)

5.1.2 Sistema acuífero Cúcuta – Villa del Rosario

Dentro de la provincia hidrogeológica del Catatumbo se encuentra el sistema Cúcuta – Villa del Rosario con más de 147 Km².

La fuente de recarga principal es la precipitación y las aguas de escorrentía superficial, que fluyen desde las colinas que circundan el valle del río Táchira. Posiblemente exista alguna alimentación del acuífero desde la Formación Carbonera y Guayabo. En el área del Pamplonita, la recarga en época lluviosa se produce sin mucho retraso por las características de porosidad de los sedimentos y debido a que la cuenca no se encuentra en estado de impermeabilización, el descenso de niveles es de velocidad moderada (1).

En el sector de Villa del Rosario, se ha reportado (14) que el acuífero presenta espesores de hasta 90 metros. En su mayor parte se comporta como semiconfinado con la excepción de las zonas cercanas al río Táchira, donde se comporta como libre. Las arcillolitas de la formación León actúan como base del acuífero y como límite lateral hacia el occidente, al norte está limitado por la Formación Guayabo (16).

En la mayor parte del acuífero de la región Villa del Rosario, se encuentran descensos de niveles piezométricos entre marzo y junio e incrementos de niveles entre junio y agosto. Estas variaciones de niveles muestran una relación inversa con las variaciones estacionales, debido a las capas superficiales poco permeables que retrasan la recarga con agua de lluvia del acuífero semiconfinado. Las capas arcillosas en la superficie causan un retraso en la recarga de dos meses por lo menos. El retraso es menor al disminuir el espesor de las capas arcillosas.

En este sistema el IDEAM ha realizado pruebas de bombeo en la zona de Villa del Rosario obteniendo los siguientes resultados (13):

- Transmisividad: 25 m²/día
- Conductividad hidráulica (K): 13/día

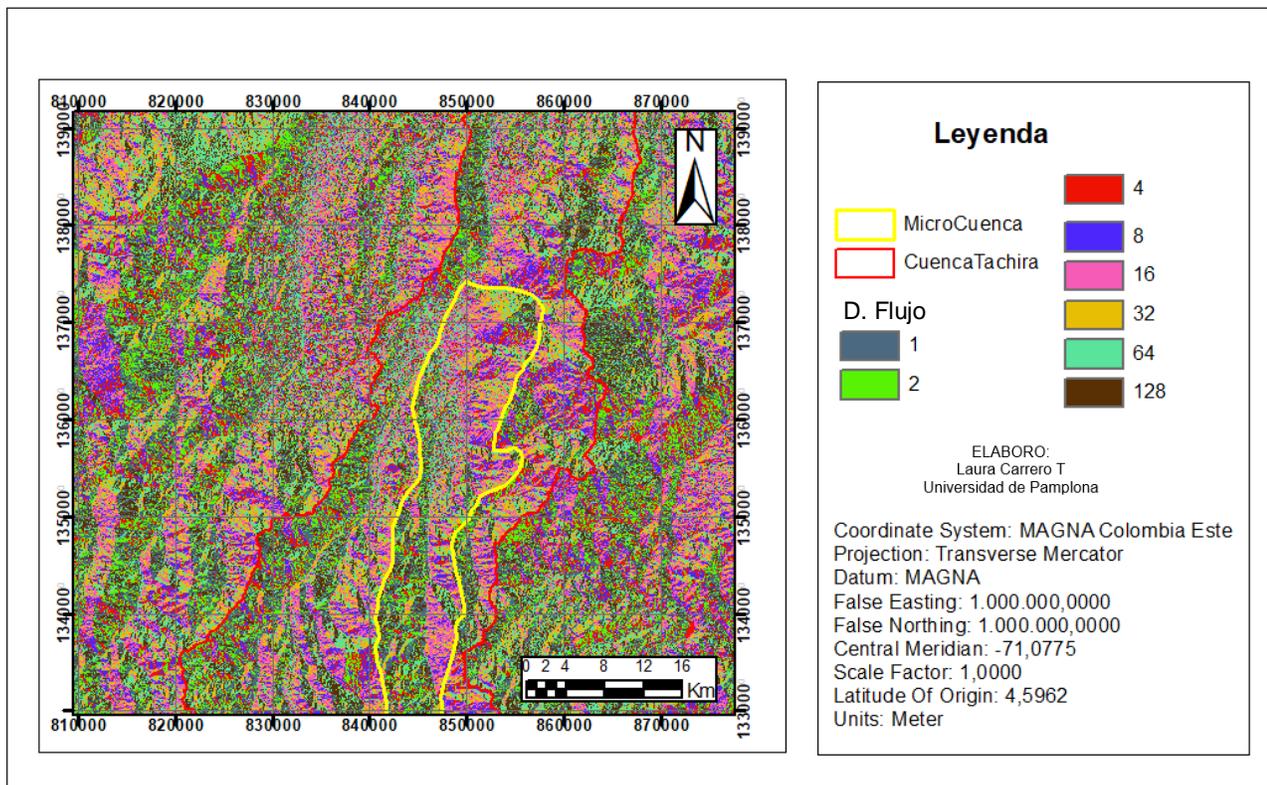


Figura 10. Mapa de dirección de flujo, generado en el software ArcGIS 10.3 a partir del Modelo de Elevación Digital.

