

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA PARA EL
ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN NICOLÁS, A PARTIR DE INFORMACIÓN
SECUNDARIA.**

HEYDY GERALDYN PEÑALOZA GUTIERREZ

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS
PROGRAMA DE GEOLOGIA**

2021

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA PARA EL ACUÍFERO
DEL VALLE DE SAN NICOLÁS, A PARTIR DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.**

HEYDY GERALDYN PEÑALOZA GUTIERREZ

**Trabajo de Grado, modalidad Practica Empresarial
Presentado como requisito para optar al Título de Geóloga.**

Director

Geólogo. OSCAR MAURICIO CASTELLANOS A.

MSC. en Geología

PhD. (c) en Geociencias

Director Empresarial

JHON FREDY QUINTERO VILLADA

Esp. Recurso Hídrico.

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS

PROGRAMA DE GEOLOGIA

2021

AGRADECIMIENTOS

Para culminar este trabajo de grado de la mejor manera, tuve el apoyo de muchas personas especiales a quienes quiero agradecer. En primer lugar, a Dios por haberme guiado a lo largo del camino y darme fortaleza en momentos de debilidad.

A mis padres Zulay Gutiérrez y Richard Peñaloza por haberme brindado su esfuerzo y apoyo incondicional, no solo para formarme profesionalmente sino en todas mis decisiones de vida; y a mis hermanos quienes siempre me motivan a ser un ejemplo de apoyo, liderazgo y amor en sus vidas.

A mis amigas Marly y Karen quienes siempre han confiado en mí y me han animado a continuar con mis sueños, dándome ánimo, acompañándome en mis momentos de crisis y también de felicidad. A mis compañeros con quienes he transitado este camino de formación profesional, agradezco los momentos que compartimos juntos.

A todas aquellas personas que he tenido la oportunidad de conocer y compartir con ellas en CORNARE, especialmente a Jhon Fredy Quintero y Ana María Cardona; gracias por su disposición permanente y sugerencias, por su valiosa colaboración y buena voluntad.

Por último, a mis profesores no solo de carrera sino de la vida, mil gracias porque de alguna manera forman parte de lo que hoy soy; y de manera especial agradezco a mi director de trabajo de grado PhD. Óscar Castellanos Alarcón, por su ayuda a lo largo de mi trabajo, por haber aceptado este compromiso, por su paciencia, por sus palabras de aliento, optimismo y confianza que también me ayudaron a continuar este camino.

¡A TODOS LOS QUE ME AYUDARON GRACIAS DE CORAZÓN!

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUCCIÓN (Planteamiento del Problema).....	8
2. OBJETIVOS	9
3. METODOLOGÍA.....	9
4. GENERALIDADES	11
5. ESTADO DEL ARTE (ANTECEDENTES)	19
6. MARCO TEÓRICO.....	27
6.1. Análisis de Vulnerabilidad de Aguas Subterráneas.	27
6.2. Métodos de superposición o paramétricos.	29
7. DATOS Y RESULTADOS	35
7.1. Determinación de la Vulnerabilidad Intrínseca Mediante el Método GOD.....	35
7.2. Determinación de la Vulnerabilidad Intrínseca Mediante el Método DRASTIC.	40
8. CONCLUSIONES	49
9. RECOMENDACIONES	51
10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Autor, 2021.....	12
Figura 2. Roca granítica del Batolito de Antioquia cortada por un dique ácido posterior. Giraldo, 2014. 15	
Figura 3. Unidades Geológicas del área de estudio (VSN). Tomado y modificado de INGEOMINAS, 2005 (Plancha geológica 147) & Giraldo, 2021.	17
Figura 4. Mapa geomorfológico del área de estudio. Tomado y modificado de Rendón et.al, 2011.	20
Figura 5. Unidades Hidrogeológicas del VSN. Modificado de Garces, 2018.	25
Figura 6. Perfil Transversal de las unidades hidrogeológicas. Autor, 2021.	26
Figura 7. Mapa del parámetro G. Autor, 2021.....	37
Figura 8. Mapa del parámetro O. Autor, 2021.....	38
Figura 9. Mapa del parámetro D. Autor, 2021.....	40
Figura 10. Mapa de Vulnerabilidad GOD, para el Valle de San Nicolás. Autor, 2021.	41
Figura 11. Mapa de Profundidad del agua subterránea. Autor, 2021.	42
Figura 12. a). Mapa de Pendientes del VSN. b). Mapa de Precipitaciones para el área de estudio. c) Mapa de Permeabilidades Intrínsecas. d). Mapa de las zonas con Recarga para el acuífero del VSN. Autor, 2021.	44
Figura 13. Mapa de ponderación para la litología del Acuífero. Autor, 2021.	45
Figura 14. Mapa de Suelos para el VSN. Autor, 2021.....	46
Figura 15. Mapa de interpolación para la zona no saturada. Autor, 2021.	47
Figura 16. Mapa de Conductividad Hidráulica en el VSN. Autor, 2021.....	49
Figura 17. Mapa de Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC para el acuífero del VSN. Autor, 2021.	50

RESUMEN

Debido a la creciente urbanización del oriente antioqueño y principalmente del Valle de San Nicolás (VSN); se han presentado grandes cambios antrópicos, que han repercutido sobre el subsuelo disminuyendo su resistencia y su capacidad de atenuación en la zona no saturada ante las cargas contaminantes que puedan infiltrarse en el subsuelo, ya sea, por fuentes locales o por el transporte de estos durante la recarga del acuífero; a su vez este aumento urbanístico ha aumentado la presión sobre los recursos hídricos y la disposición tanto de desechos líquidos como sólidos en las corrientes hídricas o en el subsuelo. Haciéndose necesario el análisis de vulnerabilidad de este acuífero, buscando zonificar las posibles zonas con mayor susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas y al mismo tiempo, complementar el modelo hidrogeológico de la zona; el cual sirve para la planificación del manejo y preservación de las aguas subterráneas por parte de la Corporación Ambiental, CORNARE.

Es así que partiendo de la densidad de información obtenida a partir de las bases de datos de CORNARE e información bibliográfica; se han tenido en cuenta métodos paramétricos y de superposición; como el método GOD, el cual utiliza los parámetros de la profundidad del nivel estático, la litología de la zona confinante y el tipo de acuífero presente, determinándose que predominantemente el acuífero se clasifica en baja vulnerabilidad y una pequeña extensión en vulnerabilidad media y alta. Por otro lado, para el método DRASTIC se utilizaron los parámetros del nivel estático, el tipo de suelos, la recarga neta, la conductividad hidráulica y la litología de las capas saturadas; permitiendo determinar que el acuífero se clasifica entre vulnerabilidad baja a alta. Concluyentemente, la zona con mayor susceptibilidad a la contaminación se presenta al centro del Valle, donde se concentra la mayor expansión urbana.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad, acuífero, hidrogeología, GOD, DRASTIC.

ABSTRACT

Due to the growing urbanization of eastern Antioquia and mainly of the San Nicolás Valley (VSN), there have been major anthropic changes that have had an impact on the subsoil, reducing its resistance and attenuation capacity in the unsaturated zone to contaminant loads that may infiltrate the subsoil, either by local sources or by their transport during the recharge of the aquifer; In turn, this urban growth has increased the pressure on water resources and the disposal of both liquid and solid wastes in the watercourses or in the subsoil. This makes it necessary to analyze the vulnerability of this aquifer, seeking to zone the possible areas with greater susceptibility to groundwater contamination and at the same time, complement the hydrogeological model of the area, which serves for planning the management and preservation of groundwater by the Environmental Corporation, CORNARE.

Thus, based on the density of information obtained from CORNARE's databases and bibliographic information, parametric and superposition methods have been taken into accounts, such as the GOD method, which uses the parameters of the depth of the static level, the lithology of the confining zone and the type of aquifer present, determining that the aquifer is predominantly classified in low vulnerability and a small extension in high vulnerability. On the other hand, for the DRASTIC method, the parameters of the static level, soil type, net recharge, hydraulic conductivity, and lithology of the saturated layers were used to determine that the aquifer is classified between low to high vulnerability. In conclusion, the zone with the greatest susceptibility to contamination is in the center of the Valley, where the greatest urban expansion is concentrated.

KEY WORDS: Vulnerability, aquifer, hydrogeology, GOD, DRASTIC.

1. INTRODUCCIÓN (Planteamiento del Problema)

En los últimos años la explotación de aguas subterráneas ha adquirido mayor importancia como fuentes de aprovechamiento alternativa; por lo que, al mismo tiempo se ha implementado el termino de Vulnerabilidad del acuífero ante el riesgo de sobreexplotación y contaminación que puedan afectar la calidad y la oferta de del agua subterránea. Lo anterior se relaciona con las actividades antrópicas tales como el uso de pesticidas, ganadería, descargas de aguas contaminadas, entre otras.

Por su parte, el Valle de San Nicolás ubicado en el Oriente Antioqueño, ha experimentado un aumento poblacional que ha conllevado a la transformación de un área de producción agrícola en un área industrializada y urbanizada produciendo alteraciones en las capas de suelo, las cuales sirven como protección y almacenamiento para las zonas acuíferas de este Valle. Resaltando que, aunque la contaminación en aguas subterráneas es difícil de presentarse, igualmente su identificación y recuperación es complejo de determinarse; siendo necesario identificar las zonas que presentan mayor susceptibilidad ante la contaminación por agentes antrópicos; permitiendo a CORNARE, crear planes de manejo de los recursos hídricos subterráneos en su jurisdicción; con el fin de preservar y garantizar la calidad del agua subterránea y evitar la sobreexplotación del acuífero que según sus características se divide en tres unidades hidrogeológicas; de las cuales dos unidades corresponden a acuíferos libres asociados a depósitos aluviales y una última unidad relacionada a un acuífero semiconfinado dispuesto en el suelo residual producto de la meteorización del Batolito Antioqueño y en zonas fracturadas de este último. Por lo tanto, mediante este proyecto se pretende responder a la pregunta, ¿Cuál es el grado vulnerabilidad del acuífero del Valle de San Nicolás ante las cargas contaminantes dispuestas en el suelo, teniendo en cuenta las condiciones hidrogeológicas de sus unidades?

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo General.

Determinar el grado de Vulnerabilidad Intrínseca presente en el Acuífero del Valle de San Nicolás, mediante los métodos paramétricos GOD y DRASTIC teniendo en cuenta las condiciones hidrogeológicas del acuífero obtenidas a partir de información secundaria; sirviendo como base para la planificación del manejo del recurso hídrico por parte de CORNARE.

2.2.Objetivos Específicos.

- 2.2.1.** Apoyar la atención de trámites ambientales y el control y seguimiento a permisos otorgados concernientes a la gestión de aguas subterráneas en la jurisdicción de CORNARE, de acuerdo a la normativa vigente.
- 2.2.2.** Analizar información secundaria referente a las condiciones geológicas, geofísicas, geomorfológicas e hidrogeológicas determinadas en estudios realizados en la zona, como base para el desarrollo del estudio.
- 2.2.3.** Diagnosticar la vulnerabilidad del acuífero por medio del método GOD, tomando en cuenta la ponderación numérica propuesta para cada parámetro.
- 2.2.4.** Diagnosticar la vulnerabilidad del acuífero por medio del método DRASTIC, tomando en cuenta la ponderación numérica propuesta para cada parámetro.

3. METODOLOGÍA

3.1.Revisión y Recopilación de Información Geológica, Geofísica y Geomorfológica.

Mediante la revisión de la información obtenida en estudios realizados por Cornare en convenio con la Universidad Nacional, se recopiló la información sobre las características geológicas y geofísicas de la zona de estudio, así como, las condiciones y la zonificación de las

unidades hidrogeológicas. A la par, en base a información bibliográfica se obtuvo el modelo hidrogeológico conceptual y numérico, así como, las condiciones hidroquímicas del acuífero.

3.2. Análisis de Pruebas de Bombeo.

A partir de las bases de datos de CORNARE, se obtuvieron principalmente los parámetros de la profundidad del nivel freático y la conductividad hidráulica, e igualmente otros parámetros como la litología y tipo de acuíferos para cada uno de los puntos donde se presenta la explotación de las aguas subterráneas.

3.3. Determinación y Zonificación de la Vulnerabilidad Mediante los Métodos GOD y DRASTIC.

Teniendo en cuenta la disponibilidad de datos se seleccionaron dos métodos para la identificación de zonas con mayor probabilidad a la contaminación del acuífero. Para el método GOD, se tuvo en cuenta el tipo de acuífero, la litología de la capa confinante y la profundidad del nivel freático, mientras que, para el método DRASTIC se tomaron los parámetros de la recarga, la litología de la capa confinante, la litología del acuífero, el tipo y uso del suelo, la topografía (pendientes), la profundidad del nivel freático y la conductividad hidráulica para cada unidad hidrogeológica.

Para la zonificación a cada parámetro antes mencionado se le asignó una ponderación de acuerdo a la “Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos”, propuesta por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible principalmente y en el caso específico de la recarga se tomó la clasificación propuesta por Piscopo (2001).

Posteriormente mediante el programa ArcGIS 10.8 se realizó la interpolación y zonificación de la vulnerabilidad, para ello se usaron las herramientas de Kriging en su versión

ordinaria con variabilidad circular y un radio de 12 a 5 datos para la interpolación de los puntos obtenidos de los ítems 7.1 y 7.2; con esta herramienta se obtuvieron mapas tipo ráster con 12 pixeles para cada parámetro. Finalmente, mediante la herramienta de álgebra de mapas se generaron los mapas de vulnerabilidad a escala 1:250.000 (debido al carácter regional del estudio), utilizando los mapas anteriores como datos de entrada y las ecuaciones propuestas para cada Método.

3.4.Elaboración de Informe Final.

Finalmente se elaboró el presente documento en el programa Microsoft Word, donde se plasman las conclusiones y recomendaciones a partir del análisis anterior.

3.5.Apoyo a Trámites de Concesiones de Aguas Subterráneas.

Transversalmente al estudio de vulnerabilidad realizado, se apoyará a la oficina de Recurso hídrico en la atención y seguimiento de los trámites por medio de los cuales se solicite concesiones de aguas subterráneas en la jurisdicción de Cornare; lo cual servirá como base para la validación en campo de la geología y geomorfología, y mediante el acompañamiento a pruebas de bombeo la verificación de las condiciones hidráulicas de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio.

4. GENERALIDADES

4.1.Localización.

El Valle de San Nicolás se ubica en la zona del oriente Antioqueño, entre las latitudes $5^{\circ}5'0'' - 6^{\circ}20'0''$ N y las longitudes $75^{\circ}10'0'' - 75^{\circ}40'0''$, con una extensión de 935 Km²; conformándose por los municipios de Rionegro, La Ceja, El Retiro, El Carmen de Viboral,

Guarne, Marinilla, El Santuario y San Vicente, con altitudes de 1895msnm a 3132 msnm, por lo tanto, se presentan climas templados con temperaturas de entre 9 y 24 °C. (ver figura 1)

Este se constituye como una penillanura formada a partir de la erosión de las rocas ígneo-metamórficas presentes en la zona de estudio, desarrollándose colinas de baja pendiente destacándose algunos cerros residuales como El Capiro.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

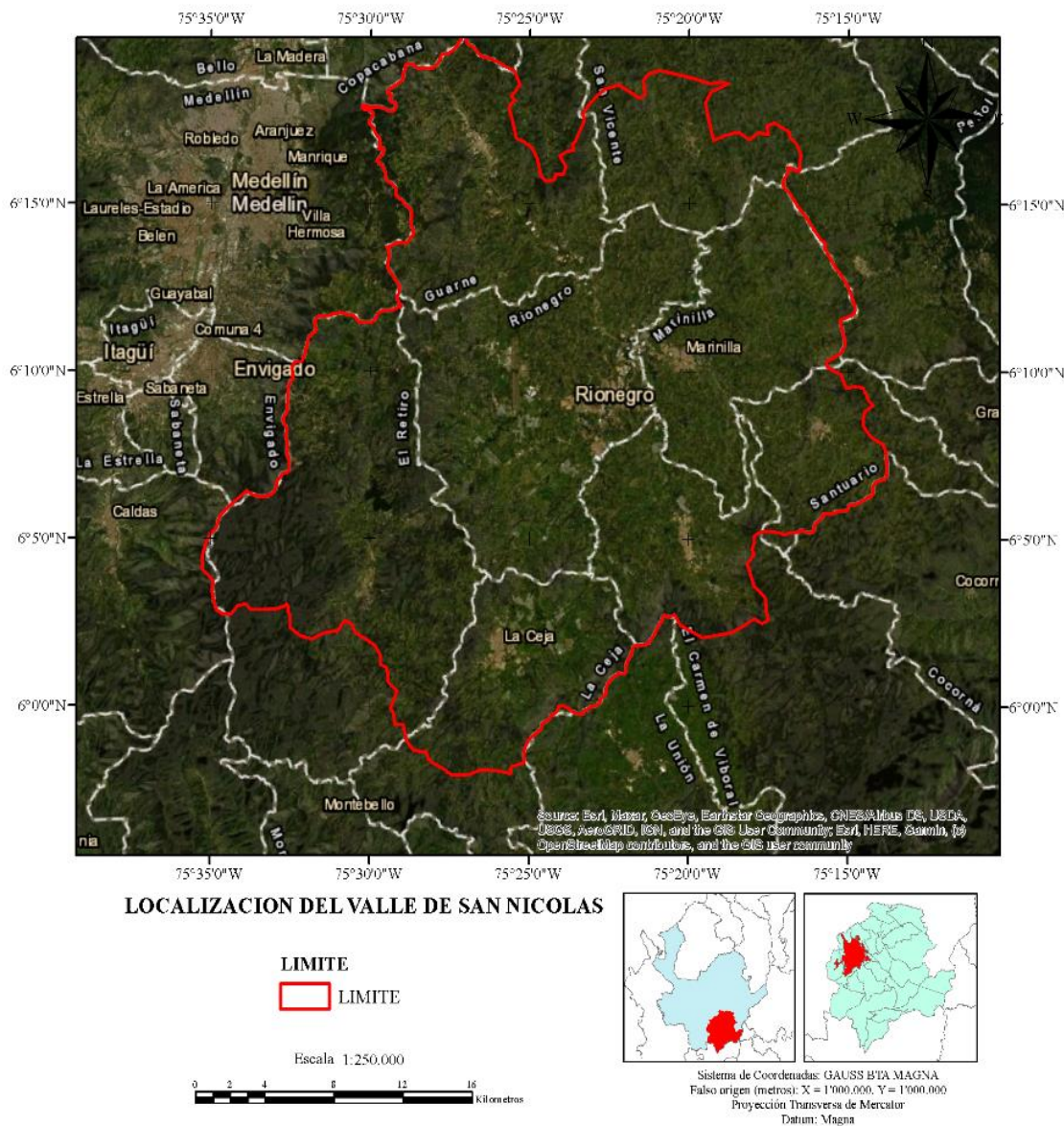


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Autor, 2021.

4.2. Geología del Área de Estudio.

Siendo la base para los estudios hidrogeológicos, la geología condiciona las propiedades hidráulicas del material y de acuerdo a la interpretación de las características de las unidades geológicas y estructuras geológicas, se pueden determinar zonas con alto potencial para el almacenamiento de aguas subterráneas.

Geológicamente, el basamento en el Valle de San Nicolás corresponde a la parte Noroeste del Terreno Tahamí ubicado en la cordillera central; conformado por rocas metamórficas Pérmico-Triásicas del Complejo Antioquia (2020); que posteriormente fueron intruidas por el Batolito de Antioquia. De otro lado, geomorfológicamente, el VSN se constituye como una penillanura donde se encuentran colinas saprolitizadas con amplios espesores de suelos residuales de las unidades anteriormente mencionadas y sobre las cuales se han depositado depósitos no consolidados de vertiente y aluviales; los cuales presentan condiciones de capacidad de almacenamiento, siendo la unidad con mayor potencial hidrogeológico.

A continuación, se tendrán en cuenta las unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

4.2.1. Complejo Antioquia.

Se ha propuesto por Toussaint y Restrepo (2020), agrupar las rocas metamórficas de edades Permo-triásicas dispuestas en el terreno Tahamí bajo el nombre de Complejo Antioquia; Por lo tanto, para el área de estudio esta unidad se conforma por las unidades geológicas denominadas como se muestra en la figura 3, Anfibolitas de Medellín (Correa & Martens, 2000) y Neis de la Ceja (Hubach, 1957).

De lo anterior, el Complejo Antioquia se constituye por rocas que han alcanzado facies de esquistos verdes a granulitas; y en la zona de estudio se presentan anfibolitas de color verdea negro de textura masiva con blastos fino a muy finos, composicionalmente predominan hornblenda y plagioclasa, las cuales pueden estar intercaladas con neises y en la zona de contacto con el Batolito Antioqueño presentarse migmatitas locales. También se presentan hacia la zona oeste intercalaciones de neises biotíticos de textura esquistosa y granofels con biotita.

Estas rocas han sufrido eventos de metamorfismo dinámico que es reflejado en la presencia de rocas miloníticas y rasgos de deformación. Adicionalmente, se presentan emplazamiento de diques ígneos que pudieron generarse durante el emplazamiento del Batolito Antioqueño y/o en eventos posteriores. De manera general, estas rocas exhiben evidencias de metamorfismo retrogrado, que han modificado algunas de sus características texturales.

4.2.2. Batolito Antioqueño.

Analizado inicialmente por Feininger y Botero (1992), el batolito antioqueño es un cuerpo ígneo homogéneo; conformado por una facie calco-alcalina que se conforma predominantemente por granodioritas y tonalitas de color blanco con cristales hipidiomórfos de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico, con presencia de minerales accesorios como hornblenda y pirita; sin embargo, presenta en algunas zonas variaciones a una facie félsica conformada por Monzogranitos y Cuarzo-Monzodioritas.

A pesar de su gran extensión, se encuentra altamente meteorizada alcanzando perfiles de meteorización de hasta 200m conformados principalmente por suelos limo-arenosos; los

cuales son de gran importancia para el presente estudio teniendo en cuenta que gracias a sus características texturales y de permeabilidad, constituyen una unidad hidrogeológica.



Figura 2. Roca granítica del Batolito de Antioquia cortada por un dique ácido posterior.
Giraldo, 2014.

4.2.3. Depósitos Cuaternarios Y Superficiales.

En el área de estudio, los principales depósitos cuaternarios se asocian a depósitos aluviales conformados principalmente por arenas y gravas, a lo largo del Rio Negro y sus afluentes, así como, a depósitos de vertiente constituidos principalmente por arenas y en menor proporción materiales fino; siendo las principales unidades para el presente estudio considerando sus características texturales que le confieren una mayor capacidad de almacenamiento.

Estos depósitos son producto de la erosión en los escarpes de la periferia del Valle; por lo que, estos se encuentran estrechamente relacionados con la geomorfología de colinas bajas en la parte central del valle y escarpes de erosión. A su vez, a nivel regional estos depósitos son cubiertos por una capa de cenizas con espesores variantes entre 1.5m a 2.5m, las cuales son asociadas con las erupciones volcánicas del Complejo Ruíz -Tolima.

Por otro lado, los suelos residuales producto de la meteorización principalmente de la unidad Batolito Antioqueño, pueden alcanzar espesores de hasta 80m a 200m según estudios geofísicos realizados por Cornare-Universidad Nacional de Colombia (2001). Mientras que, lo suelos residuales a partir de las rocas metamórficas de la zona, presentan espesores más delgados. Estos se presentan predominantemente conformado las colinas bajas y el fondo del Valle de San Nicolás, en donde se pueden observar que estos suelos conservan los rasgos tectónicos (como diaclasas) de la roca parental.

4.3.Tectónica Local.

De acuerdo a Rendón et.al (2011), en el Valle de San Nicolás se presentan fallamientos en tres direcciones dominantes:

- **Con dirección N-S.** Siendo la principal dirección de alineación corresponden a las trazas de las fallas Rodas, La Honda y La Acuarela; las cuales son consideradas como parte del sistema de fallas Cauca Romeral.
- **Con dirección NNE.** Se enmarcan lineamientos de menor longitud y que se consideran de origen distensivos paralelos al Valle de Áburra.
- **Con dirección NNW.** Se destacan en la parte central de la zona de estudio, representadas por los Fallamientos en la quebrada La Mosca en el municipio de Guarne y en la quebrada La Cimarrona del municipio de El Carmen de Viboral; estos alineamientos se destacan como producto de la preservación del relieve de las rocas metamórficas.

Cabe resaltar que, la falla La Mosca y la falla La Honda presentan mayor connotación geotectónica, debido a evidencias de fallamientos en los depósitos superficiales y a sus rasgos geomorfológicos, que indicarían movimientos relacionados a actividad neotectónica, según estudios realizados por Rendón et.al (2011).

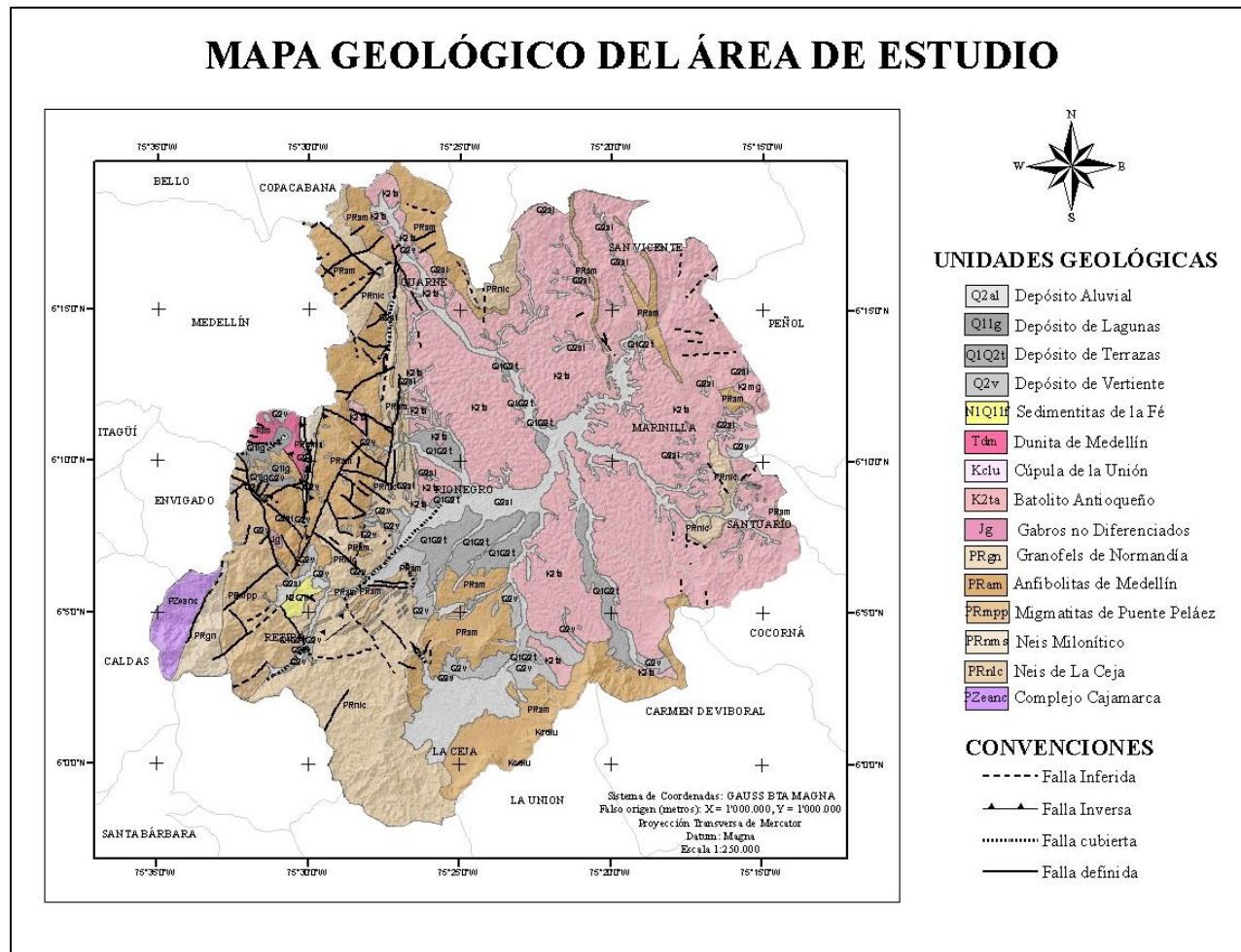


Figura 3. Unidades Geológicas del área de estudio (VSN). Tomado y modificado de INGEOMINAS, 2005 (Plancha geológica 147) & Giraldo, 2021.

4.4. Geomorfología del Área de Estudio.

El altiplano de Rionegro, ha sido caracterizado por autores como Page y James (1981), Rendón et.al (2011), como una penillanura con colinas bajas cuyo relieve local

alcanza 50 metros de la altura; siendo suavizadas por los depósitos de terraza y coluviones en superficies planas contiguos a los drenajes en la zona.

Esta penillanura se ha formado como el resultado de la erosión que ha incidido en el relieve de la cordillera Central en distintos eventos tectónicos; de acuerdo a Page y James (1981), un primer evento es asociado a un fuerte periodo de erosión que formo una zona plana, este fue posterior al levantamiento de la protocordillera central en el cretácico tardío a la par de la intrusión del Batolito Antioqueño, un segundo evento de erosión que formo el actual relieve, posterior a un segundo pulso de levantamiento de la orogenia Andina aproximadamente 4.5 –3 Ma, y actualmente, tras un tercer levantamiento hace un 1 Ma que continua hasta la actualidad, se han ido formando diferentes altiplanos en la zona norte de la cordillera Central, entre los que se encuentra el Altiplano de Rionegro.