- Cociente de almacenamiento (S): $5 \cdot 10^{-3}$ (Adimensional)

La Corporación Autónoma Regional de Norte de Santander ha inventariado 560 puntos de captación de agua, divididos en 97% aljibes, 3% pozos y 1% manantiales, todos ubicados sobre los depósitos de Terraza Aluvial de Villa del Rosario (15).

6. Delimitación de la cuenca

Para establecer las características hídricas e hidrogeológicas de una zona; se necesita dividirla en áreas específicas que permitan entender los parámetros físicos que tienen incidencia en ella. Estas zonas se dividen en regiones, cuencas y subcuencas hidrológicas, las cuales son delimitadas de acuerdo a factores principalmente físicos como rasgos fisiográficos, geomorfológicos, estructurales, topográficos, hidrográficos y de influencia para la población (12).

Para definir estas zonas se realizó un mapa de dirección de flujo (ver figura 10) que permitió entender el comportamiento del agua de escorrentía.

Este mapa representa con los colores café, azul, amarillo y morado las zonas por las que está fluyendo el agua con mayor velocidad a favor de la pendiente y los colores verde y gris representan las zonas con menor flujo de agua.

Con base al mapa de flujo se establecieron las zonas de acumulación de agua, relacionadas con pendientes y flujos de agua muy suaves.

A partir los insumos generados: Modelo de Elevación Digital, Mapa de Flujo y zona de acumulación se generaron los polígonos correspondientes a la cuenca principal del río Táchira y la sub cuenca Cúcuta-Villa del Rosario.

En el mapa de la cuenca hidrográfica (Ver figura 11) el software unió las cuencas del río Pamplonita y del río Táchira que son independientes en la zona sur del mapa, pero en la zona central del mismo el río Táchira desemboca en el río Pamplonita y unen sus aguas para algunos kilómetros más adelante desembocar en el río Zulia que termina en el río Catatumbo.

La subcuenca Cúcuta-Villa del Rosario donde se encuentra el área de estudio está delimitada por el polígono amarillo (Ver figura 11) corresponde únicamente a la parte norte del río Táchira antes de su desembocadura

El mapa abarca por completo la cuenca del río Táchira que nace a 3.368 metros sobre el nivel del mar al noroeste del páramo de Tamá en el cerro las banderas, entre el estado venezolano de Táchira y el departamento colombiano de Norte de Santander, siendo su nacimiento un punto limítrofe entre ambas naciones y tiene una longitud de 87 kilómetros con un área de cuenca total de 1.843 Km². (9)