Otros autores como Gallego (2011), han identificado unidades geomorfológicas de superficie erosión y escarpes de erosión denominadas; de las cuales y como se observa en la figura 4, solo las siguientes se encuentran dentro del área de estudio definida mediante el polígono de color negro en dicha figura.

- Superficie de erosión Rionegro, la cual se encuentra entre 2000 y 220msnm, en la cual se presentan colinas bajas, de las cuales en la zona norte en el municipio de San Vicente estas colinas se presentan con mayor incisión de las fuentes hídricas y se resaltan lineamientos estructurales e inselbergs aislados.
- Escarpe de San Nicolás, ubicado en la zona sureste de la zona de estudio; divide el altiplano de Rionegro del altiplano de La Unión, la cual según Rendón et.al (2011), “y se divide en tres estructuras diferentes: la primera se caracteriza

por marcar un fuerte lineamiento en sentido N-S y por el valle de la quebrada La Honda, la segunda se localiza en los límites entre los municipios de La Ceja, El Carmen y La Unión donde se presenta en forma de herradura y la tercera se presenta paralela a la quebrada La Mosca, marcando un lineamiento en dirección NW”.

- Escarpe de san Vicente, se enmarca en la zona noroeste, su principal evidencia es determinada por el afloramiento de apófisis de rocas metamórficas y la orientación de algunas quebradas como La Compañía y El Salado.

- Escarpe El Salto, separa las superficies de erosión de Rionegro y El Peñol. Este escarpe genera cambios hidráulicos en el cauce del Río Negro, el cual pasa de un comportamiento meándrico a un comportamiento encañonado con alta incisión.

- Escarpe Santa Elena-La Unión, se encuentra en la parte occidental del Valle de San Nicolás y que separa este último del valle de Aburrá; en este escarpe se presenta un alto grado de erosión lo que ha generado la formación de cerros residuales tales como los cerros El Capiro, El Órgano y El Corcovado.

5. ESTADO DEL ARTE (ANTECEDENTES)

El acuífero del Valle de San Nicolas (VSN), según el estudio del agua (2014) pertenece a la provincia hidrogeológica de “Otros Sistemas acuíferos en Región Cordillera Occidental – Central” y compone un solo sistema acuífero en conjunto con el acuífero del Valle de la Unión.

Por su parte en el VSN se han desarrollado estudios que han estimado el Modelo hidrogeológico conceptual principalmente; así como el planteamiento de un Modelo Numérico y

el análisis hidroquímico de algunas muestras en relación a la potabilidad de las aguas subterráneas en este acuífero.

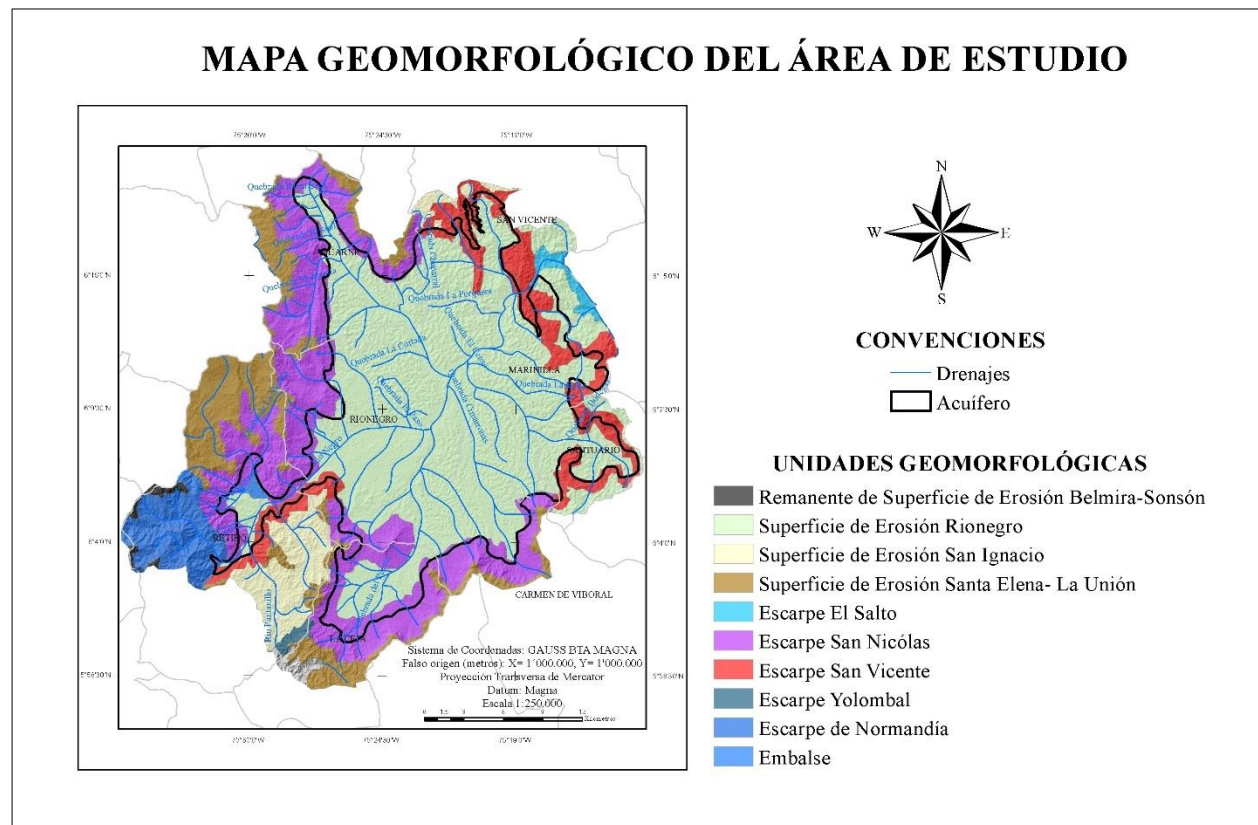


Figura 4. Mapa geomorfológico del área de estudio. Tomado y modificado de Rendón et.al, 2011.

5.1. Modelo Hidrogeológico Conceptual.

En el año 2000 en convenio con la Universidad Nacional (Sede Medellín), formuló un primer modelo hidrogeológico regional tanto para el Valle de San Nicolás como para el Valle de la Unión. En este modelo se cuantificó la recarga del acuífero a partir de información geológica, hidrometeorológica, hidrogeológica y geofísica (Sondeos eléctrico verticales, SEV); determinándose las siguientes características.

- **Zona de Recarga.**

Las características geomorfológicas principalmente de dolinas contribuyen significativamente en la infiltración con una dirección de flujo de las aguas subterráneas hacia el centro del altiplano de Rionegro; mientras que, en las zonas escarpadas se consideró una recarga nula. Las cenizas volcánicas son responsables de la mayor recarga del acuífero y a su vez se definió la cota 1980 como la mínima cota de infiltración. Por lo tanto, la recarga es distribuida 90% para los acuíferos del altiplano de Rionegro y 10% para sistemas hidrogeológico aledaños como la cuenca del Valle de Aburrá.

El nivel freático de manera general se consideró a menos de 3 m de profundidad, exceptuando las zonas escarpadas y las partes superiores de las colinas.

- ***Recarga Estimada.***

Calculando la precipitación total anual promedio, la evaporación promedio anual calculada mediante las ecuaciones de Turc, de Coutagne (las cuales utilizan la precipitación y la temperatura como datos de entrada), y la ecuación de Cenicafé (basada en la altura sobre el nivel del mar); y el cálculo de la escorrentía promedio multianual (descontando del caudal mínimo el caudal medio multianual).

Se estimó una recarga de 550 mm/año para el altiplano de Rionegro, con incertidumbre debido en la estimación de los valores utilizados en la evaluación de la recarga.

- ***Acuíferos***

El área se consideró con potencial hidrogeológico y sin discontinuidades laterales entre sí, clasificándose en las siguientes cuatro (4) unidades hidrogeológicas.

- ❖ **Acuífero libre en aluviones.** Constituido en los depósitos aluviales y terrazas bajas de las principales fuentes hídricas como los Ríos Negro y Pereira y las quebradas La

Mosca, La Cimarrona y Marinilla. Litológicamente se conforma por arenas y limos, y con capacidad de almacenamiento de $2,1 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Su profundidad máxima alcanza los 22 m en los Ríos Negro y Pereira, y 8 m de profundidad máxima en los depósitos de la quebrada la Cimarrona.

En cuanto a su recarga, se determinó la precipitación local como la más importante debido a la topografía plana propia de los depósitos y terrazas aluviales; asimismo recibe parcialmente recarga de la infiltración en el altiplano de La Unión y del altiplano de Las Palmas- Santa Elena-Piedras Blancas.

- ❖ **Acuíferos libres en suelos residuales.** Proyectado por debajo de la cota 2200 se determinó en suelos residuales del Batolito Antioqueño y el Complejo metamórfico Antioquia; el cual se recarga tanto por la precipitación local como por la recarga de altiplanos vecinos. Por lo tanto, se clasificó como la zona de potencial hidrogeológico medio con una capacidad de almacenamiento de $2,6 \times 10^{10} \text{ m}^3$.
- ❖ **Acuífero libre en rocas fracturadas.** Depende principalmente de los lineamientos de fracturación de la roca y donde el regolito es delgado o inexistente.
- ❖ **Acuífero confinado en rocas fracturadas.** Bien definidos en algunas áreas entre los municipios de Guarne y San Vicente y alrededor de Rionegro y El Santuario, aunque este no presenta continuidad lateral.

Adicionalmente, en los sondeos verticales (SEV) se identificaron zonas con resistividades menores que $10 \Omega\text{m}$ en el regolito y que $100 \Omega\text{m}$ en el basamento; indicando acuíferos salobres o arcillas saturadas, pero se tuvo en cuenta la explotación de algunas fuentes saladas en el siglo XX, para clasificarse como acuíferos salobres.

Para el año 2014 según Giraldo, la recarga del acuífero se da en gran medida por la precipitación, la cual es infiltrada por medio de las cenizas volcánicas y las terrazas alcanzando la unidad de potencial hidrogeológico medio; donde siguiendo la mayor pendiente alcanza el fondo del valle y así la unidad hidrogeológica de alto potencial, o puede que el agua de infiltración permanezca en la unidad de medio potencial y finalmente se infiltre hasta la unidad de bajo potencial.

Garcés (2018), actualizo el modelo hidrogeológico conceptual del Valle de San Nicolas basándose en los estudios geofísicos realizados en el estudio del 2001. En su actualización Garcés (2018), determinó los siguientes tres (3) acuíferos.

- ***Acuífero de la Planicie Aluvial. (UHG-1)***

Constituido por depósitos de arenas aluviales principalmente y por gravas, su espesor promedio es de aproximadamente 25 m; igualmente en este acuífero se pueden encontrar capas de limos hasta los 5 m de profundidad en algunas zonas; por lo que, se determinó una alta variabilidad lateral, aunque esta variabilidad no fue detallada debido a la escala de la investigación.

- ***Acuífero de Terraza Aluvial. (UHG-2)***

Se conforma principalmente por una capa gravas saturadas presentes hasta los 15 m de profundidad; suprayacente a capas areno – limosas saturadas o parcialmente saturadas (correspondiente al Saprolito del Batolito Antioqueño). E igualmente este acuífero presenta intercalaciones con lentes de capas de limos, las cuales limitan su capacidad de almacenamiento.

- ***Acuífero en Superficie de Erosión II de Río Negro. (UHG-3).***

Se asocia directamente con el saprolito resultado de la meteorización de las rocas cristalinas; por lo tanto, su estratigrafía corresponde a capas de arenas saturadas y limos parcialmente saturados con un espesor de 30 m; los cuales son confinados por capas de arcillas y limos hasta los 12 m, correspondiendo al potencial hidrogeológico bajo debido a su contenido de materiales finos.

Por lo tanto, con base a los anteriores estudios en la figura 5, se presentan las unidades hidrogeológicas antes descritas según Garcés (2018) y en la figura 6, se presenta un perfil transversal de la disposición de las unidades hidrogeológicas, donde en color rojo se señala el flujo subterráneo propuesto para el acuífero según los autores antes referidos.

5.2. Modelo Hidrogeológico Numérico.

Garcés (2018), propuso un primer modelo numérico para el acuífero utilizando el modelo conceptual antes descrito como datos de entrada; determinando que los acuíferos son realmente tres (3) unidades hidrogeológicas, siendo posible reconocer conductividades hidráulicas para cada una de ellas.

Sin embargo, este modelo numérico cuenta con cierta incertidumbre debido a la poca densidad de información, sobre todo de datos de conductividad hidráulica.

5.3. Calidad de las Aguas Subterráneas. (Hidrogeoquímica).

Actualmente en la normativa colombiana no se cuentan con decretos que regulen los parámetros que deben cumplir las aguas subterráneas crudas; sin embargo, Garcés (2018) presento los resultados de análisis hidroquímicos teniendo en cuenta parámetros y sustancias contenidos en el decreto 475 de 1998 del ministerio de Salud de Colombia, tales como, pH, Temperatura, Calcio,

Plomo, Hierro, Manganeseo, entre otros; resaltándose que el decreto antes mencionado estipula las normas técnicas para la calidad del agua potable posterior al tratamiento del agua cruda. Del estudio realizado por Garcés (2018) se obtuvo que las aguas subterráneas del Valle de San Nicolas son predominantemente acidas.