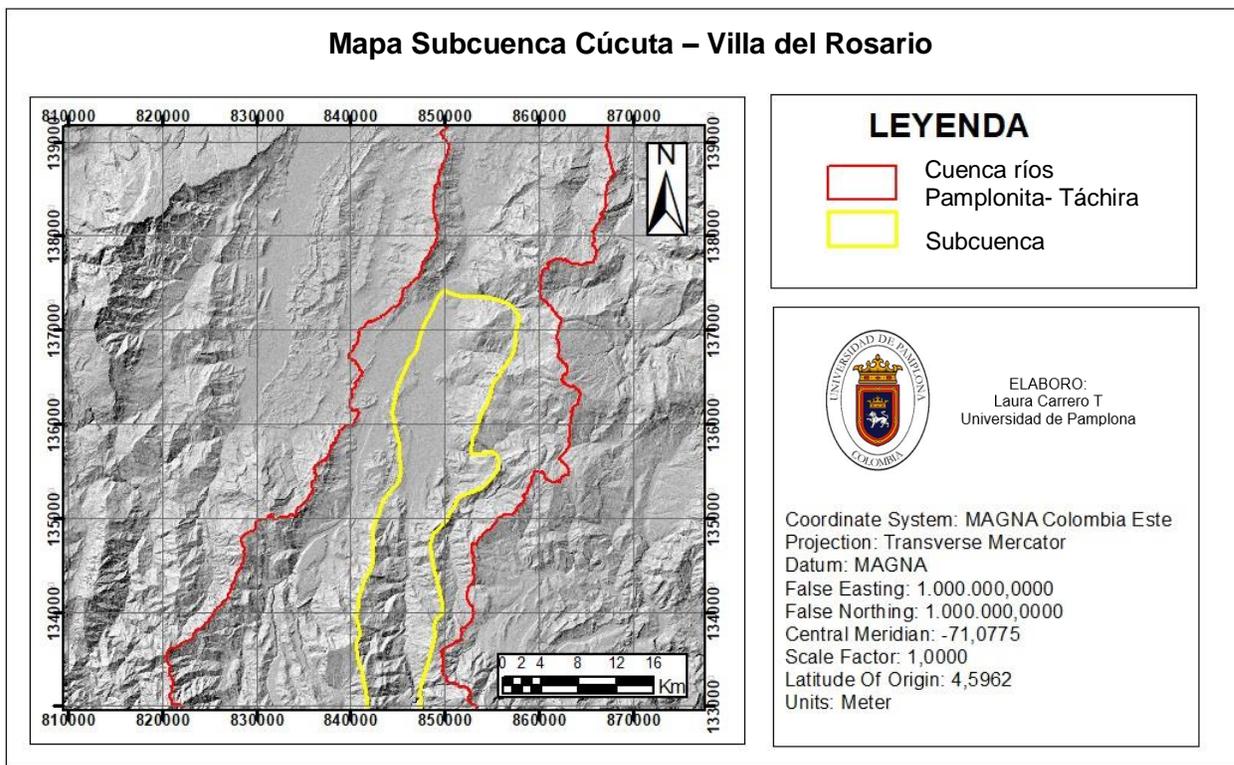


Figura 11. Mapa de la cuenca hidrográfica del río Pamplonita y Táchira y la subcuenca Cúcuta- Villa del Rosario

7. Interpretación de Métodos Geofísicos

7.1 Tomografía eléctrica

Se realizó la interpretación de la de la sección 2-D, producto de la tomografía eléctrica que fue adquirida por arreglo Wenner con los electrodos ubicados a 10 m cada uno.

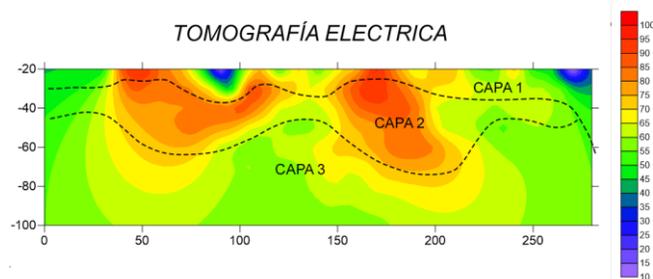


Figura 12. Tomografía eléctrica de la zona de estudio interpretada

CAPA 1: Correspondiente a un nivel arenoso con contenido local de gravas medias a gruesas representadas en las anomalías que superan los 100 Ohm y alto contenido de agua en los niveles con sedimentos menos gruesos.

CAPA 2: Nivel con presencia mucho mayor de gravas y resistividades mayores, saturadas en agua. La morfología coincide con un depósito de terraza.

CAPA 3: Distorsionado por la profundidad, es posible inferir con base a los parámetros establecidos en la bibliografía que por sus resistividades que oscilan entre 65 y 40 (ohm), es un nivel más arenoso.

7.2 Registro eléctrico

La interpretación del registro eléctrico permitió detallar la interpretación preliminar y general obtenida por la tomografía eléctrica. El pozo tiene una profundidad total de 44 metros, de los cuales se tiene información completa desde los 2 metros hasta los 42 metros, suficiente para encontrar el nivel freático del acuífero, estudiar las características hidrogeológicas del subsuelo y determinar los parámetros necesarios para la construcción y aprovechamiento del mismo.

Una a una se describirán las características del pozo y el proceso utilizado para determinarlas (Ver figura 13).