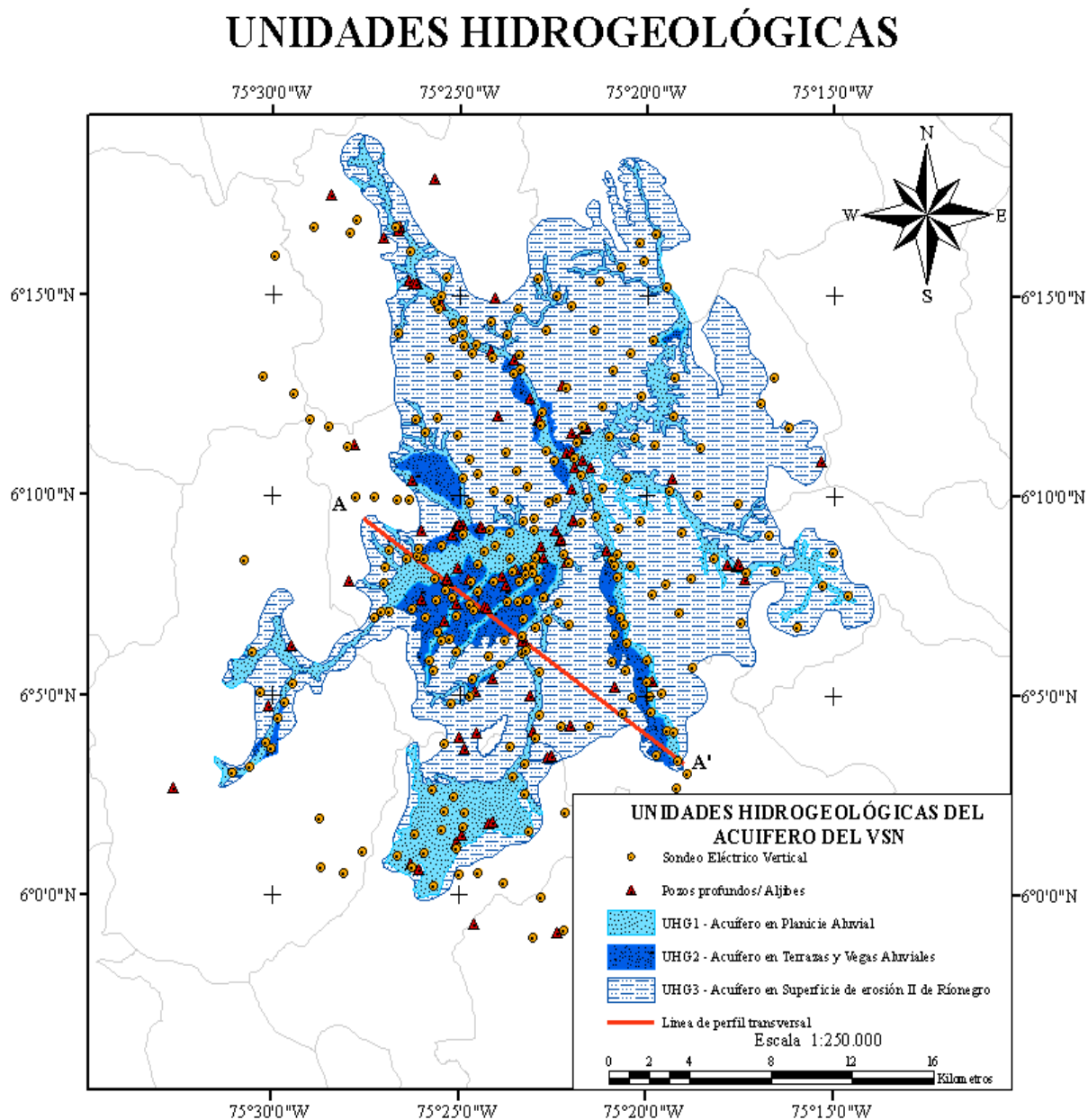


Figura 5. Unidades Hidrogeológicas del VSN. Modificado de Garcés, 2018.

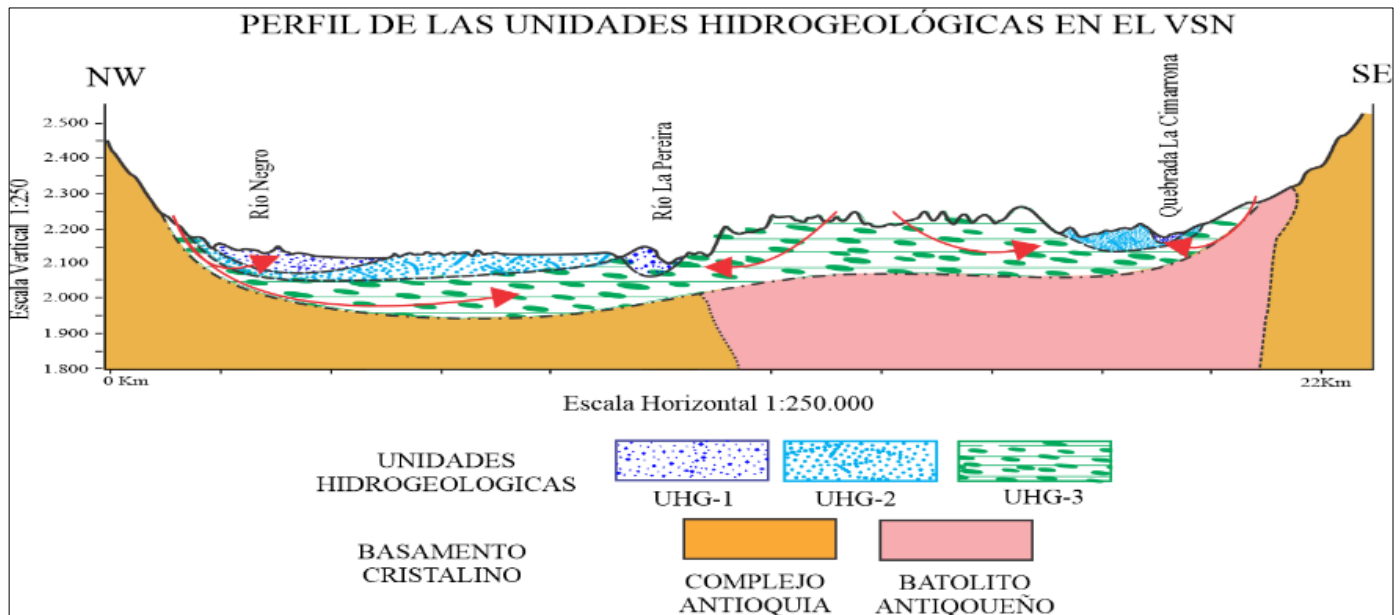


Figura 6. Perfil Transversal de las unidades hidrogeológicas. Autor, 2021.

Por otro lado, se identificaron zonas con contaminación tanto por coliformes totales como por altos niveles de cadmio, sulfatos, sodio y nitratos en el municipio de La Ceja y altos niveles de hierro en el municipio de Guarne.

En tanto Giraldo (2021), mediante diagramas de Piper y de Stiff analizó la potabilidad de las aguas subterráneas en el Valle de San Nicolas, estimando que si bien estas pueden ser utilizadas para el consumo humano estas son contaminadas por fuentes domésticas y agrícolas. Asimismo, se observó el aumento de los iones de cloruro asociado principalmente a la disposición inadecuada de químicos domésticos o fertilizantes agrícolas; ya que en las zonas de aumento se observó expansión urbana desde el año 2016 al año 2019.

También se observó aumento en iones de magnesio, del cual no se tiene fuentes de contaminación claras pero que podría asociarse al uso de químicos en las industrias de autoadhesivos y a fertilizantes agrícolas; sin embargo, se da la posibilidad que este aumento se

deba también a la meteorización de minerales como hornblenda o biotita del Batolito Antioqueño. Por último, el aumento en el ion de sulfato en el municipio de Rionegro, se asoció a la actividad económica de la zona la cual es la fabricación de resinas.

6. MARCO TEÓRICO

Las aguas subterráneas son definidas como aquellas que se encuentran concentradas en los poros de las formaciones geológicas o en los saprolitos productos de la meteorización de las rocas; y según el decreto 2811 (art. 149) se definen como *“las aguas subálveas y las que se encuentran bajo la superficie del suelo o del fondo marino, que brotan en forma natural, como las fuentes manantiales captados en el sitio de afloramiento, o las que requieren para su aprovechamiento obras como pozos, galerías filtrantes u otros similares”*.

De otro lado, las principales condiciones para la acumulación y preservación de las aguas subterráneas en el subsuelo; estas dadas por las condiciones hidráulicas innatas de la formación geológica en que se contiene las aguas subterráneas.

6.1. Análisis de Vulnerabilidad de Aguas Subterráneas.

El concepto de Vulnerabilidad de Aguas Subterráneas fue introducido por el hidrogeólogo Margat a finales de la década de los 70's, considerando la vulnerabilidad como “protección que ofrece el medio al agua subterránea contra las actividades antrópicas susceptibles a contaminar”, desde entonces se han dado distintas definiciones, sin existir una definición absoluta para la Vulnerabilidad de aguas subterráneas.

La vulnerabilidad de aguas subterráneas puede ser clasificada como; vulnerabilidad específica, la cual se relaciona al deterioro en relación a una carga contaminante específica. Por otro lado, la vulnerabilidad intrínseca se refiere a la sensibilidad innata del sistema a impactos de origen natural o antrópico, es decir, no evalúa una carga contaminante

especifica sino el riesgo del acuífero a la contaminación dependiendo las características geológicas e hidrogeológicas tanto de las unidades geológicas no saturadas como de la unidades geológicas saturadas, las cuales influyen en el flujo del contaminante desde la superficie; incluyéndose en estas características algunas vías preferenciales como fracturas por las cuales los contaminantes pueden fluir hacia el acuífero. También se toma en cuenta características hidrológicas del área de estudio relacionadas con la cantidad de recarga hacia el acuífero (Daly *et.al*, 2002 & Liggett *et.al*, 2011); siendo estas características cualitativas.

De manera general el análisis de la vulnerabilidad intrínseca se basa en la caracterización de tres (3) factores, que según Vargas *et.al* (2010) se describen de la siguiente manera:

- ***Capacidad de Atenuación de la Carga Contaminante.***

Según Vargas *et.al* (2010), “*se relaciona con los procesos que ocurren en el suelo y en la zona no saturada*”; siendo que estos últimos sirven como capas protectoras para el acuífero. Por lo tanto, en zonas con suelos finos o con presencia de materia orgánica la probabilidad de infiltración de cargas contaminantes en el acuífero es menor.

De otro lado, en la zona no saturada el agua no ocupa la totalidad de los poros; por lo tanto, a mayor espesor de la zona no saturada se tendrá mayor tiempo de tránsito a través del medio; por lo que, su vulnerabilidad será menor a tener mayor tiempo para la eliminación de cargas contaminantes.

- ***Resistencia o Inaccesibilidad en Sentido Hidráulico.***

El régimen hidráulico es dependiente del grado de confinamiento del acuífero, es decir, depende del espesor y de la litología de las capas confinantes.

Siendo la vulnerabilidad mayor en acuíferos con niveles freáticos a menor profundidad, y por el contrario esta será menor en acuíferos con niveles freáticos a mayor profundidad; lo que, a su vez se depende del espesor y características litológicas (tales como, porosidad, permeabilidad, contenido de humedad y el grado de consolidación) de la zona no saturada antes mencionada o de las formaciones geológicas presentes.

- ***Transporte de Contaminantes.***

Corresponde a la topografía, dado que las pendientes o variaciones en la topografía pueden permitir la evacuación de contaminantes a través de la escorrentía o su infiltración en el subsuelo (recarga neta). Igualmente, en áreas con mayor volumen de recarga hacia el acuífero y la zona no saturada de poco espesor, aumentará la probabilidad de contaminación debido a que, según Vargas (2010) la recarga puede funcionar como “un vehículo para la lixiviación y el transporte de contaminantes líquidos y sales”.

6.2.Métodos de superposición o paramétricos.

Distintos autores han propuesto metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero, los cuales se clasifican en modelos de simulación (basado en ecuaciones numéricas que simulan el transporte de cargas contaminantes), modelos estadísticos (relaciona estadísticamente la contaminación con el uso de suelos y las condiciones ambientales) y modelos de superposición o paramétricos (basado en parámetros cualitativos).

De los anteriores son mayormente utilizados los métodos de superposición o paramétricos, los cuales, con base a parámetros cualitativos como la profundidad del nivel freático, el espesor de la zona no saturada, el uso de suelos, entre otros; buscan determinar la vulnerabilidad intrínseca asociando ponderaciones numéricas para cada uno de los parámetros dependiendo de su caracterización previa. De estos métodos, se destacan los métodos GOD y DRASTIC; debido a la disponibilidad de información y el margen de incertidumbre admisibles en los datos de entrada.

6.2.1. Método GOD.

Propuesto por Foster en el año 1987, este método es basado en la interpolación e integración de tres (3) parámetros, los cuales son:

- **G (Confinamiento Hidráulico).** Se relaciona a la identificación del tipo de acuífero (confinado, semiconfinado o libre); donde su ponderación va desde 0 para zonas donde no haya presencia de acuíferos, hasta 1 para acuíferos libres.
- **O (Espesor de Capas Confinante).** Corresponde a la evaluación de las características como textura, grado de consolidación, porosidad o permeabilidad de las capas confinantes siendo la ponderación de 0,4 (más baja) para materiales consolidados mientras que rocas compactas o zonas karstificadas corresponden a ponderaciones de 1,0.
- **D (Profundidad del Agua).** Corresponde a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o la profundidad del techo de un acuífero confinado. Los índices de ponderación desde 0,6 para profundidades <50 m en acuíferos libres hasta 1,0 para niveles estáticos a cualquier profundidad.

Entonces para la obtención del índice de vulnerabilidad mediante el método GOD se tiene la ecuación 1.

$$iV = G * O * D$$

Ecuación 1.

De la anterior ecuación, se tiene los resultados de vulnerabilidad intrínseca los cuales son clasificados mediante los rangos de categorías presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Categorías de vulnerabilidad para el método GOD. Vargas, 2010.

PUNTAJE	VULNERABILIDAD
0.7 – 1.0	Muy alta
0.5 - 0.7	Alta
0.3 – 0.5	Moderada
0.1 – 0.3	Baja
< 0.1	Muy baja

6.2.2. Método DRASTIC.

Propuesto por Aller en 1987, con este se busca reflejar las condiciones naturales del medio, y según Alvarado (2000) el método DRASTIC se basa en las siguientes hipótesis:

- ❖ El contaminante viaje desde la superficie del terreno y penetra durante la recarga.
- ❖ Tiene la misma movilidad del agua.
- ❖ Se aplica a regiones donde el área a ser evaluada sea mayor o igual a 45 Ha.

Este método puede ser utilizado para la evaluación de una carga contaminante específica o para cargas contaminantes en general como en el presente estudio. Para esta metodología se tienen en cuenta los siguientes parámetros, definidos por Aller, 1987:

- **D (Profundidad del Agua).** Se evalúa la profundidad del nivel freático y el espesor de la zona no saturada. Considerando los valores presentados en la tabla 2 para los rangos de profundidades establecidos.

Tabla 2. Valores de ponderación del parámetro D. Vargas, 2010.

VARIABLE	VALORACIÓN
D (PROFUNDIDAD (m))	Dr.
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
< 30,5	1

- **R (Recarga Neta).** Definida como la fracción de precipitación o de escorrentía superficial que se infiltra en el subsuelo, constituye el principal transporte de las cargas contaminantes hacia el acuífero. Para su evaluación se presentan las ponderaciones de la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de ponderación del parámetro R. Vargas, 2010.

R (RECARGAS, mm)	Rr
0 - 50	1
50 – 103	3
103– 178	6
178– 254	8
>254	9

- **A (Litología y Estructura del Medio Acuífero).** Relacionado con las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes.

Tabla 4. Valores de ponderación del parámetro A. Vargas, 2010.

A (LITOLOGÍA DELACUÍFERO)	VALORACIÓN Ar	VALOR TÍPICO Ar
Lutita masiva	1 -3	2
Metamórfica /ígne	2 - 5	3
Metamórfica/ígne meteorizada	3 – 5	4
Arenas y gravas de origen glaci	4 - 6	5
Secuenciad de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 - 10	10

- **S (Tipo de Suelo).** Capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la zona que se caracteriza por la actividad biológica.

Tabla 5. Valores de ponderación del parámetro S. Vargas, 2010.

S (TIPO DE SUELO)	Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol- cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

- **T (Topografía).** Representa la pendiente de la superficie topográfica que influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y subsuperficial.

Tabla 6. Valores de ponderación del parámetro T. Vargas, 2010.

T (PENDIENTE, %)	Tr
0 - 2	10
2 -6	9
6 - 12	5
12 – 18	3
>18	1

- **I (Naturaleza de la Zona No Saturada).** Representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.

Tabla 7. Valores de ponderación del parámetro I. Vargas, 2010.

I (NATURALEZA DE LA ZONA NO SATURADA)	VALORACIÓN Ir	VALOR TÍPICO Ir
Capa confinante	1	1
Cieno- arcilla	2 - 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Roca metamórfica/ígneas	2 – 8	4
Grava y arena	6 - 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 - 10	10

- **C (Conductividad Hidráulica).** Determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.

Tabla 8. Valores de ponderación para el parámetro C. Vargas, 2010.

C (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA)		Cr
m/día	cm/s	
0,04 – 4,08	$4,6 * 10^{-5} - 4,7*10^{-3}$	1
4,08 – 12,22	$4,7*10^{-3} - 1,4*10^{-2}$	2
12,22 – 28,55	$1,4*10^{-2} - 3,4*10^{-2}$	3
28,55 – 40,75	$3,4*10^{-2} - 4,7*10^{-2}$	6
40,75 – 81,49	$4,7*10^{-2} - 9,5*10^{-2}$	8
>81,49	$>9,5*10^{-2}$	10

Adicionalmente, para este método se tiene en cuenta el tipo de contaminante que pudiera ser analizado si este es o no pesticida, con valores que están entre 1,0 y 5,0. Finalmente, los valores de ponderación adicional para cada parámetro se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Factores de ponderación para el método DRASTIC. Vargas, 2010.

FACTORES DE PONDERACION							
TIPO DE CONTAMINANTE	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
Pesticida (DRASTIC-P)	5	4	3	5	3	4	2
No pesticida	5	4	3	2	1	5	3

Por lo tanto, para la obtención del valor índice de cada parámetro por su respectivo factor de ponderación, con la siguiente ecuación 2.

$$iv_{DRASTIC} = (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

Ecuación 2.

De lo anterior, se obtienen datos resultados que varían entre 23 a 236, clasificándose según los rangos de la tabla 10.

Tabla 10. Categorización de vulnerabilidad – Método DRASTIC. Vargas, 2010.

PUNTAJE	VULNERABILIDAD
23 - 64	Muy Baja
65 - 105	Baja
106 - 146	Moderada
147 - 187	Alta
188 - 230	Muy Alta

7. DATOS Y RESULTADOS

7.1. Determinación de la Vulnerabilidad Intrínseca Mediante el Método GOD.

7.1.1. Grado de Confinamiento (G).

En el área de estudio y de acuerdo a la actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico propuesto por Garcés (2018); se presentan tres unidades

hidrogeológicas; de las cuales dos son acuíferos libres dispuestos en las planicies aluviales y en las terrazas aluviales bajas respectivamente, y un acuífero en suelos residuales y depósitos de coluviones, el cual presenta capas de materiales finos siendo capas poco permeables, por lo tanto, presenta características de un acuífero semiconfinado. En la tabla 11, se presentan la ponderación otorgada a cada uno.

Tomando los anteriores índices de ponderación se generó el mapa para el parámetro de confinamiento (ver Figura 7); observándose que el mayor valor (0,1) correspondido de color rojo se encuentra hacia el centro del mapa y el menor valor (0,4) se ubica hacia la periferia del mapa, concordante con la distribución de las unidades hidrogeológicas del VSN.

Tabla 11. Ponderación para las unidades hidrogeológicas del VSN. Autor, 2021.

UNIDAD HIDROGEOLOGICA	PONDERACIÓN
Acuífero en Planicie Aluvial.	1
Acuífero en Terraza Aluvial	
Acuífero en la Superficie de Erosión II.	0,4
Acuitardo	0

7.1.2. Ocurrencia de la zona no saturada (O).

Para este parámetro se tuvieron en cuenta las columnas estratigráficas remitidas a la Corporación en el momento de la perforación de los pozos, e igualmente las interpretaciones de los sondeos eléctricos realizados en el estudio del 2001, los cuales fueron reinterpretadas por Garcés (2018). Esto también fue verificado durante las visitas a campo realizadas durante el acompañamiento a los tramites de concesiones de aguas subterráneas.

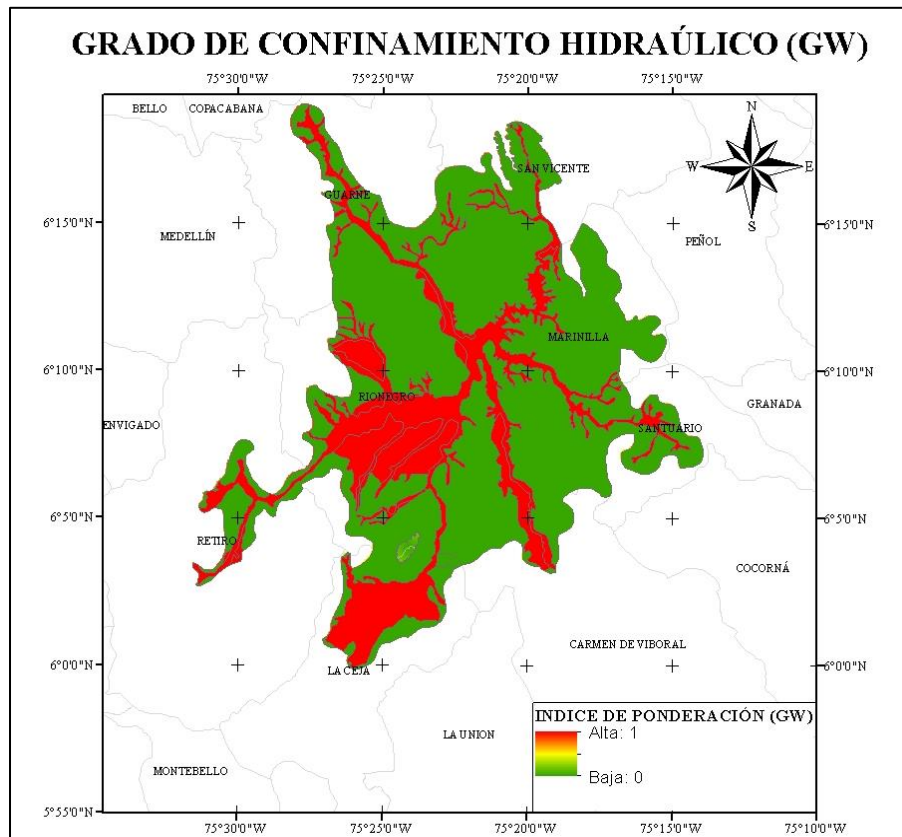


Figura 7. Mapa del parámetro G. Autor, 2021.

Concordantemente, se tiene que predominan las arenas aluviales con capas de limos, estas últimas al no ser constantes se pueden considerar como lentes, en la zona centro del VSN. En tanto se consideró que para la unidad hidrogeológica de la superficie de erosión II, la zona no saturada corresponde a la parte superior de los suelos residuales del Batolito Antioqueño, los cuales presentan texturas limo-arenosas principalmente y cubren una gran extensión de esta unidad hidrogeológica, y en menor medida se presentan suelos residuales del Complejo Antioquia, encontrándose texturas limo-arcillosas; por lo tanto para esta unidad se consideró la ponderación para suelos residuales mencionada anteriormente. De otro lado, no se tienen en cuenta las cenizas volcánicas, debido a que están han sido removidas en gran parte del área de estudio; mientras que, para el cerro el Capiro se consideró la ponderación para las rocas metamórficas; los anteriores números de ponderación se resumen en la tabla 12 y en la figura 8.

Tabla 12. Ponderación para cada Textura hallada en VSN. Autor, 2021

TEXTURA DE LA ZONA NO SATURADA	PONDERACIÓN
Suelos Residuales.	0,4
Limos Aluviales	0,5
Arcillas	0
Arenas Aluviales	0,7
Formación Ígnea/Metamórfica.	0,6

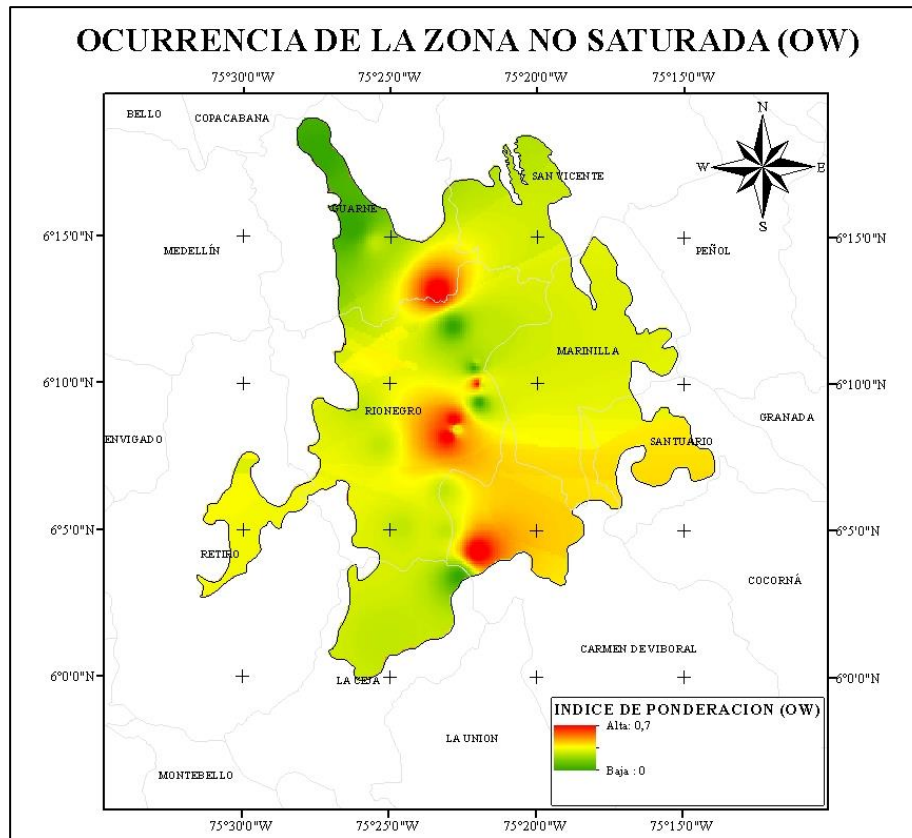


Figura 8. Mapa del parámetro O. Autor, 2021.

7.1.3. Profundidad del Agua (D).

En la zona de estudio no se cuentan con niveles piezométricos que permitan calcular el nivel freático o la profundidad del techo del acuífero; sin embargo, se cuentan con los niveles estáticos estimados durante las pruebas de bombeo, teniendo en cuenta que el nivel freático es igual a la superficie donde la presión del agua alcanza la presión atmosférica, es decir, donde se encuentra la superficie del agua naturalmente.

Tomando estos datos (Tabla 13), se determina que la superficie del agua es somera en el centro del VSN y un poco más profundo en la periferia del mismo; en concordancia con los modelos hidrogeológicos propuestos en el estudio del año 2001 y por Garcés (2018), como se muestra en la figura 9.

Tabla 13. Ponderación dependiendo de la Profundidad del Agua Subterránea. Autor, 2021.

PROFUNDIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA	PONDERACIÓN
<5 m	0,9
5 m– 20 m	0,8

A partir la interpolación de los mapas presentados en las figuras 7,8 y 9; y utilizando la ecuación 1, se ha generado el mapa de Vulnerabilidad del acuífero del Valle de San Nicolás mediante el método GOD, el cual se muestra en la **Figura 10**; y de acuerdo a este se tiene que la Vulnerabilidad de las unidades hidrogeológicas se clasifica, entre vulnerabilidad baja principalmente a vulnerabilidad alta, esta última clasificación se presenta en el centro del mapa predominantemente en el municipio de Rionegro.

Para el área de estudio la profundidad del nivel freático tiene la mayor ponderación, ya que, el nivel se encuentra a profundidades menores de 5 m en la mayor extensión del acuífero; adicionalmente en el municipio de Rionegro donde se ubica la vulnerabilidad moderada se encuentra la unidad de planicie aluvial, la cual al constar predominantemente de arenas y gravas presenta mayor capacidad de infiltración.

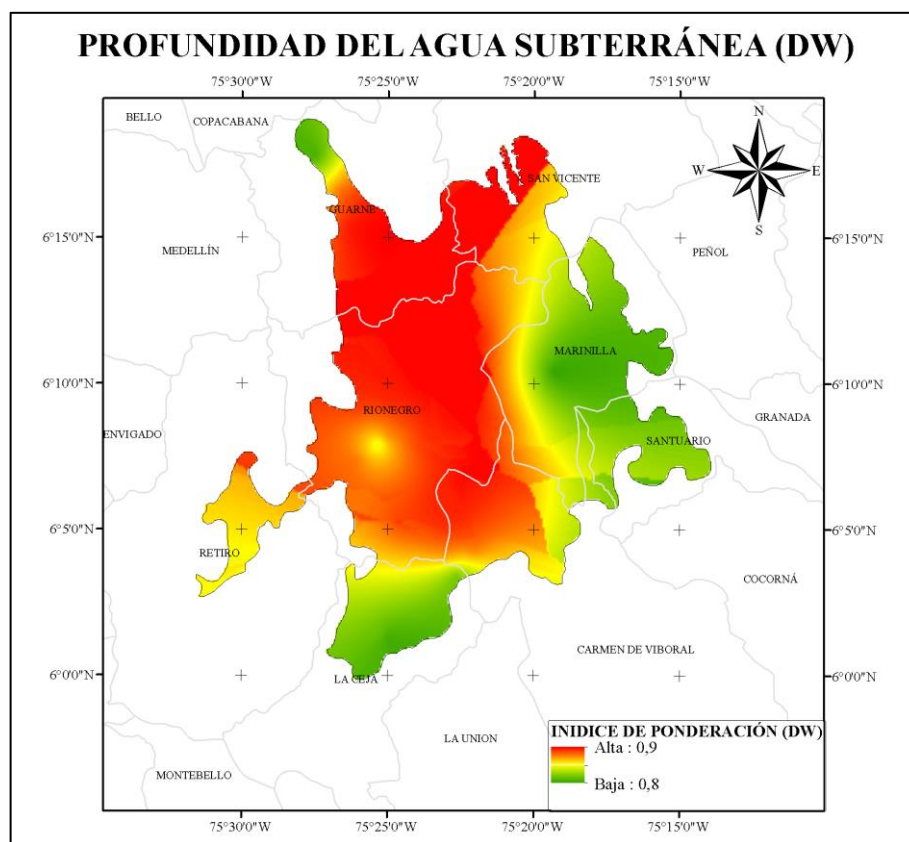


Figura 9. Mapa del parámetro D. Autor, 2021.