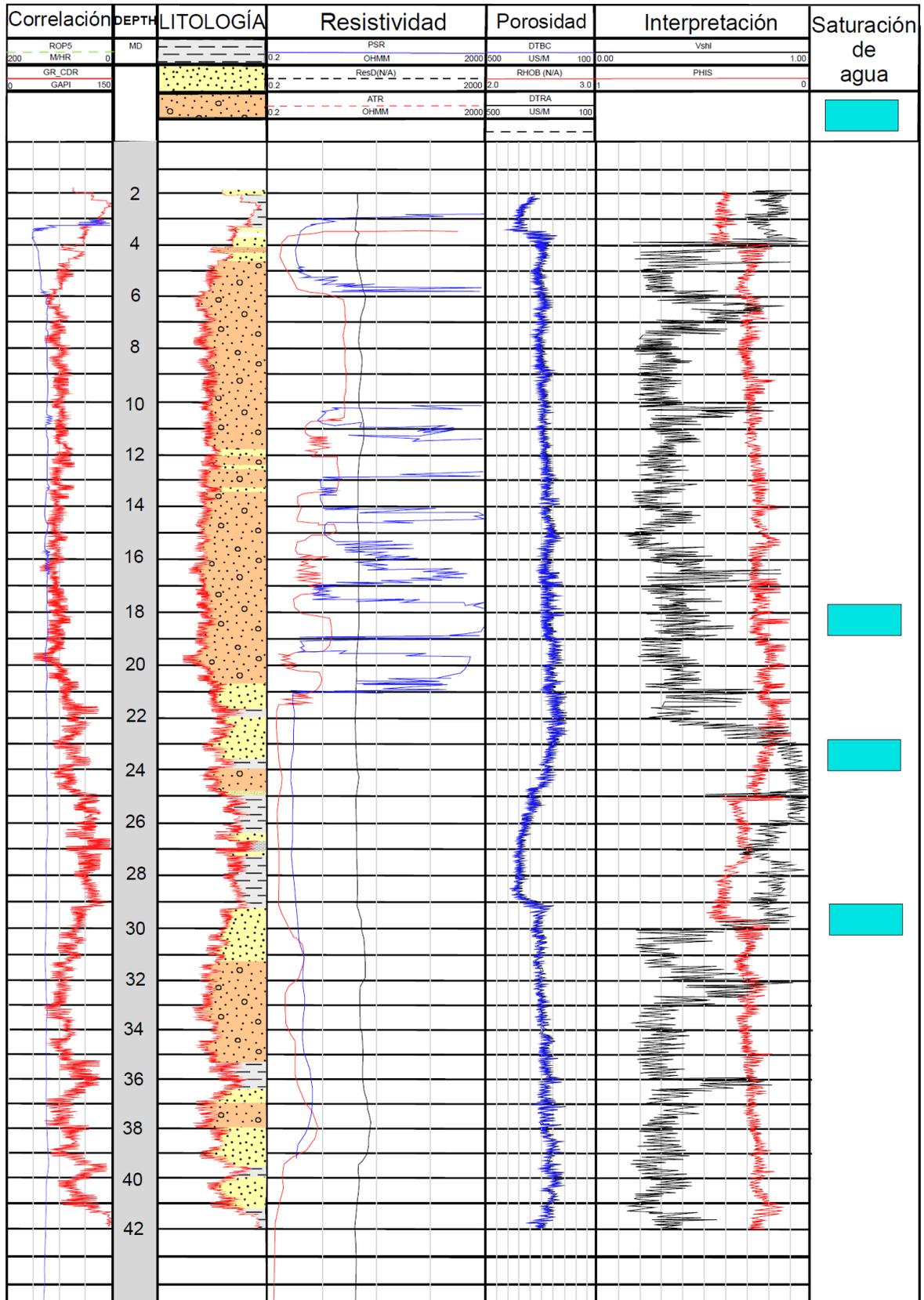


Figura 13. Interpretación del registro eléctrico vertical. De izquierda a derecha: Correlación de relatividad-Gamma ray, profundidad, resistividad, porosidad, permeabilidad y saturación de agua

6.2.1 Litología

El registro de rayos Gamma, es la medida de la radioactividad natural total de la formación y resulta por la desintegración natural del Uranio (U), Potasio (K) y Torio (Th), en las rocas sedimentarias refleja el contenido de arcilla que es donde se concentran los elementos radioactivos.

La interpretación litológica del pozo (*ver figura 14*) en la tercera columna del registro, se realizó únicamente con el registro Gamma Ray de la siguiente forma:

Gravas: Se caracterizaron como depósitos de grano muy grueso y gravas, los niveles con un registro eléctrico gamma ray que varió entre 0 y 40. Es el predominante en el pozo y presenta características óptimas para el almacenamiento de agua, localmente está intercalado por algunos niveles de arenas.

Arenas: Los niveles con valores de Gamma Ray que varían entre 40 y 70 fueron representados como bancos de arena, mantienen las buenas condiciones de almacenamiento, posiblemente por la buena selección de depósito o por la baja compactación.

Arcillas: Los niveles de Gamma Ray superiores a 70 fueron caracterizado como arcillosos o limosos, presentan condiciones de almacenamiento muy deficientes, pero no impermeable del todo, por la presencia de agua en niveles superiores e inferiores se puede inferir que a pesar de la litología aun permiten una filtración parcial del agua subterránea.

6.2.2 Volumen de Shale

Con el registro Gamma ray también se puede medir el volumen de shale (Vsh) de cada nivel, cuantificando el contenido de arcillas. Para que este método sea efectivo es necesario que no haya presentes otros minerales radioactivos

$$Vsh = \frac{GR\ zona - GR\ limpio}{GR\ arcilla - GR\ limpio}$$

La fórmula no se puede aplicar si hay presencia de aguas radioactivas, fragmentos de rocas ígneas, feldespatos o arcillas no radioactivas.

La interpretación de volumen de shale se realizó con el software Kingdom que permite incluir la fórmula de Volumen de Shale y separar el Gamma Ray en general, limpio y con solo los valores de la arcilla; para después ejecutarla y dar el resultado tal y como está en la figura 13, columna 6 color negro.