7.2.Determinación de la Vulnerabilidad Intrínseca Mediante el Método DRASTIC.

7.2.1. Profundidad del Nivel Freático (D)

Tomando como referencia los niveles estáticos registrados en las pruebas de bombeo allegadas a Cornare, y con base en el ítem 7.1.3. La ponderación otorgada para los niveles estáticos del VSN mediante este método se registra en la tabla14.

Tabla 14. Ponderación de la Profundidad del Agua Subterránea. Autor, 2021.

PROFUNDIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA	PONDERACIÓN
0 – 1,5 m	10
1,5 m – 4,6 m	9
4,6 m – 9,1 m	7
9,1 m – 15,2 m	5

MAPA DE VULNERABILIDAD (MÉTODO GOD)

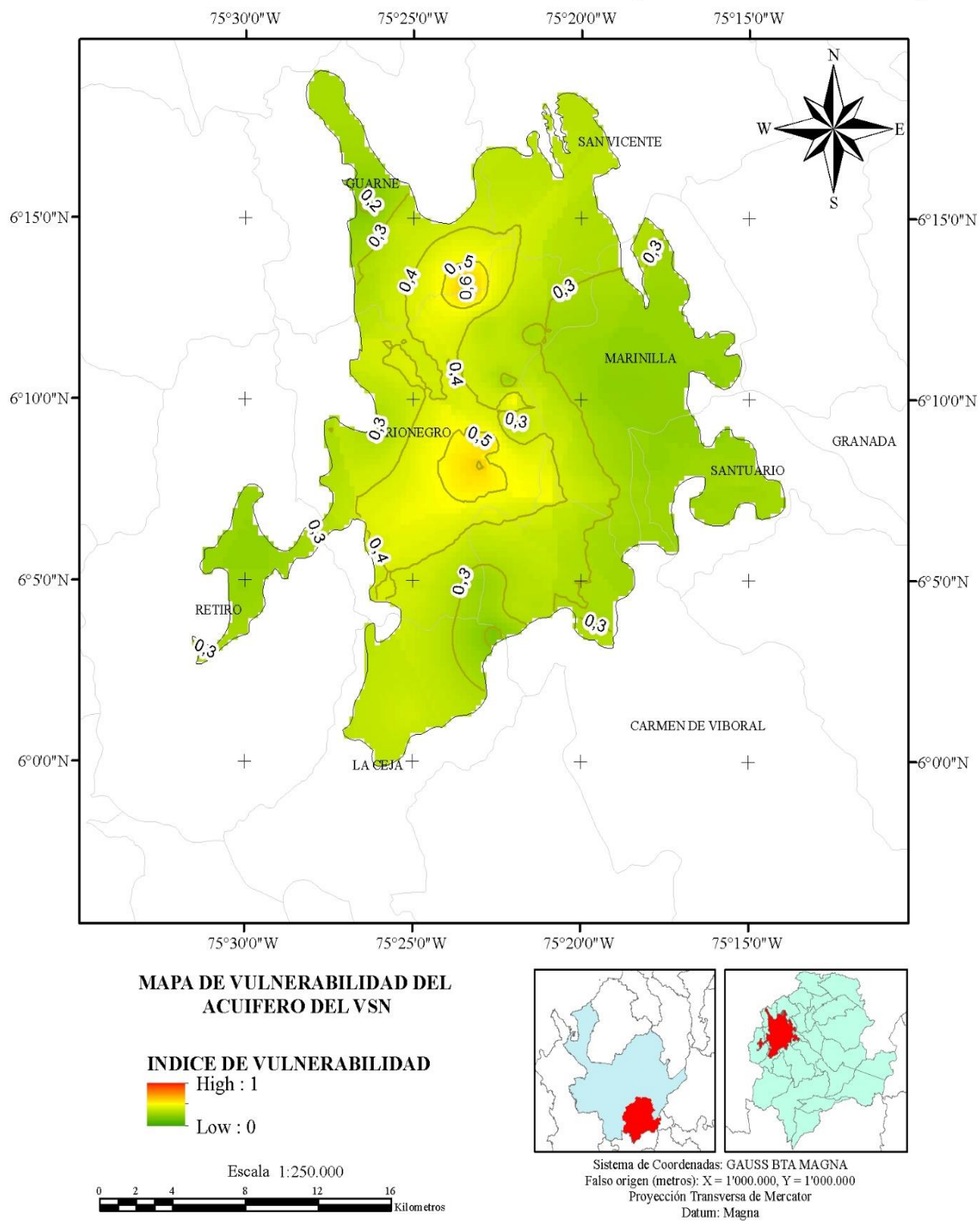


Figura 10. Mapa de Vulnerabilidad GOD, para el Valle de San Nicolás. Autor, 2021.

Consecuentemente se obtuvo un mapa de regionalización de los niveles estáticos (figura 11); donde se observa que las mayores profundidades se encuentran hacia la periferia del VSN, mientras que, hacia el centro se presentan niveles desde 0 m, por lo que, los niveles freáticos son totalmente someros.

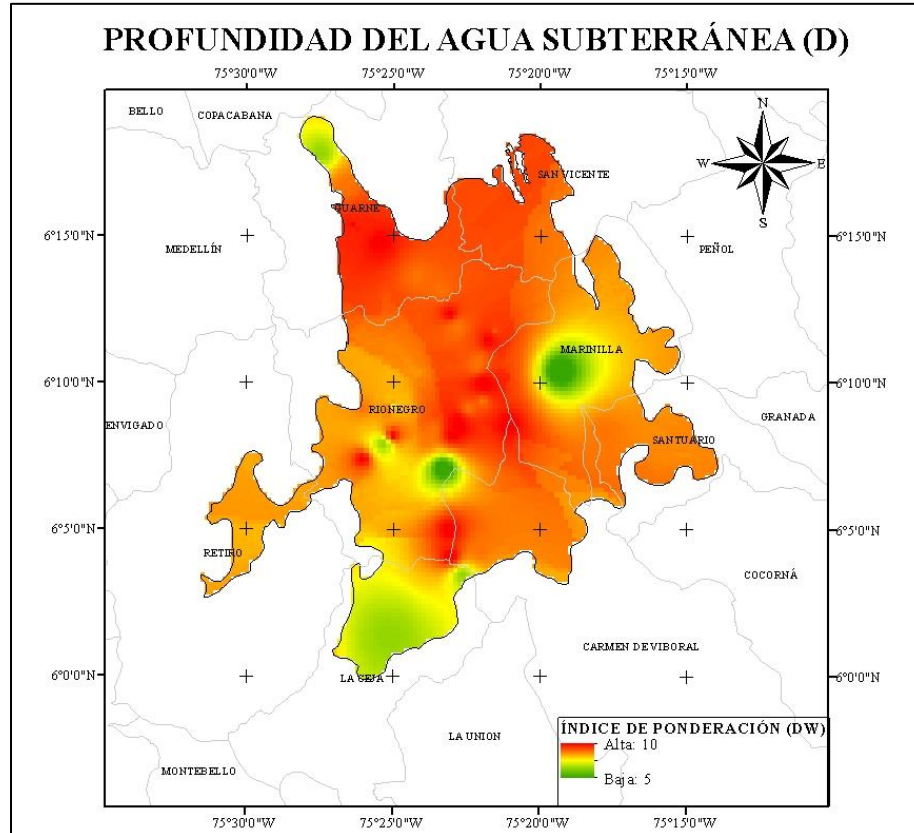


Figura 11. Mapa de Profundidad del agua subterránea. Autor, 2021.

7.2.2. Recarga Neta (R).

La recarga neta se mide como el total del agua principalmente meteórica que alcanza el subsuelo permeable y se almacena en este, esta se mide en mm/año generalmente mediante balance hídricos. Sin embargo, debido a la falta de datos de la capacidad de infiltración y la falta de constancia en los datos meteorológicos en el área de estudio; para el cálculo de este parámetro se utilizó la propuesta de Piscopo (2001); quien propone la estimación de la recarga usando los datos de pendientes, precipitación (mm/año) y

permeabilidad intrínseca del suelo como datos de entrada para generar el mapa de recarga neta; mediante la ecuación.

$$\text{Recarga neta} = \text{Pendiente} + \text{Precipitación} + \text{Permeabilidad del suelo}.$$

Ecuación 3.

Por lo anterior, se utilizaron los datos meteorológicos para el año 2020 obtenidos de las estaciones del IDEAM para generar el mapa de precipitaciones, para la permeabilidad de los suelos se tuvieron en cuenta las permeabilidades obtenidas para cada unidad en el estudio del año 2001 y finalmente para el mapa de pendientes se utilizó un DEM de 12,5 pixeles. De otro lado, se tuvo en cuenta la siguiente ponderación.

Tabla 15. Índices de ponderación para los datos de Recarga. Piscopo, 2001.

PENDIENTE (T)	PRECIPITACION (mm/año)	PERMEABILIDAD DEL SUELO	RECARGA NETA
>18 (1)	0 -5 (1)	Muy Lenta (1)	3 -5 (1)
		Lenta (2)	5-7 (3)
12 – 18 (2)	5 -10 (2)	Lenta Moderadamente (3)	7-9 (5)
6 – 12 (3)	10 - 17.5 (3)	Moderadamente (4)	9-11(7)
2 – 6 (4)	17. 5 – 25 (4)	Moderadamente rápida (5)	11-13 (8)
0 – 2 (5)	>25 (5)	Rápida (6)	13-15 (9)
		Muy Rápida (7)	15-17 (10)

Nota. Se señalan los índices de ponderación obtenidos y utilizados para cada parámetro.

En la figura 12, se muestra los mapas obtenidos para los parámetros de pendientes, precipitaciones y permeabilidades del suelo.

7.2.3. Litología del Medio Acuífero (A).

Referido como la textura de las capas saturadas en las unidades hidrogeológicas. Para este parámetro se tuvieron en cuenta la interpretación de los SEV y las columnas estratigráficas obtenidas de estos. Anteriormente mencionado, en las unidades hidrogeológicas de la

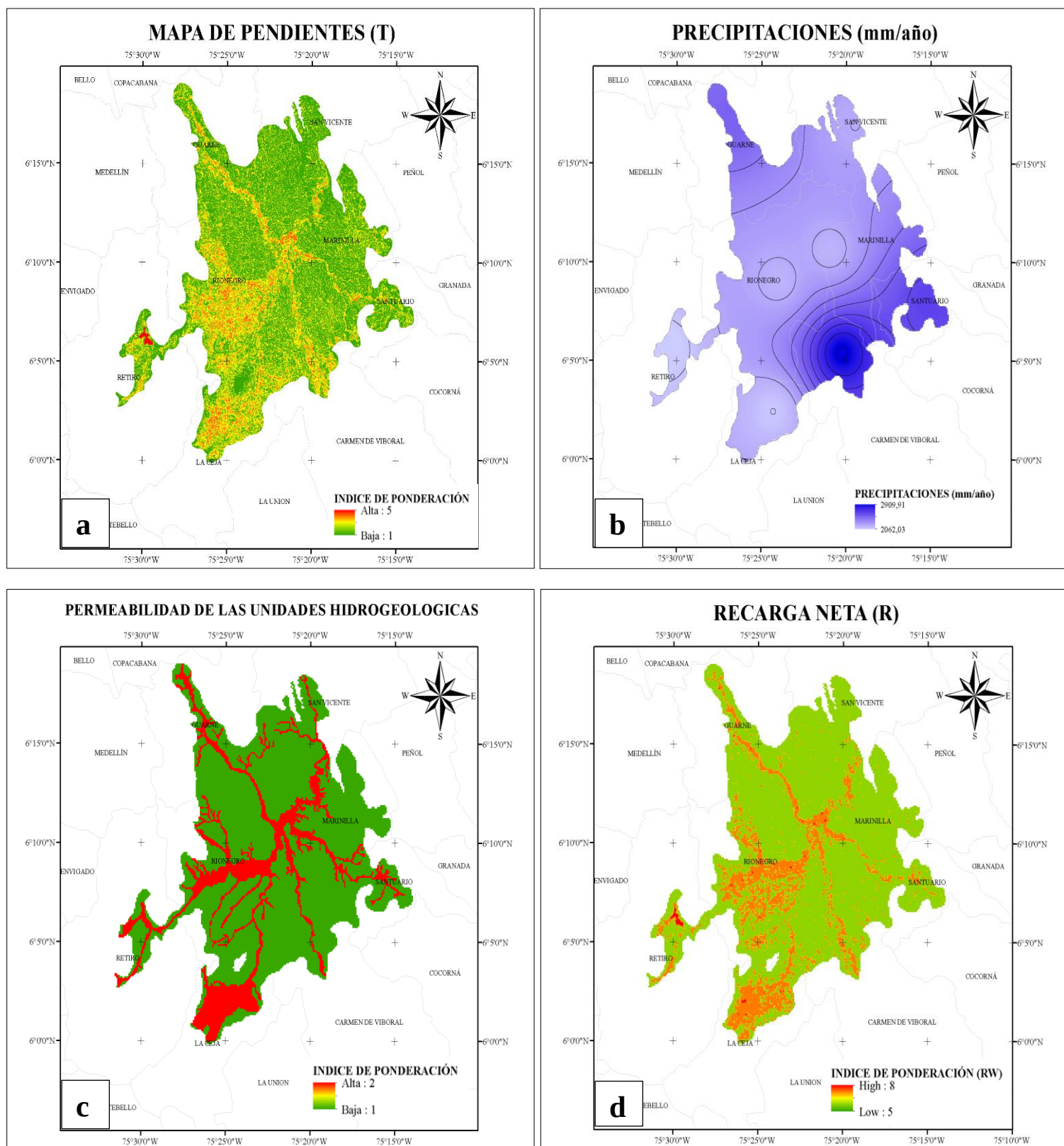


Figura 12. a). Mapa de Pendientes del VSN. b). Mapa de Precipitaciones para el área de estudio. c) Mapa de Permeabilidades Intrínsecas. d). Mapa de las zonas con Recarga para el acuífero del VSN. Autor, 2021.

planicie aluvial y terrazas aluviales bajas se encuentran capas de arenas y gravas saturadas, mientras que en la unidad de superficie de erosión II se encuentran capas de arenas y limos saturadas con presencia esporádica de gravas. En la tabla 16, se muestra la ponderación tenida en cuenta para este parámetro y su representación gráfica en la figura 13.

Tabla 16. Índices de ponderación para la Litología del Acuífero. Autor, 2021.

LITOLOGIA DEL ACUIFERO	PONDERACIÓN
Arena o grava (UHG1y 2)	8
Suelos limo-arenosos (UHG-3)	4

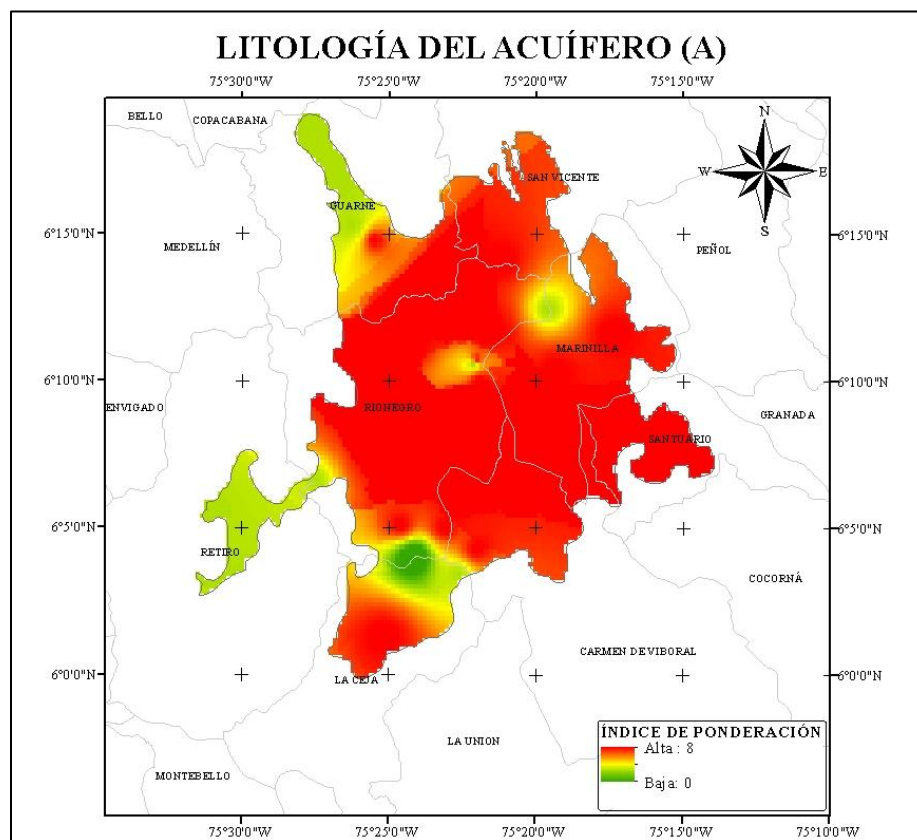


Figura 13. Mapa de ponderación para la litología del Acuífero. Autor, 2021.

7.2.4. Tipo de Suelo (S).

En la ponderación de este parámetro se utilizó el mapa de suelos para el departamento de Antioquia (IGAC, 2017); el cual guarda relación estrecha con la clasificación de suelos arenosos para los depósitos aluviales, suelos limo-arenosos como

resultado de la meteorización del Batolito Antioqueño y suelos limo-arcillosos como producto de la meteorización del Complejo Antioquia. Asimismo, se clasifican las zonas urbanas y los cuerpos de agua correspondientes a las principales fuentes hídricas y al Embalse de la Fe en el municipio del Retiro, como zonas con ausencia del suelo. En la tabla 17, se muestra los índices de ponderación para cada suelo y en la figura 14, el mapa base para este parámetro.

Tabla 17. Índice de ponderación para los Tipos de Suelos. Autor, 2021.

TIPOS DE SUELOS	PONDERACIÓN
Ausente	10
Grava	10
Arena	9
Limo-Arenosos	6
Limos-Arcillosos	3

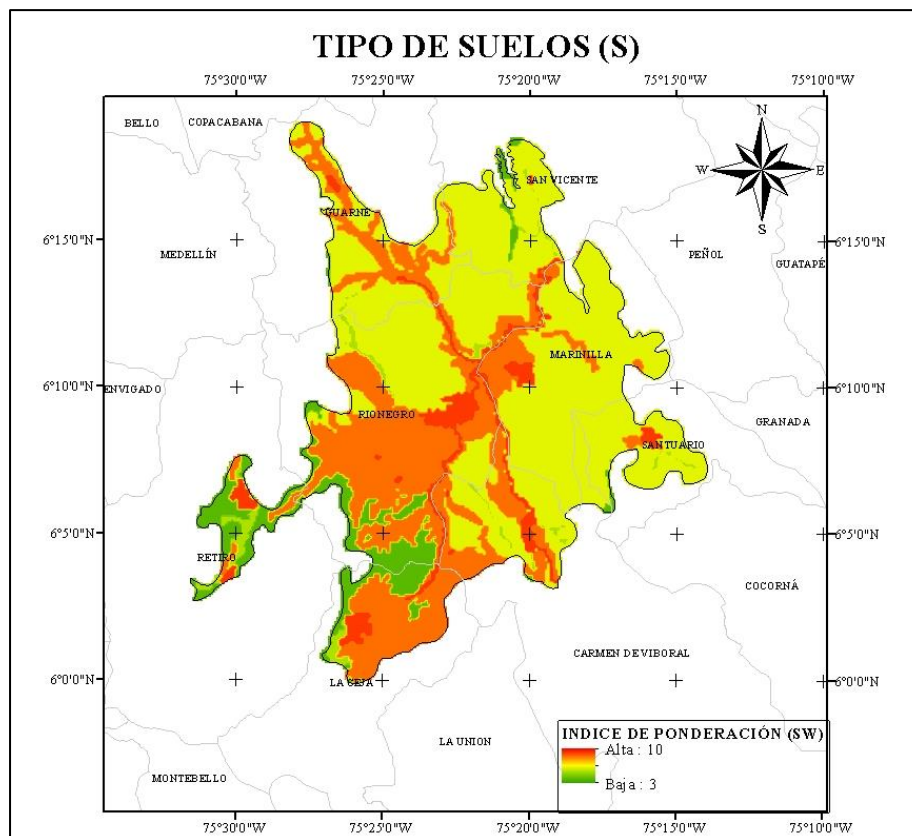


Figura 14. Mapa de Suelos para el VSN. Autor, 2021

7.2.5. Naturaleza de la zona no saturada (I).

Tomando las columnas estratigráficas interpretadas de los SEV y de los datos estratigráficos allegados a Cornare en el momento de la exploración de los pozos; se determinó que en las UHG-1 y UHG-2, la zona no saturada puede estar ausente y en las zonas donde se encuentra esta se compone de arenas o limos. De otro lado, para la UHG-3, su zona no saturada corresponde a capas de limos y/o arcillas. Por lo tanto, su ponderación se presenta en la tabla 18 y se muestra en la figura 15.

Tabla 18. Índice de ponderación para los tipos de suelos. Autor, 2021.

TIPOS DE SUELOS	PONDERACIÓN
Capa Confinante	1
Arcilla	3
Arena o Grava con arcilla	6
Grava y arena	8

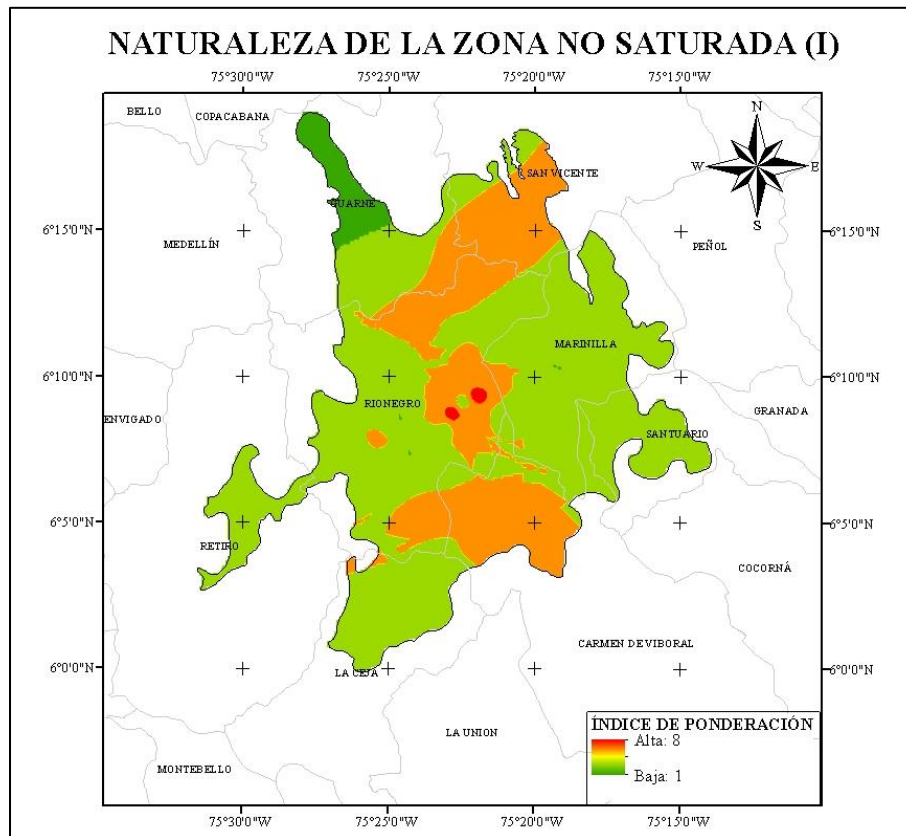


Figura 15. Mapa de interpolación para la zona no saturada. Autor, 2021.

Se resalta que en este parámetro no se tuvieron en cuenta las cenizas volcánicas; ya que debido a la urbanización estas han sido removidas en gran parte de la zona.

7.2.6. Conductividad Hidráulica (C).

Referida como la velocidad con la que el agua atraviesa el subsuelo, se han obtenido algunos registros de conductividad hidráulica de las pruebas de bombeo allegadas en la base de datos de Cornare.

Estimándose que para el área de estudio la conductividad hidráulica varía entre valores de $1.1 \cdot 10^{-2}$ m/día hasta de 14 m/día. En la tabla 19, se presenta la ponderación para los datos obtenidos y se presenta gráficamente en la figura 16.

Tabla 19. Índice de ponderación para la Conductividad Hidráulica. Autor, 2021.

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (m/día)	PONDERACIÓN
0,01 – 4,08	1
4,08 – 12,22	2
12,22 – 28,55	3

Es preciso resaltar que el parámetro de pendientes no se manejó como un parámetro independiente, ya que este fue utilizado en la estimación de la recarga neta, además, su implementación no interfiere en el resultado final, puesto que su peso final es de 1.

Como se muestra en la Figura 17, la clasificación alta se ubica hacia el centro del VSN y en relación con la geometría de la unidad de Planicie aluvial. Por otro lado, la clasificación baja se considera en la periferia del VSN. Así, mediante el uso de la ecuación 2 se obtuvo el mapa de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC (ver Figura 17); en este se observa que como resultado de la interpolación de estos parámetros se tienen clasificaciones de bajas a altas.

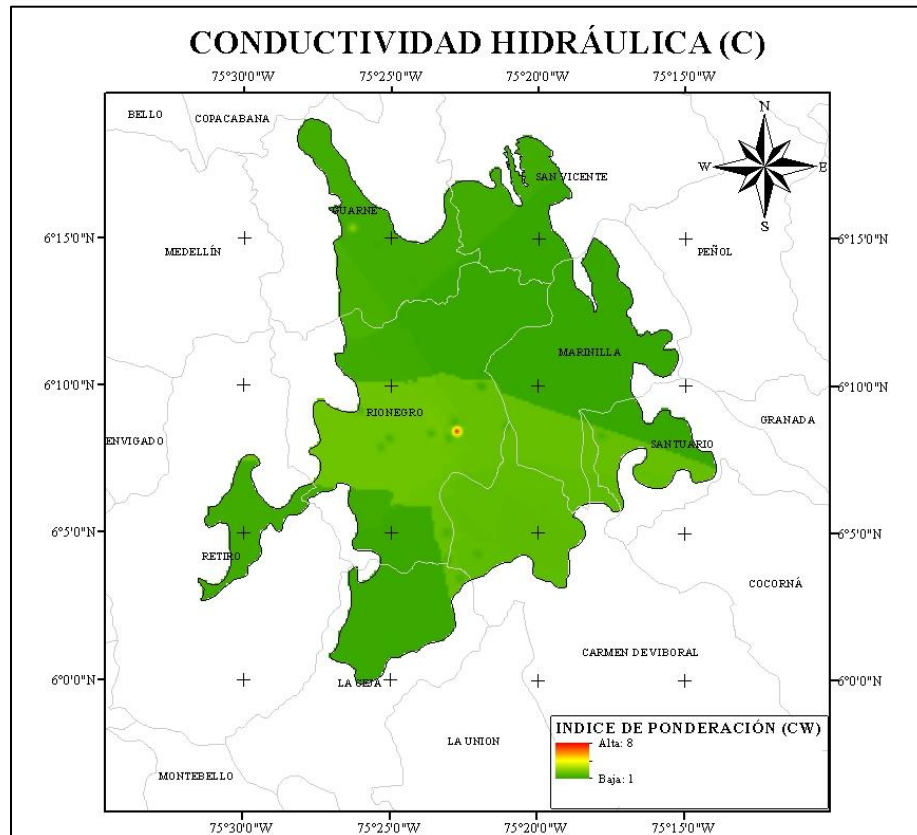


Figura 16. Mapa de Conductividad Hidráulica en el VSN. Autor, 2021.

8. CONCLUSIONES

Para la zona de estudio se han obtenido mapas de zonificación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de San Nicolás (VSN), en los cuales se observa que; mediante el método GOD, predomina la clasificación Baja (con índices entre 0,1 a 0,3) en un 62% de la extensión del acuífero; mientras que, la clasificación Moderada (con índices entre 0,3 a 0,5) en un 35% y la clasificación alta (índice $>0,6$) se observa principalmente en el centro del VSN en un 3% del acuífero.