El resultado son valores proporcionales que varían de 0 (sin presencia de partículas tamaño arcilla en el suelo) a 1 (el total de la muestra corresponde a partículas tamaño arcilla) como se muestra en la figura 15.

La gráfica de volumen de shale concuerda con la interpretación de la litología:

- De 2 a 4 metros de profundidad un nivel de arcillolitas con un volumen de shale que oscila en 80%
- De 4 a 23 metros de profundidad una intercalación de gravas con algunos niveles de arenas, y un volumen de shale general que oscila entre el 20% y 30%
- De 23 a 29 metros de profundidad con una intercalación entre limos, arcillas y areniscas limosas con un volumen de shale de más de 90% para las arcillas y 80% o más para los limos y las arenas
- Un último paquete conformado por una intercalación entre gravas y arenas de 29 a 42 metros de profundidad y un volumen de shale general entre 20% y 30%, localmente hay niveles de limos que aumentan el volumen de shale.

6.2.3 Porosidad

Con los registros eléctricos también se calculó la porosidad y un estimado de porosidad efectiva, que representa la permeabilidad al interpretarse la relación con el volumen de shale.

- **Porosidad:** La porosidad está definida por los espacios que existen entre granos, independiente de si estos espacios están conectados o no, el procesamiento e interpretación de los datos permitió construir una curva inicial de porosidad que está determinada por la fórmula:

$$\phi_d = \frac{pma - pb}{pma - pf}$$

Donde:

pma = Densidad de la matriz

pb = Densidad de la mesa medida

pf = Densidad del flujo

El resultado del procesamiento se presenta en la figura 16, que también concuerdan con la interpretación litológica y mantiene un promedio de 50% en casi todo el pozo con excepción de los niveles arcillosos donde la porosidad aumenta hasta 70% o incluso 80%.

6.2.4 Porosidad efectiva

Se realizó un segundo procesamiento de la curva de porosidad que tuviera en cuenta los valores del gamma ray y por consiguiente la presencia de arcilla en el subsuelo, para obtener una porosidad efectiva con valores que incluyeran la presencia de arcilla entre los granos, este re procesamiento se realizó con el software y permitió mejorar la precisión de la curva de porosidad graficada en la columna 5 de la figura 13

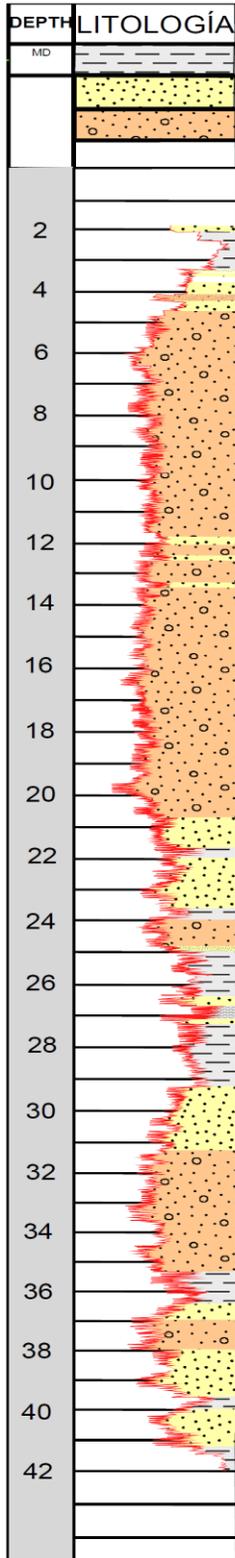


Figura 14. Gráfica con interpretación de litología a partir del Gamma Ray

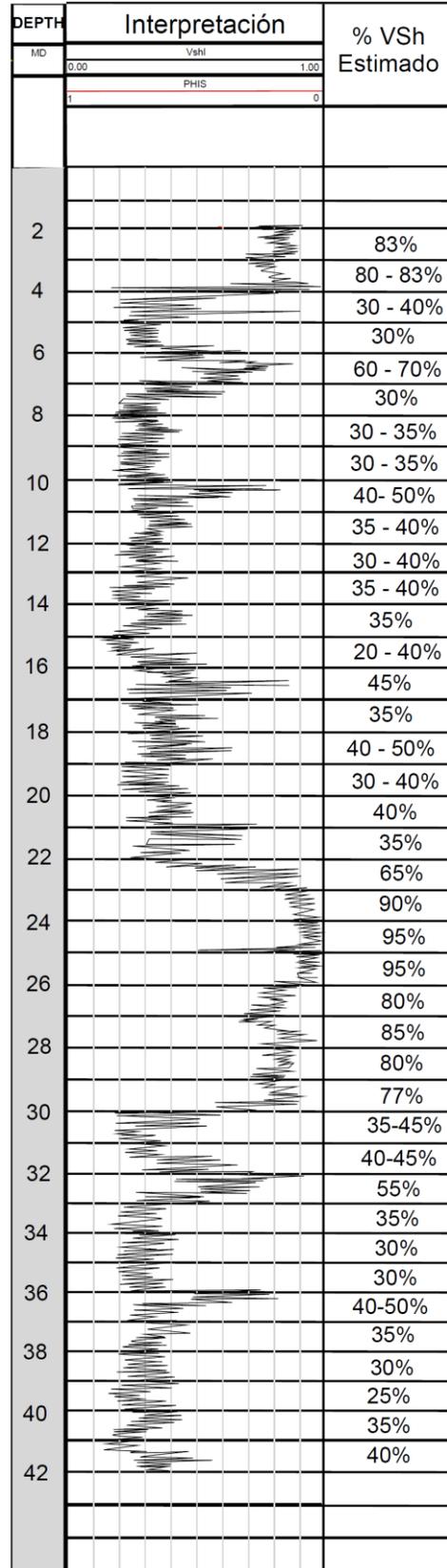


Figura 15. Gráfica y porcentaje promedio del Volumen del Shale.

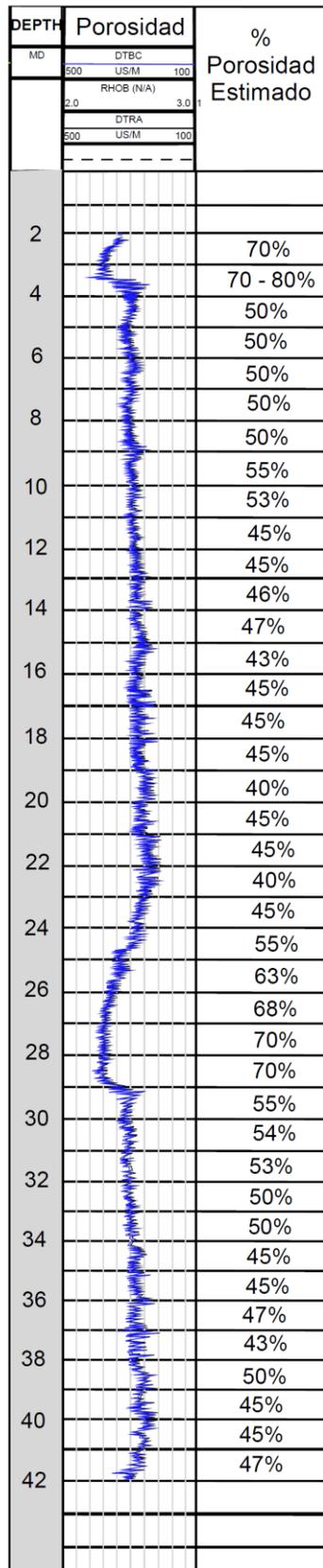


Figura 16. Gráfica y porcentaje promedio de porosidad.

con la gráfica de color rojo. Pero este resultado no se puede considerar como permeabilidad porque específicamente no está leyendo la conexión entre poros.

Sin embargo, se puede resaltar que para los niveles más arcillosos los valores de porosidad disminuyeron significativamente.

6.2.5 Permeabilidad

No fue posible calcular la permeabilidad del pozo con los registros eléctricos que se tenían para esta investigación, pero son interpretados con la relación que existe entre la gráfica de porosidad efectiva y de volumen de shale.

Correlacionando estas dos interpretaciones (*ver figura 17*) se puede ver la relación entre porosidad y volumen de shale.

De este modo el valor de permeabilidad estará representado por la distancia entre la porosidad y el volumen de shale, que corresponde a el espacio entre partículas que no está relleno por granos de tamaño arcilla.

En promedio la gráfica muestra una permeabilidad entre el 20% y el 5% para los niveles arcillosos y de 30% - 35% para los niveles de gravas con mejores condiciones para permitir el flujo de agua.

Se pudo confirmar que las rocas más arcillosas no están actuando como sello estrictamente porque el nivel freático del acuífero fue reportado a los 30 metros de profundidad, después del nivel arcilloso que se encuentra entre los 24 m y 29 m.

6.2.6 Saturación de agua

El registro del pozo reportó algunos niveles con presencia de agua desde los 18 metros de profundidad que es acumulada parcialmente por la disminución en la permeabilidad de los niveles de arcillas, limos y arenas que se encuentran intercalados entre los 18 y 29 metros de profundidad. Después de este paquete la litología cambia, la permeabilidad aumenta y se encontró el nivel freático del acuífero.

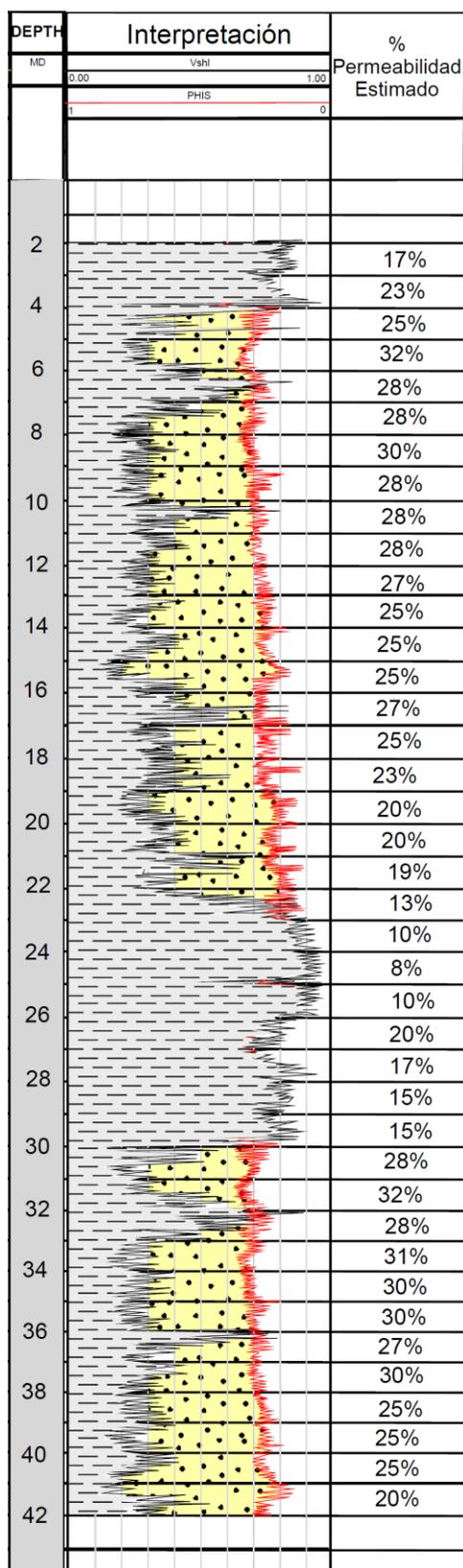


Figura 17. Gráfica con interpretación de porosidad y volumen de shale interpuestos. En amarillo el porcentaje de permeabilidad

8. Integración

La integración del reconocimiento en campo, la interpretación de la tomografía eléctrica en 2D y la información del pozo en 1D permitió crear un modelo litológico del subsuelo para este lugar en específico (Figura 18).

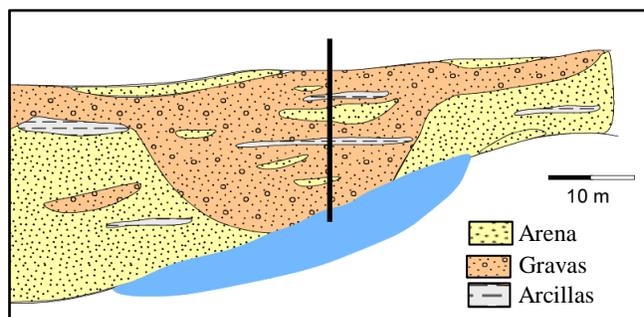


Figura 18. Interpretación del perfil de suelo en 2 D. En negro se está graficando el pozo con una profundidad de 42 metros hasta el nivel freático de acuífero.

El depósito de terraza sobre el que se encuentra ubicado el acuífero está conformado por gravas gruesas localmente saturadas en agua intercaladas con niveles de arcilla ligeramente permeable que permite el flujo lento de agua y niveles de arena arcillosa. El depósito en general presenta excelentes características hidrogeológicas que facilitan el aprovechamiento del recurso, incluso para las personas que están limitadas por el factor económico. Las buenas propiedades geomecánicas del depósito también hace que la perforación, recubrimiento y utilización del pozo sea fácil para los habitantes del municipio.

9. Diseño de pozo

Para el diseño del pozo se deben tener en cuenta algunos aspectos como darle un espesor de mínimo 4 pulgadas que permita el flujo del agua, aplicar sello sanitario al inicio del pozo, recubrir con gravilla las paredes del pozo y debido a los niveles de agua que se han encontrado a profundidades más pequeñas que los 40 metros del nivel freático es necesario recubrir con filtro los niveles con alta permeabilidad y con saturación de agua reportada.

Es necesario realizar un estudio químico al agua antes de usarla para consumo de cualquier tipo porque el alto contenido de arcillas en contacto con el agua subterránea puede contaminar el recurso hídrico incluso para cultivo.

10. Conclusiones

El principal recurso hidrogeológico del municipio de Villa del Rosario se encuentra sobre el depósito cuaternario

de terraza del río Táchira, aunque existen pozos profundos que extraen agua subterránea de la formación Guayabo.

El nivel freático del acuífero en el predio la casona se encuentra ubicado a una profundidad de 41 metros.

La permeabilidad de las rocas es el factor determinante en la caracterización del acuífero que en este punto reporta un espesor de 90 metros porque, aunque haya una presencia considerable de rocas pelíticas estas conservan hasta un 20% de permeabilidad; lo que permite el flujo constante del agua a profundidad.

En la zona de estudio en la terraza aluvial predominan las gravas gruesas matriz soportadas, litología que dificulta la perforación, pero favorece la conservación del pozo.

Los registros eléctricos son la herramienta ideal para caracterizar a detalle un acuífero sin embargo es necesario correlacionarlo con tomografías eléctricas para modelar el acuífero.

La presencia de los niveles de arcillas dentro del depósito en la zona del registro favorece la conservación de el agua subterránea los meses del año en los que la precipitación es baja.

La principal fuente de recarga del acuífero es el agua de escorrentía en las partas altas de la subcuenca del río Táchira.

11. Recomendaciones

Para la optima explotación del recurso es necesario realizar una prueba del bombeo que ayude a determinar el tamaño, ubicación de la bomba, tiempo de bombeo y tener mayor información sobre el caudal de el acuífero. También se debe resaltar la importancia de hacer pruebas químicas al agua para conocer posibles contaminantes, tratamiento y forma de consumo, se recomienda prestar atención a la ubicación de los filtros dentro del pozo que deben ir en las zonas marcadas por el autor como de alta permeabilidad.

12. Agradecimientos

Agradezco muy especialmente a quienes desde la docencia durante mi proceso en la Universidad de Pamplona me han inculcado el amor y respeto por la ciencia de la tierra a la que aspiro servir fielmente, especialmente a la profesora Julissa Torres por ser la persona que necesitaba en esta etapa final.

Agradezco a todas las personas que han construido conmigo este camino de el que no pudiera estar más orgullosa.

Dedicatoria

A mí mama que nunca se cansa de enseñarme con el ejemplo todo lo que puede construir una mujer, a mí abuela y a mí familia, a mí amigo Flover por su confianza inquebrantable en mí y a Daniel por ser la compañía constante en la ciencia y en la vida.

Al tío Julio por enseñarme el valor de aprender y a Yiya por ser la mujer más fuerte que conozco.

Referencias

- [1] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2013), zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, Bogotá, D. C., Colombia.
- [2] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2011). Aguas Subterráneas en Colombia: una Visión General. Bogotá D. C., 2013.
- [3] Hubach, Enrique. (1957). Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. Bogotá. Inst. Geol. Nal., Informe 1212, p. 166.
- [4] Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, (2011). Geología de las Planchas 98 – Cúcuta y 99 Villa del Rosario, Norte de Santander Colombia. Escala 1:100.000. Bogotá
- [5] Jaime De Porta, Fernando Etayo. Manuel Julivert, Javier Navas & Danel Valencia, (1974). *Léxique Stratigraphique International*, Vol. V. Amérique Latine, fascicule 4b, Colombie. 689p., Paris.
- [6] Notestein Frank.B; Hubman, Carl .W.& Bowler, James. W., (1944). Geology of the Barco Concession Colombia. Geol. Soc. Am. Bull., 55:1165-1216. New York.
- [7] Oviedo, Jorge Adrian (2015). Geomorfología Tectónica del Sistema de Fallas del Zulia en el flanco occidental del Sinclinal del Zulia, Norte de Santander. Universidad Nacional de Colombia.
- [8] Royero, José M.; 2001. Geología y geoquímica de la plancha 111 Toledo - Norte de Santander. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Memoria explicativa (2001), 56 p. Santa Fe de Bogotá.
- [9] Torres, Eliana (2017) Genesis de terrazas cuaternarias del Sistema fluvial del Río Pamplonita entre Chinácota y Cúcuta (Norte de Santander): Determinación de los controles tectónicos, climáticos y litológicos. Bogotá
- [10] Van Der Hammen, Thomas., (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continental y tectogénesis de los Andes Colombianos. Inventario Geológico Nacional. Boletín Geológico, 6 (1-3): 67-128. Bogotá.

-
- [11] Ward Dwight E.; Goldsmith, Richard.; Cruz, Jaime.; Restrepo Hernan, (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona. Departamento de Santander. Ingeominas, Bol. Geol., 21, (1-3):1- 132. Bogotá.
- [12] Griffiths Taylor, Turnbull Rose., Olayina Abel .Idowo (1990), Two – dimensional resistivity mapping with a computer controlled array” First Brea (8), p. 121- 129.
- [13] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C.
- [14] Vargas Marínez Nelson. (2001). Mapa Hidrogeológico de Colombia. Escala 1:1.200.000. Tesis de postgrado. Universidad Nacional de Colombia. Unidad de Hidráulica. Bogotá.
- [15] Vargas Martínez Nelson, (2005) Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia. Bogotá
- [16] Quijano López Erika & Varcárcel Erin (2015), Interpretación de Registros Geofísicos de Pozo, Pozo A, B y C en la Cuenca de los Llanos Orientales. UPTC, Sogamoso.