Lo anterior se obtiene a partir de la interpolación de tres (3) parámetros:

- Para el parámetro Grado de Confinamiento (G), se obtuvo un mapa con solo dos índices de ponderación siguiendo la geometría de las unidades hidrogeológicas clasificadas en

MAPA DE VULNERABILIDAD (DRASTIC)

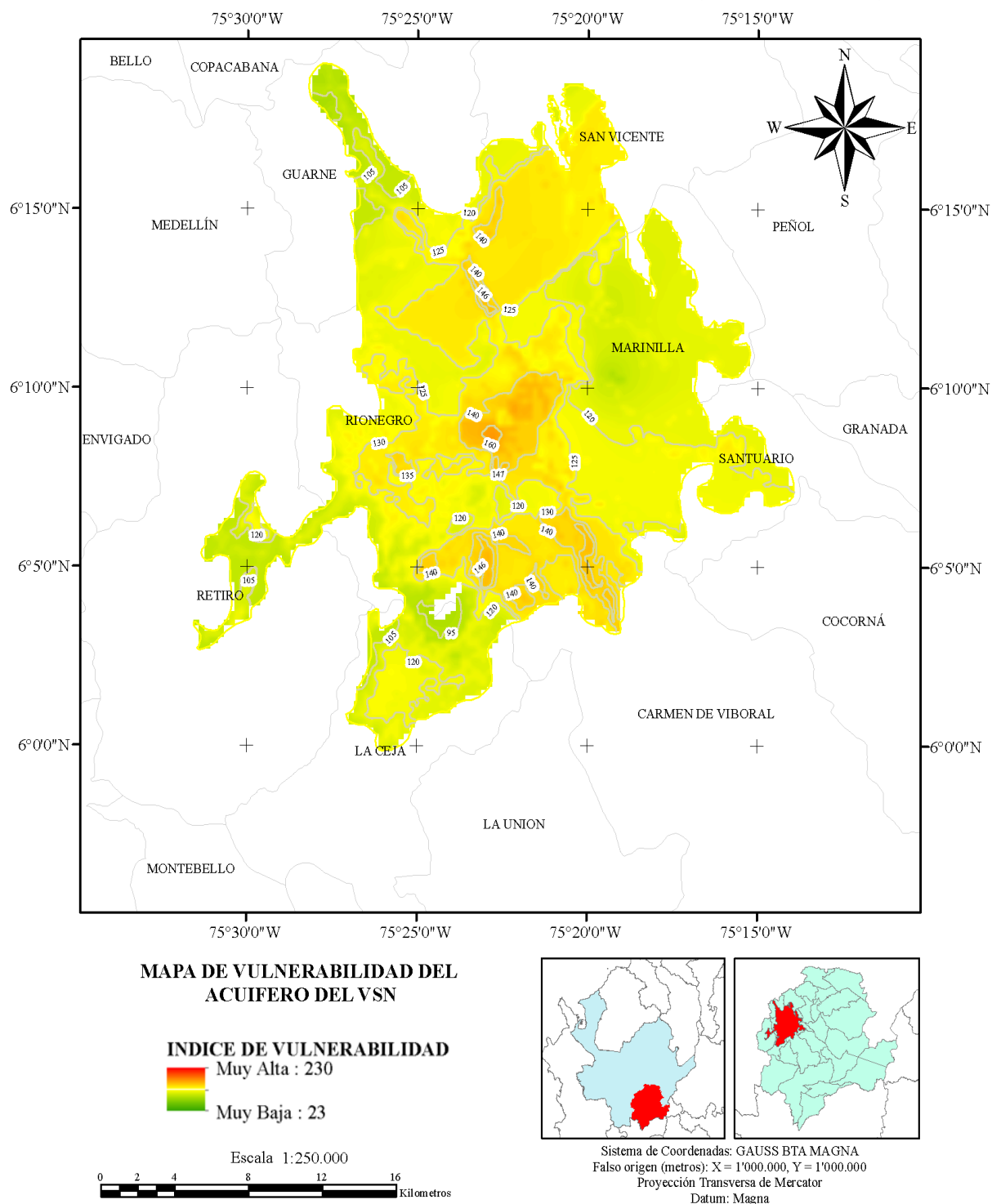


Figura 17. Mapa de Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC para el acuífero del VSN. Autor, 2021.

acuíferos libres, para los cuales se tienen la mayor ponderación y un acuífero semiconfinado en la periferia del acuífero con una menor ponderación.

- En cuanto a la Ocurrencia de la Zona no Saturada (O), se tuvo en cuenta que para la zona central del área de estudio se presentan arenas y gravas aluviales por lo cual se asocia a colores rojos significando vulnerabilidad muy alta debido a la alta permeabilidad de estos materiales, sin embargo, en algunas zonas se encuentran limos aluviales intercalados con arenas y gravas aluviales, lo cual incide en que el índice de vulnerabilidad sea medio dado a la baja permeabilidad de los lentes de limo. De otro lado, se tienen suelos residuales asociados al acuífero semiconfinado con vulnerabilidad baja a media dado a la naturaleza de los suelos residuales.
- En el mapa de la interpolación para la profundidad del agua (D), predomina una vulnerabilidad alta debido a que el nivel freático en general del sistema acuífero $< 1\text{m}$.

De otro lado, por medio del método DRASTIC se tienen zonificaciones desde Bajas hasta Altas; de las cuales las zonas con baja vulnerabilidad se encuentran hacia la periferia del acuífero correspondiente al 7,7% de la extensión del acuífero; vulnerabilidad media hacia el centro del área en una extensión del 89,7 % y, por último, la vulnerabilidad alta en el centro del acuífero concordante al área urbana del municipio de Rionegro, en un área del 2,47 %. Lo anterior, como resultado del álgebra de mapas a partir de la ecuación 2 y de la caracterización de los siguientes factores.

- El primer parámetro para el método DRASTIC es la profundidad de la ocurrencia del agua (D), que dicho anteriormente el nivel freático en general para el acuífero del VSN es somero por lo que para este parámetro se presenta una alta vulnerabilidad a excepción de algunas zonas con vulnerabilidad baja.

- El parámetro de recarga neta (R), ha sido calculado mediante el método de Piscopo (2001) obteniendo un mapa donde el mayor volumen de recarga neta se asocia a la zona de pendientes bajas ubicadas en la zona central del área de estudio; que a su vez se asocia a las unidades hidrogeológicas de planicie aluvial y terrazas aluviales. Por lo tanto, en estas zonas se presentan índices de vulnerabilidad alta.
- Los acuíferos libres se constituyen por intercalaciones de arenas y gravas aluviales con índices de vulnerabilidad alta debido a la transmisividad innata de estos materiales; mientras que el acuífero semiconfinado se presentan suelos limo-arenosos con vulnerabilidad media a baja gracias a la baja capacidad de trasmisión de los materiales.
- En cuanto a los mapas del tipo de suelos (S) y la naturaleza de la zona no saturada, se presentaron principalmente vulnerabilidades medias a bajas para los suelos residuales del batolito Antioqueño y del Complejo Antioquia (2020) debido a su granulometría limo-arenosas; a su vez, se tienen vulnerabilidades medias a altas para los suelos arenosos de la planicie aluvial y las terrazas aluviales. E igualmente, se tienen vulnerabilidades altas para las zonas con ausencia del suelo como el embalse La Fé.
- Po último, con base a que la conductividad hidráulica (C) se refiere a la velocidad con la que el agua a traviesa el suelo; para el área de estudio se encontraron valores muy bajos para los que se presenta un índice de vulnerabilidad baja.

Asimismo, se obtuvo que mediante el método GOD, el parámetro con mayor incidencia es la profundidad del nivel freático; ya que, en la zona con vulnerabilidad moderada se han considerado niveles freáticos menores a 1 m. Mientras que, para el método DRASTIC, los parámetros relacionados con la textura del suelo (S) y las características de la zona no saturada (I) tienen mayor influencia en la zonificación de la vulnerabilidad; en razón de que se presentan

depósitos conformados con arenas y gravas para los cuales se consideran altos índices de ponderación.

En consecuencia de lo anterior, si bien el método GOD utiliza la interpolación de tres (3) parámetros y el método DRASTIC utiliza siete (7) parámetros de entrada; ambos mapas se correlacionan considerando que para ambos métodos se obtuvieron vulnerabilidades bajas en la unidad hidrogeológica de superficie de erosión de Rionegro II (localizado en la periferia del área de estudio) y hacia el centro de la zona más susceptible a la vulnerabilidad se ubica en el centro del acuífero; siendo esta área donde se ha concentrado la mayor expansión urbana.

Finalmente, mediante este análisis se buscaba zonificar el área de estudio según el grado de vulnerabilidad. Es así que concluyentemente se tiene que la zonificación guarda relación con cada una de las unidades hidrogeológicas; teniendo en cuenta que en la unidad hidrogeológica de Planicie Aluvial se tiene zonas con vulnerabilidades altas a moderadas y a su vez la estratigrafía corresponde a sedimentos de arena y grava con capas de materiales finos (los cuales no son constantes en toda la unidad); otorgándoles mayor capacidad de infiltración y almacenamiento; adicionalmente sobre esta zona se concentra la mayor parte de la zona urbana de municipios como Rionegro y también la industria sobre el corredor Medellín - Bogotá, lo cual podría relacionarse con el estudio realizado por Giraldo (2021) donde se muestra el aumento de iones de cloruro, manganeso entre otros; en esta zona del Valle; por lo que la Corporación CORNARE como autoridad ambiental deberá planificar e implementar planes más detallados y específicos de para la prevención y mitigación del riesgo a la contaminación del acuífero específicamente en estas zonas, considerando que en estas se concentran la mayor cantidad de los puntos de captación del recurso.

Por otra parte, para la unidad de superficie de erosión II se presentan vulnerabilidades bajas, lo que significa que no es necesario un constante monitoreo de la calidad del agua ya que son menos susceptibles a la contaminación desde la superficie; asociado a las características litológicas y la topografía de pendientes más elevadas.

Adicionalmente, se puede deducir que la recarga se presenta por la precipitación local y la recarga desde las fuentes hídricas superficiales en cada una de las unidades; y en menor cantidad por recarga provenientes de las zonas altas y que se infiltran en la unidad de superficie de erosión en concordancia con lo propuesto por otros autores. Por lo que, de presentarse contaminación en el acuífero sería posible determinar la fuente de contaminación.

9. RECOMENDACIONES

- 1.** Realizar nuevos estudios geológicos, geofísicos e hidrogeológicos, con el fin de actualizar el modelo conceptual y numérico para el acuífero teniendo en cuenta los cambios antrópicos que han ocurrido en los últimos 21 años.
- 2.** Realizar balances hídricos del suelo anualmente para cuantificar la recarga en el acuífero; y en conjunto con los datos de caudal concedido; determinar la oferta de agua subterránea.
- 3.** Tomar en cuenta el estudio de “*Protocolo de monitoreo de Agua*” realizado por el IDEAM en el año 2018.
- 4.** Realizar campañas de mediciones del nivel freático; tanto en épocas de estiaje o sequía, como en épocas de lluvias; lo cual permita conocer las fluctuaciones del acuífero frente a los cambios climáticos en la superficie.
- 5.** Realizar un estudio hidrogeoquímico, en miras de determinar la relación de las aguas subterráneas con las aguas superficiales, la relación de las aguas subterráneas con la

disolución de minerales en la zona y la evolución de las aguas en cuanto a su contenido de parámetros para la potabilización de la misma.

6. Las mediciones o muestreo de parámetros hidroquímicos deberá tomarse después de que la columna de agua haya sido renovada mediante el abatimiento de la columna de agua remanente y de ser posible la medición de los parámetros como pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y temperatura, deberán ser tomados directamente dentro del pozo.
7. Identificar fuentes de posible contaminación tales como, estaciones de combustibles, rellenos sanitarios, pozos sépticos, cementerios; que puedan ser plumas de contaminación, en particular en la zona de alta vulnerabilidad e igualmente continuar relacionando la incidencia de los vertimientos al suelo otorgados por la Corporación sobre el acuífero. Lo anterior, con el fin prever mecanismo de restauración de la calidad del agua.

10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

1. Aller, L., T. Bennett, J. Lehr, AND R. Petty. *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600. pp. 2-85/018.
2. Alvarado, J. (2000). *Monitoreo de aguas subterráneas. Sobreexplotación, vulnerabilidad y protección de las aguas subterráneas en Cochabamba*. Servicio Nacional de Geología y Minería: SERGEOMIN. Bolívar, Bolivia.
<http://www.aguabolivia.org/PublicarX/GESTION/TEMA3.htm>.
3. Correa, A., Martens, U. (2000). *Caracterización geológica de las anfíbolitas en los alrededores de Medellín*. T. Grado, Universidad Nacional., pp. 236. Medellín.

4. Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I., Zwhalen, F. (2002). *Main Concepts of the European approach for (Karst) groundwater vulnerability assessment and mapping*. Hydrogeology Journal, Vol. 10, No. 2. pp. 340-45.
5. Feininger, T., Botero, G. (1982). *The Antioquian Batholith*. Publicación Geológica Especial, INGEOMINAS p. 12-50. Bogotá.
6. Foster, S. (1987). *Groundwater Quality Monitoring: An Appraisal of Practices and Costs*. WHO-PAHO HPE-CEPIS technical Manual. Lima, Perú.
7. Gallego, J. J., 2011. *Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda de actividad neotectónica en el Oriente Antioqueño (oriente cercano a la ciudad de Medellín)*. Tesis de grado (en edición), Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 195 P.
8. Garcés, D. (2018). *Definición de la Red de Flujo Subterránea de la vega aluvial del Río Negro, mediante Modelado Numérico*. Universidad EIA, Medellín.
9. García, M., Vargas, O., Santos, A., Bernal, F., Olaya, G., Rosero, M., Ceballos, J., González, J., Alfonso, N., Garzón, C., Campillo, A., Onofe, C., Arévalo, D., Campuzano, C., Rodríguez, C., González, J., Guzmán, A., Parada, G., Zarate, E., Tetay, C., Orjuela, L., Cárdenas, O., Díaz., Castañeda, C., Beltrán, M., Contreras, C., Caicedo, F., Aguirre, S. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. IDEAM, Bogotá.
10. Giraldo, V. (2021). *Análisis hidrogeoquímico y de calidad del agua subterránea en el valle de San Nicolás Oriente Antioqueño, para su uso potencial en abastecimiento población*. EAFIT
11. Giraldo, W. (2014). *Modelo Hidrogeológico Conceptual de los Valles de San Nicolás y La Unión*. Cornare- Universidad Nacional, El Santuario.

12. Hoyos, F., Vélez, M., Munera, J., Arias, D. (2001). *Investigación de aguas subterráneas Región Valles de San Nicolás*. Universidad Nacional, Medellín.
13. Hubach, E., (1957). *Contribución al conocimiento de las Unidades estratigráficas en Colombia*. Informe 1212. Servicio Geológico Nacional. Bogotá. pp.166.
14. IDEAM (2018). *Protocolo de Monitoreo de Agua*. IDEAM, Bogotá.
15. IGAC (2017). *Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Antioquia*.
16. Liggett, J., Lapcevic, P., Miller, K. (2011). *A guide to the use of intrinsic aquifer vulnerability mapping*. <https://www.cvrld.ca/DocumentCenter/View/7838/Guide-to-use-of-intrinsic-aquifer-vulnerability-m?bidId=:~:text=Intrinsic%20aquifer%20vulnerability%20is%20a,and%20subsurface2%2C3%2C4>.
17. Page, W. y James, M., 1981. *The antioquity of the erosion surfaces and late Cenozoic deposits near Medellin, Colombia: Implications to tectonics and erosion rates*. Revista CIAF, Vol. 6. No. 1-3. pp. 421-454.
18. Piscopo, G. (2001). *Groundwater Vulnerability Map, Explanatory Notes*. Castlereagh Catchment, NSW Department of Land and Water Conservation, Wagga.
19. Presidencia de la República de Colombia. (diciembre 18, 1974). Decreto 2811 de 1974. *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20167/Decreto_2811_1974.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
20. Presidencia de la República de Colombia. (marzo 10, 1998). *Decreto 475 de 1998*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=1327.

21. Rendón, A., Caballero, J., Arias, A., González, A., Arenas, J., Gallego, J. (2011). *Estudio geológico-geomorfológico en el oriente cercano a Medellín, como apoyo a la búsqueda de actividad tectónica reciente*. Boletín de Ciencias de la Tierra (29), pp. 39-54.
<http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n29/n29a04.pdf>.
22. Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. *Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes*. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá.
<https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>.
23. Vargas, M. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo.