

Determinación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero ubicado en San Juan de Lagunillas, municipio Sucre, estado Mérida.

Determination of the intrinsic vulnerability to contamination of the aquifer located in San Juan de Lagunillas, Sucre municipality, Mérida state.

Pérez, Raimond^{1*}; Ángel, Franklyn²; Rivas, Daniel³

¹ Coordinación de Análisis, Estudio e Investigación del Riesgo, Dirección de Gestión del Riesgo, Protección Civil Mérida.

² Departamento de Desarrollo de Yacimientos Orinoquía, Ecopetrol SA, Bogotá DC, Cundinamarca, Colombia.

³ Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.

*albornozanthony2110@gmail.com

Resumen

Venezuela, específicamente la población de San Juan de Lagunillas que pertenece al municipio Sucre del estado Mérida cuenta con un escaso suministro de agua que no permite el desenvolvimiento de la vida cotidiana de sus pobladores, así como el aprovechamiento de las tierras para la agricultura. Con el fin de determinar la zona más adecuada para la explotación y el aprovechamiento del agua con la que cuentan los pobladores de San Juan de Lagunillas en las reservas subterráneas, se determinó la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero presente, por medio de las metodologías GOD y DRASTIC a través de la herramienta SIG, utilizando datos obtenidos de estudios recientes y procesando muestras recolectadas en campo mediante ensayos de laboratorio, para lo cual se extrajo información de estudios realizados previamente en el área, como sondeos eléctricos verticales (SEV) y microtremores (ReMi), donde se establecen parámetros como la litología y el nivel freático del acuífero, reflejados en un modelado en 3D para una mayor comprensión. Además, se realizan calicatas, toma de muestras y ensayos de laboratorio para la clasificación litológica y estudio de las propiedades físicas del suelo, lo que permite a través de métodos indirectos el cálculo de la permeabilidad. Por otro lado, se procesan datos de precipitación y evapotranspiración mediante un balance hídrico, donde se obtiene la recarga del acuífero por precipitación. Usando el sistema de información geográfica (SIG) todos estos parámetros son utilizados para la aplicación de los métodos GOD y DRASTIC que toman en cuenta las características intrínsecas del acuífero, dando como resultado vulnerabilidades a la contaminación del acuífero que van de media a extremas, las cuales se representan en los mapas de vulnerabilidad, siendo el método DRASTIC el que presenta mayor porcentaje de vulnerabilidad alta con el 67% del área de estudio, comparado con el 54% para el método GOD. Además, partiendo del análisis de los resultados obtenidos, se logró determinar que el área más propicia para la explotación del acuífero se encuentra entre los sectores Estanquillo y El Corozo.

Palabras clave: Vulnerabilidad, Microtremores, Acuífero, GOD, DRASTIC.

Abstract

Venezuela, specifically the population of San Juan de Lagunillas that belongs to the Sucre municipality of the Mérida state, has a scarce water supply that does not allow the development of the daily life of its inhabitants, as well as the use of land for agriculture. In order to determine the most suitable area for the exploitation and use of the water that the inhabitants of San Juan de Lagunillas have in the underground reserves, the intrinsic vulnerability to contamination of the present aquifer was determined, through the methodologies GOD and DRASTIC through the GIS tool, using data obtained from recent studies and processing samples collected in the field through laboratory tests, for which information was extracted from studies previously carried out in the area, such as vertical electrical soundings (SEV) and microtremors. (ReMi), where parameters such as lithology and the groundwater level of the aquifer are established, reflected in a 3D model for better understanding. In addition, test pits, sampling and laboratory tests are carried out for the lithological classification and study of the physical properties of the soil, which allows the calculation of permeability through indirect methods. On the other hand, precipitation

and evapotranspiration data are processed through a water balance, where the recharge of the aquifer by precipitation is obtained. Using the geographic information system (GIS) all these parameters are used for the application of the GOD and DRASTIC methods that take into account the intrinsic characteristics of the aquifer, resulting in vulnerabilities to aquifer contamination ranging from medium to extreme, the which are represented in the vulnerability maps, with the DRASTIC method presenting the highest percentage of high vulnerability with 67% of the study area, compared to 54% for the GOD method. In addition, based on the analysis of the results obtained, it was possible to determine that the most conducive area for the exploitation of the aquifer is between the Estanquillo and El Corozo sectors.

Keywords: Vulnerability, Microtremors, Aquifer, GOD, DRASTIC.

1 Introducción

El agua por definición es un recurso limitado del cual depende la vida en este planeta, aunque cubre las dos terceras partes de la superficie de la tierra, en su mayoría es agua salada, que según Tarbuck E. (2005) representa el 97,2%, por lo tanto, no es apta para el consumo humano.

Únicamente el 2,8% del agua en el planeta es dulce, pero en su mayoría, se encuentra en estado sólido en los polos y en las cumbres de las montañas más altas (2,15%), el agua dulce restante representa el 0,64%, donde el 0,62% se encuentra en depósitos subterráneos, según Tarbuck E. (2005).

Pero no toda esta agua puede ser consumida o es apta para otros usos como la agricultura, ya que puede estar afectada por la actividad del hombre, y por ende estar contaminada.

La falta de estudios y trabajos de investigación enfocados en determinar la presencia o no de contaminantes y determinar el uso correcto de las reservas de agua disponibles, además de la falta de trabajos y planes para la protección de los acuíferos a ser contaminados, han propiciado que algunas comunidades tengan acceso a aguas no aptas para el consumo, generando así graves problemas de salud para sus habitantes. O en otros casos, comunidades que carecen del suministro del vital líquido, pero que cuentan con reservas de agua que no son aprovechadas.

Venezuela, específicamente la población de San Juan de Lagunillas que pertenece al municipio Sucre del estado Mérida, no escapa a esta realidad, ya que, cuenta con un escaso suministro de agua que no permite el desenvolvimiento de la vida cotidiana de sus pobladores, así como el aprovechamiento de las tierras para la agricultura.

Con el fin de determinar la zona más adecuada para la explotación y el aprovechamiento del agua con la que cuentan los pobladores de San Juan de Lagunillas en las reservas subterráneas, se determinará la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero presente, por medio de las metodologías GOD y DRASTIC a través de la herramienta SIG, utilizando datos obtenidos de estudios recientes y procesando muestras recolectadas en campo mediante ensayos de laboratorio.

2 Marco Teórico

2.1 Método GOD

El índice de vulnerabilidad GOD (Foster *et al.* 1988), caracteriza a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en función de los siguientes parámetros (generalmente disponibles o fácilmente determinantes):

Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración. Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes. Distancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados. El índice final integrado de vulnerabilidad de acuíferos GOD es el producto de los índices obtenidos para cada uno de estos parámetros, el producto de estos tres componentes arroja un índice de vulnerabilidad que puede variar entre 0 y 1, indicando vulnerabilidades desde apreciables a extremas (Figura 1).

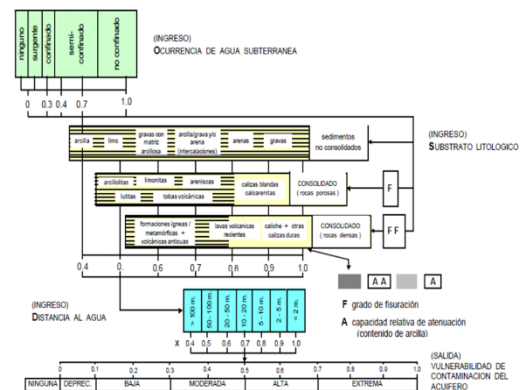


Fig. 1. Matriz de Evaluación de Parámetros G.O.D. Foster y Hirata (1991). Tomado de: Peña, Martínez y Pedraza, (2014).

2.2 Método DRASTIC

Se basa en un sistema de atributos numéricos asociados a documentos cartográficos que se fundamentan en unidades hidrogeológicas homogéneas. El valor numérico de cada uno

de los siete parámetros es afectado por un factor de ponderación, formado por pesos, rangos, comprendido entre 1 y 5 el cual representa la importancia del parámetro en los procesos de transporte y atenuación de los contaminantes (ver Tabla 1). Un parámetro considerado muy importante se verá afectado por un factor de 5 mientras que uno de menor importancia tendrá un peso de 1. Dos grupos de factores de ponderación se utilizan: uno para la evaluación de la vulnerabilidad en un contexto general, el otro en el caso particular de la contaminación por agroquímicos.

Tabla 1 Factores de ponderación para los parámetros de la metodología DRASTIC. Tomado de: Curso de Hidrogeología (Jegat, 2008).

Parametros		Contexto general	Agroquimicos
D	Profundidad del agua	5	5
R	Recarga neta	4	4
A	Acuífero	3	3
S	Tipo de suelo	2	5
T	Pendiente del terreno	1	3
I	Zona no saturada	5	4
C	Conductividad hidraulica	3	2
Rango total de variacion		23-226	26-256

3 Procedimiento Experimental (estilo nivel1rev)

3.1 Esquema Metodológico

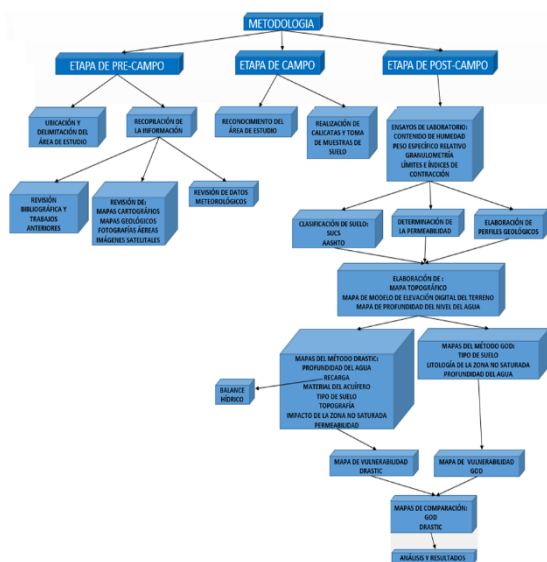


Fig. 2. Esquema Metodológico.

3.2 ETAPA PRE-CAMPO

3.2.1 Recopilación de la información

Se reúne información bibliográfica y datos relacionados con

la zona de estudio, como perfiles geológicos generados a partir de microtremores (ReMi) tomados de Ward A. (2016), mediciones del nivel freático a partir de sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados por Leal, P. y Zambrano, G. (2018).

3.2.2 Selección y Digitalización de Mapas Cartográficos

Se escogen los mapas topográficos Las Tapias y Jají S.E. suministrados por INPRADEM, cuyos índices de hoja son 5241-III-NE y 5941-IV-SE con escala 1:25000 del antiguo Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Cartografía Nacional, para ser digitalizados usando la herramienta SIG, obteniendo el mapa base, al cual se le integran los datos e información necesaria para la aplicación de los métodos hidrogeológicos GOD y DRASTIC.

3.2.3 Análisis e Interpretación de Fotografías Aéreas

Se utilizaron las fotografías aéreas 202, 203 y 204, de la Misión 010493, a Escala 1:65000, tomadas entre las fechas 28-12-97 y 18-02-98, del Fotoíndice Mérida, las cuales fueron proporcionadas por INPRADEM. Donde se resaltan y describen los rasgos geomorfológicos, hidrográficos, tectónicos y vegetación, así como asentamientos demográficos y vialidad, dividiendo la fotografía en cuatro (4) cuadrantes, siendo ubicada el área de estudio en el segundo cuadrante. Obteniendo así evidencias de los procesos geológicos que moldearon el relieve de la zona de estudio.

3.2.4 Análisis e Interpretación de Imágenes Satelitales

Se reconocen los principales aspectos geomorfológicos, hidrogeológicos y fisiográficos del área de estudio vistos previamente en las fotografías aéreas, además se utiliza para ubicar la zona de estudio y puntos de trabajos anteriores de interés. Para ello se utiliza la herramienta *Google Earth*.

3.3 ETAPA DE CAMPO

3.3.1 Reconocimiento del Área de Estudio

Mediante una exploración se verifica la información analizada previamente en las fotografías aéreas e imágenes satelitales, como morfología, relieve y litología, además de verificar parámetros como el clima, vegetación y aspectos demográficos, pudiendo así elegir las zonas más factibles para la recolección de muestras mediante calicatas.

3.3.2 Toma de Muestras

Se realizan cinco (5) calicatas en el área de estudio, donde se recolectaron muestras de suelo para ser analizadas posteriormente en ensayos de laboratorio, con el fin de determinar las propiedades requeridas por los parámetros de las metodologías hidrogeológicas GOD y DRASTIC.

3.3.3 Ensayos de Laboratorio

Con el fin de clasificar y conocer las propiedades físicas del suelo requeridas por los parámetros hidrogeológicos GOD y DRASTIC, se realizaron ensayos en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Los Andes a las cinco (5) muestras recolectadas en campo previamente, ver figura IV.11.

3.3.4 Procesamiento de Datos de los Ensayos de Laboratorio

Luego de haber culminado los ensayos de laboratorio se procede a definir las características físicas y la clasificación del suelo con los datos obtenidos.

3.3.5 Clasificación del Suelo

A partir de criterios granulométricos, para partículas de tamaños mayores al tamiz N°200 proporcionados por el ensayo granulométrico por tamizado vía húmeda y características de plasticidad que describen las propiedades mecánicas e hidráulicas, de los materiales formados por partículas de tamaños menores al tamiz N°200, tomado de los ensayos de límite de consistencia, se realiza la clasificación de suelo, usando la carta de plasticidad y aplicando los métodos SUCS y AASHTO.

3.3.6 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Para la clasificación, se nombra como suelo grueso (gravas y arena), según la granulometría, a más del 50% de las partículas de suelo que sean retenidas por el tamiz N°200, a la cual se le toman en cuenta los valores de coeficiente de uniformidad (Cu), coeficiente de curvatura (Cc) y el porcentaje de finos restante para su clasificación según la figura III.17; y se nombra como suelo fino a la muestra cuyo material supere el 50% del pasante por el tamiz N°200 al cual se le aplican criterios de plasticidad para diferenciar entre limo, arcilla y materia orgánica, utilizando para ello los valores de IP y LL previamente calculados.

3.3.7 Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO)

Se clasifica por descarte de izquierda a derecha de la figura III.18, evaluando el suelo por el parámetro granulométrico en porcentaje que pasa por los tamices N°10, N°40 y N°200, y evaluando el suelo según sus características de plasticidad a través de los límites de consistencia. Siendo materiales granulares cuando el 35% o menos pasa por el tamiz N° 200 y materiales limo-arcillosos cuando más del 35% del material pasa por el tamiz N°200.

3.3.8 Determinación de la Permeabilidad del Suelo por Método indirecto

Se utiliza el método de Hazen para determinar la permeabilidad de forma indirecta, a través de la ecuación 15, usando los

valores de la temperatura en (°C) y el diámetro expresado en centímetros correspondiente al 10% de la curva granulométrica del Ensayo Granulométrico por Tamizado Vía Húmeda

3.3.9 Elaboración de Perfiles Geológicos Usando Software de Modelado y Diseño en 3D

Se establecen 4 correlaciones entre distintas columnas geográficamente próximas utilizando un software de modelado y diseño en 3D para elaborar los perfiles geológicos, a partir de los estudios realizados en la zona de estudio, como lo son la clasificación del tipo de suelo de los ensayos de laboratorio de las muestras de suelo obtenida de las calicatas en campo, las columnas litológicas extraídas de Ward (2016), el cual empleó en la zona de estudio sísmica de refracción por microtemores (ReMi), permitiéndole establecer modelos de velocidades de onda (Vs), en conjunto con valores de densidades de las distintas capas del subsuelo y del nivel freático establecido por Leal, P y Zambrano, G (2018), los cuales realizaron sondeos eléctricos verticales (SEV) en la zona de estudio, determinando resistividades del subsuelo, obteniendo así la clasificación del tipo de acuífero presente en la zona, tal como se muestra en la Figura 3.

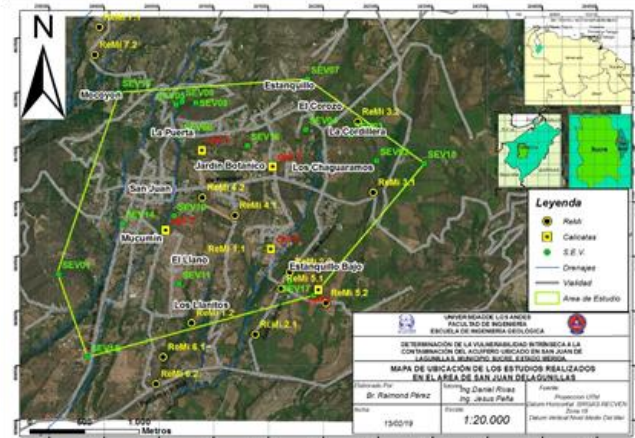


Fig. 3. Mapa de Ubicación de Estudios Realizados en la Zona.

3.3.10 Elaboración de Mapas Base

Se emplea un software de Sistema de Información Geográfica (SIG), para la elaboración de todos los mapas, usando el método de interpolación *Natural Neighbor*, de la ventana de herramientas *Arctoolbox*, creando un *Raster* de interpolación en el vínculo *3D Analyst Tools*, tal como se muestra en la figura 3.2

Para la elaboración de los mapas de vulnerabilidad intrínseca por las metodologías GOD y DRASTIC es necesario realizar los siguientes mapas: Mapa Topográfico, Mapa del Modelo de Elevación Digital del Terreno y Mapa de Profundidad del Agua y Dirección de Flujo.

3.3.11 Elaboración del Mapa de Profundidad del Agua y Dirección de Flujo

Se utilizan los datos de elevación del terreno y nivel freático de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) de Leal, P y Zambrano, G (2018), los cuales fueron procesados mediante una tabla en Excel y llevada al *software* de Sistema de Información Geográfica (SIG), donde se usó para crear contornos la barra de herramientas *Arctoolbox* y los vínculos *3D Analyst Tools*, *Raster Interpolations* y la opción *Natural Neighbor*. Para las líneas de flujo se utilizó la barra de herramientas *Arctoolbox* y los vínculos *Data Management Tools*, *Feature Class* y la opción *Create Fishnet*.

3.3.12 Elaboración de los Mapas del Método GOD

Mediante el método de interpolación Vecinos Naturales del *software* de Sistema de Información Geográfica (SIG), que se utiliza por medio de la barra de herramientas *Arctoolbox*, los vínculos *3D Analyst Tools*, *Raster Interpolation* y la opción *Natural Neighbor*, se elaboran los mapas que evalúan los siguientes parámetros: grado de confinamiento hidráulico del acuífero (G), ocurrencia del sustrato suprayacente (O) y distancia al agua (D), a los cuales se le asignan valores que están en el rango de 0 hasta 1 (tal como se muestra en la Tabla 2), posteriormente se realiza el producto de dichos parámetros para obtener el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero por el método GOD, haciendo uso de la degradación de colores semáforo, donde las coloraciones verdes representan una menor vulnerabilidad, las coloraciones amarillas una vulnerabilidad media y las coloraciones rojas una mayor vulnerabilidad a la contaminación.

Tabla 2. Procesamiento de los Parámetros GOD.

SEV	NORTE	ESTE	G.	O.	D.	G.O.D.
SEV01	940340	239587	1	0,8	1	0,8
SEV02	941375	242491	0,9	0,6	1	0,54
SEV03	941607	242254	0,9	0,6	1	0,54
SEV04	941663	241842	1	0,8	1	0,8
SEV05	941890	240656	1	0,9	1	0,9
SEV06	941603	240698	1	0,9	1	0,9
SEV07	942124	241858	1	0,8	0,8	0,64
SEV08	941905	240839	1	0,9	1	0,9
SEV09	941915	240715	1	0,9	1	0,9
SEV10	940869	240639	1	0,8	1	0,8
SEV11	940246	240685	1	0,5	1	0,5
SEV12	940269	241697	0,9	0,6	0,9	0,486
SEV13	942002	240137	1	0,9	1	0,9
SEV14	940800	240171	1	0,8	1	0,8
SEV15	941351	242926	0,9	0,6	1	0,54
SEV16	941512	241310	1	0,9	1	0,9
SEV17	940143	241914	0,9	0,6	1	0,54
SEV18	939578	239850	1	0,5	1	0,5

3.3.13. Elaboración de los Mapas del Método DRASTIC

Haciendo uso de la degradación de colores semáforo, donde las coloraciones verdes representan una menor vulnerabilidad, las coloraciones amarillas una vulnerabilidad media y las coloraciones rojas una mayor vulnerabilidad a la contaminación, se realizan ocho mapas para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación por el método DRASTIC, mediante el uso del *software* de Sistema de Información Geográfica (SIG), a través del método de interpolación Vecinos Naturales, que se utiliza por medio de la barra de herramientas *Arctoolbox*, los vínculos *3D Analyst Tools*, *Raster Interpolation* y la opción *Natural Neighbor*, donde los siete primeros mapas evalúan los siguientes parámetros: profundidad del nivel freático (D), recarga (R), tipo de acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), impacto de la zona vadosa (I) y conductividad hidráulica (C), a los cuales se le asignan valores que están en el rango de 1 a 10 (tal como se muestra en la Tabla 3), por otra parte, para elaborar el mapa de vulnerabilidad del método DRASTIC, a todos los valores asignados para cada parámetro se procesan a través de una tabla en Excel, multiplicándolos por un factor de redistribución de peso e interpolándolos por el método Vecinos Naturales.

Tabla 3. Procesamiento de los Parámetros DRASTIC.

SEV	NORTE	ESTE	D	R	A	S	T	I	C	D.R.A.S.T.I.C.
SEV01	940340	239587	10	1	8	9	10	6	10	166
SEV02	941375	242491	10	1	8	10	9	8	10	177
SEV03	941607	242254	10	1	8	10	9	8	10	177
SEV04	941663	241842	10	1	8	9	9	6	10	165
SEV05	941890	240656	10	1	8	10	3	8	10	171
SEV06	941603	240698	10	1	8	10	3	8	10	171
SEV07	942124	241858	7	1	8	9	1	6	10	142
SEV08	941905	240839	9	1	8	10	5	8	10	168
SEV09	941915	240715	10	1	8	10	3	8	10	171
SEV10	940869	240639	10	1	8	9	9	6	10	165
SEV11	940246	240685	10	1	8	6	9	4	6	137
SEV12	940269	241697	9	1	8	10	9	8	10	172
SEV13	942002	240137	10	1	8	10	5	8	10	173
SEV14	940800	240171	10	1	8	9	5	6	10	161
SEV15	941351	242926	10	1	8	10	5	8	10	173
SEV16	941512	241310	10	1	8	10	9	8	10	177
SEV17	940143	241914	9	1	8	10	9	8	10	172
SEV18	939578	239850	10	1	8	6	5	4	6	133

3.3.14 Determinación de las Áreas Factibles Para la Explotación del Acuífero

Para efectos de confiabilidad y verificación se comparan visualmente los resultados finales de las metodologías DRASTIC y GOD, además se toman en cuenta los resultados de los mapas bases, seleccionando como zona propicia para la explotación del acuífero aquellas áreas donde la vulnerabilidad intrínseca a ser contaminado sea menor, las cuales deben estar representados por coloraciones verdes y en el peor de los casos coloraciones amarillas para ambos mapas. Las áreas que coinciden luego se evalúan con los parámetros dirección de flujo y pendiente, siendo elegida aquella área que presente un gradiente bajo y donde no se acumulen fluidos que puedan ser contaminados en otras zonas.

4 Discusión y Resultados

4.1 Análisis e Interpretación de Fotografías Aéreas

El área de estudio presenta un drenaje de tipo dendrítico caracterizado por una ramificación irregular de corrientes tributarias de la quebrada La Maruchi, que es el responsable de la depositación del abanico aluvial más antiguo de la zona, de tonalidad gris claro y escasa vegetación, sobre el cual se encuentra el casco central de San Juan, que originalmente fluía sobre el abanico. Además, presenta una falla de tipo deslral y está evidenciado por fotoalineamientos de estructuras geológicas, facetas triangulares, contactos entre diferentes litologías, desvíos de cauces y la formación de la laguna de Urao. Por otro lado, hacia el este del área de estudio se encuentra un segundo y más grande abanico aluvial que presenta desde su ápice tonalidades de grises oscuros, abundante vegetación, canales abandonados de la quebrada La Sucia, tal como se observa en la Figura 4.



Fig. 4. Ubicación de los Perfiles Geológicos.

4.2 Análisis y Resultados de los Ensayos de Laboratorio

Las propiedades físicas y la clasificación de suelo correspondiente a las muestras recolectadas en campo a través de las calicatas en la zona de estudio se determinaron a partir de los ensayos de laboratorio, cuyos resultados se resumen a continuación en la Tabla 4.

4.3 Análisis y Resultados de los Perfiles Geológicos.

En la Figura 5 se muestra la ubicación de los perfiles geológicos, realizados a partir de los resultados obtenidos de Ward (2016) y Leal, P. y Zambrano, G. (2018), así como la clasificación del tipo de acuífero.

Tabla 4. Tabla Resumen de los Ensayos de Laboratorio.

TABLA RESUMEN - ENSAYOS DE LABORATORIO					
Número de Muestra:	M1	M2	M3	M4	M5
Contenido de Humedad:					
w (%)	4,31	4,29	11,52	2,12	1,42
Peso Específico Relativo:					
Gs	2,66	2,66	2,69	2,65	2,63
Granulometría:					
Gravas (%)	69,70	9,82	38,00	54,53	5,12
Arenas (%)	30,00	38,36	59,31	26,27	70,19
Finos (%)	0,31	51,82	2,69	19,20	24,69
Coefficiente de Uniformidad, Cu (mm)	60,00	5,25	9,02	41,82	1,7
Uniformidad	no uniforme	uniforme	uniforme	no uniforme	muy uniforme
Coefficiente de Curvatura, Cc (mm)	1,10	0,70	0,50	1,30	0,9
Gradación	suelo bien gradado	suelo mal gradado	suelo mal gradado	suelo bien gradado	suelo mal gradado
Límites de Consistencia:					
Límite Líquido: LL (%)	22,13	25,14	18,01	27,34	18,37
Límite Plástico: LP (%)	15,48	19,33	No plástico	17,12	13,97
Índice de Plasticidad: IP (%)	6,65	6,81	No plástico	10,23	4,14
Clasificación Del Suelo:					
Clasificación (S.U.C.S.)	GW	ML	SP	GW	SC
Descripción (S.U.C.S.)	grava bien gradada	limo baja plasticidad	arena mal gradada	grava bien gradada	arena mal gradada
Clasificación (AASHTO)	A-2-4(0)	A-5(3)	A-1-a(0)	A-2-6(3)	A-3-b(0)
Descripción (AASHTO)	grava y arena limosa	suelos limosos	cantos gravas y arena	grava y arena arcillosa	cantos grava y arena
Pasantes					
D60 (mm)	36,00	0,84	4,60	23,00	0,72
D30 (mm)	4,90	0,30	1,10	4,00	0,54
D10 (mm)	0,60	0,16	0,51	0,55	0,46
Permeabilidad					
K (m/día)	469,05	33,35	338,89	397,44	276,48

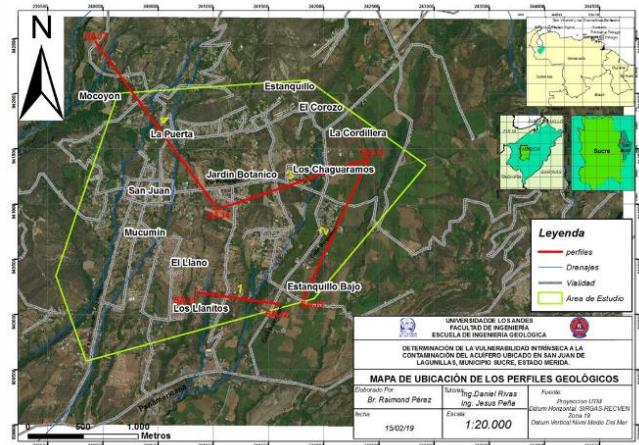


Fig. 5. Ubicación de los Perfiles Geológicos.

4.3.1 Perfil 1 (SAJ1-SAJ2)

Tiene de tope a base en el perfil una primera capa de 27m de espesor de arenas limo – arcillosas con gravas, cuya densidad de $1,7 \times 10^6 \text{gr/m}^3$ y velocidad de ondas (Vs) de 519m/s. Una segunda capa de arenas y gravas en bloques más consistentes de 51m que corresponden a materiales presentes en el subsuelo de $1,7 \times 10^6 \text{gr/m}^3$ y 877m/s de valores de densidad y velocidad de onda (Vs) respectivamente.

Luego se tiene la tercera capa de 45m de espesor de arenas y gravas en bloques altamente consistentes con densidad de $2,4 \times 10^6 \text{gr/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) de 938m/s. La cuarta capa consiste en un espesor indeterminado de sedimentos con mayor grado de compactación que presentan valores más altos en cuanto a velocidad de onda (Vs) 1526m/s y densidad registrada en $2,6 \times 10^6 \text{gr/m}^3$, tal como se detalla en las Figuras 6 y 7.

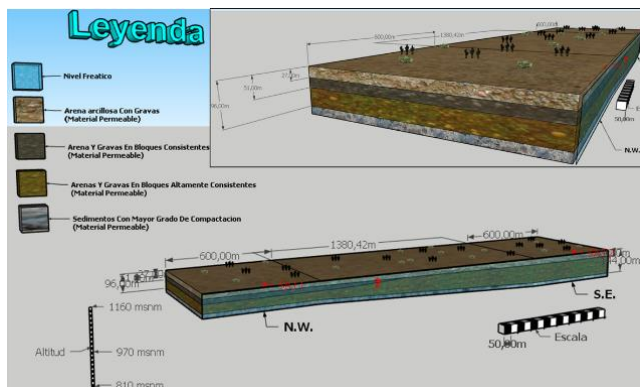


Fig. 6. Perfil Geológico 1 SAJ1-SAJ2 (cara frontal).

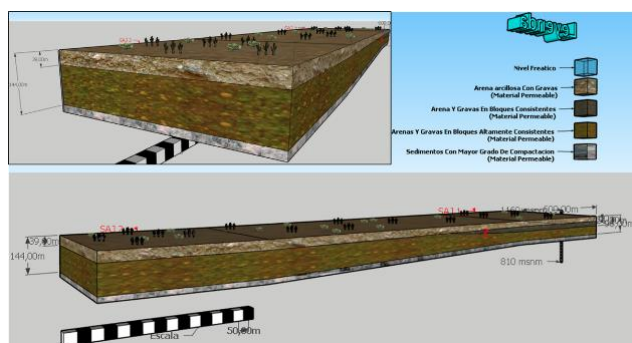


Fig. 7. Perfil Geológico 1 SAJ1-SAJ2 (cara posterior).

4.3.2 Perfil 2 (SAJ5-SAJ3).

Posee de tope a base una primera capa de 17m de espesor, densidad $1,7 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) 484m/s de arenas limo – arcillosas con gravas y algunos peñones, además una segunda capa de material gravoso y bloques más compactados en un espesor de 108m densidad $2,0 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) 600m/s, finalmente se dispone una capa de sedimentos con mayor grado de compactación, densidad $2,68 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda Vs 1114m/s cuyo espesor es indeterminado, tal como se detalla en las Figuras 8 y 9.

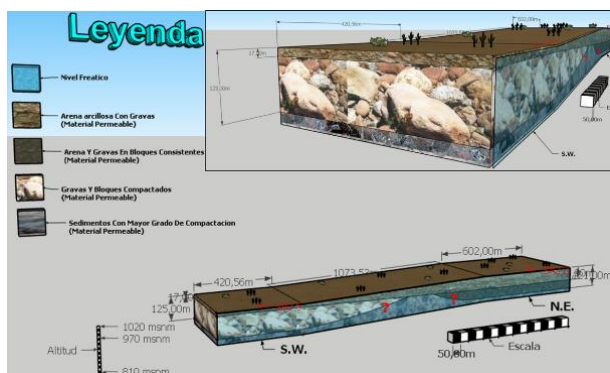


Fig. 8. Perfil Geológico 2 SAJ5-SAJ3 (cara frontal).

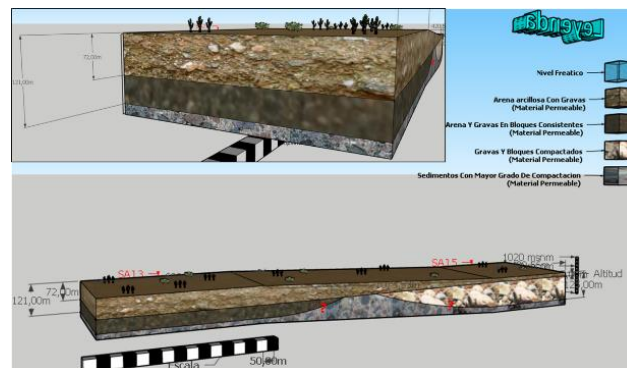


Fig. 9. Perfil Geológico 2 SAJ5-SAJ3 (cara posterior).

4.3.3. Perfil 3 (SAJ3-SAJ4)

De tope a base la disposición de los sedimentos muestra una primera capa de 29m de espesor de arenas limo – arcillosas con gravas y algunos peñones, densidad $1,7 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) 429m/s. Seguidamente se dispone en espesor de 43m del mismo material que la capa anterior con densidad y velocidad de onda (Vs) $2,0 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y 490m/s. La tercera capa es representativa de arenas y gravas en bloques más consistentes, con densidad de $2,3 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) de 883m/s cuyo espesor es 49m para finalmente encontrar una capa sedimentos con mayor grado de compactación de espesor indefinido con densidad de $2,68 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidades de onda (Vs) de 1039 m/s, tal como se detalla en las Figuras 10 y 11.

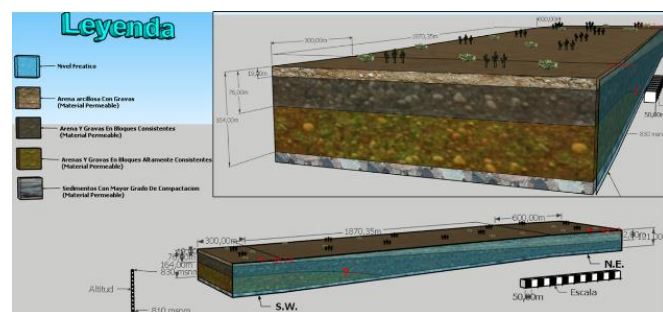


Fig. 10. Perfil Geológico 3 SAJ3-SAJ4 (cara frontal).

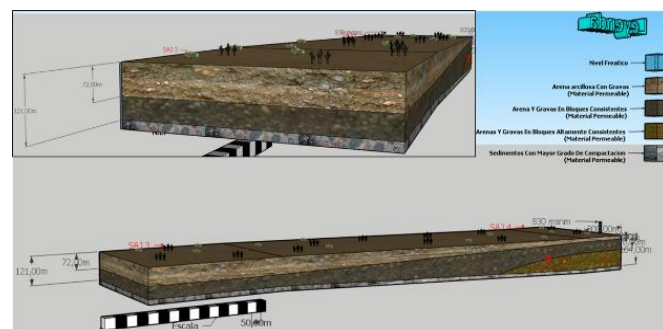


Fig. 11. Perfil Geológico 3 SAJ3-SAJ4 (cara posterior).

4.3.4 Perfil 4 (SAJ7-SAJ4)

Este perfil muestra la disposición de tres (3) capas de tope a base; la primera de ellas de 30m de espesor de arenas gruesas con presencia de gravas con densidad $1,7 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) 544m/s.

La capa dos (2) de 29m de espesor a la cual corresponden arenas y gravas en bloques más consistentes con densidad de $2,54 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) de 798m/s. La capa tres (3) tiene un espesor indeterminado de sedimentos con mayor grado de compactación con densidad de $2,54 \times 10^6 \text{g/m}^3$ y velocidad de onda (Vs) 951m/s, tal como se detalla en las Figuras 12 y 13.

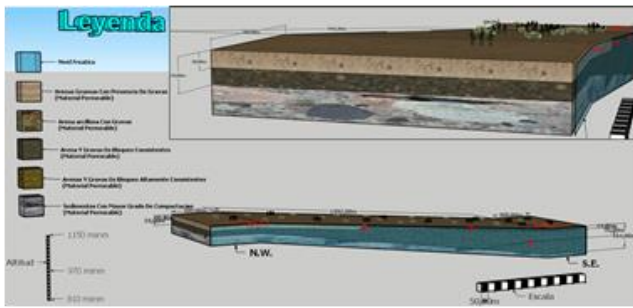


Fig. 12. Perfil Geológico 4 SAJ7-SAJ4 (cara frontal).

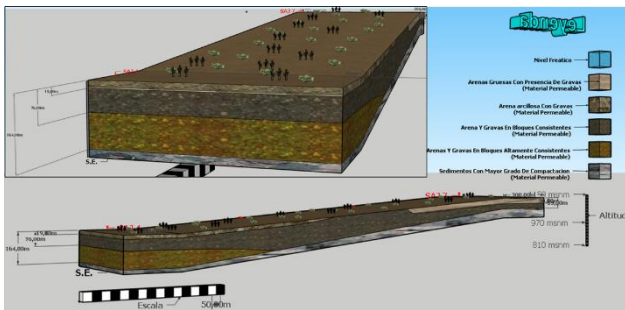


Fig. 13. Perfil Geológico 4 SAJ7-SAJ4 (cara posterior).

4.4 Análisis y Resultados de Mapas Base

4.4.1 Análisis y Resultados del Mapa Topográfico

Muestra una separación prolongada de las curvas de nivel, lo que indica que el área de estudio es un terreno regular poco inclinado, como se observa hacia la parte central y Sur-Oeste de la zona de estudio en la Figura 14.

4.4.2 Análisis y Resultados del Modelo de Elevación Digital del Terreno

Presenta coloraciones grises oscuros hacia el extremo norte del área de estudio, indicativo de un relieve abrupto, siendo el resto del área un relieve regular, representado por coloraciones grises claros, tal como se observa en la Figura 15.

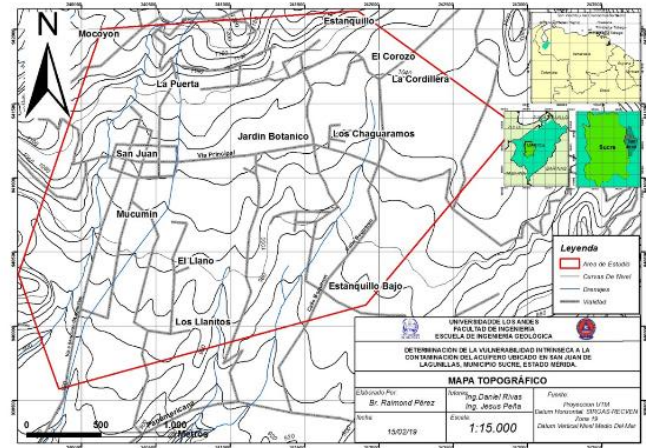


Fig. 14. Mapa Topográfico.

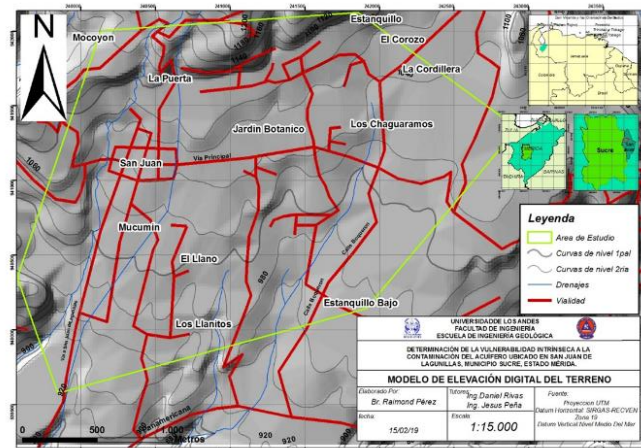


Fig. 15. Modelo de Elevación Digital del Terreno.

4.4.3 Análisis y Resultados del Mapa de Profundidad del Agua y Dirección de Flujo

Indica que el agua tiende acumularse hacia el sur del área de estudio por acción de la gravedad, donde las cotas piezométricas son menores (representado por coloración azul oscuro), hacia el cual se dirigen las flechas que indican la dirección de flujo de agua en el acuífero, tal como se observa en la Figura 16.

4.5 Análisis y Resultados de los Mapas del Método GOD

4.5.1 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (G) del Método GOD: Grado de Confinamiento Hidráulico del Acuífero

El color rojo el área de estudio (como se muestra en la Figura 17), indica que el tipo de acuífero es libre, lo que es

desfavorable, ya que es vulnerable a la contaminación por sustancias que puedan percolar a través de la zona vadosa hacia el nivel freático por acción de la gravedad, debido a que carece de una capa impermeable que impida el acceso de contaminantes.

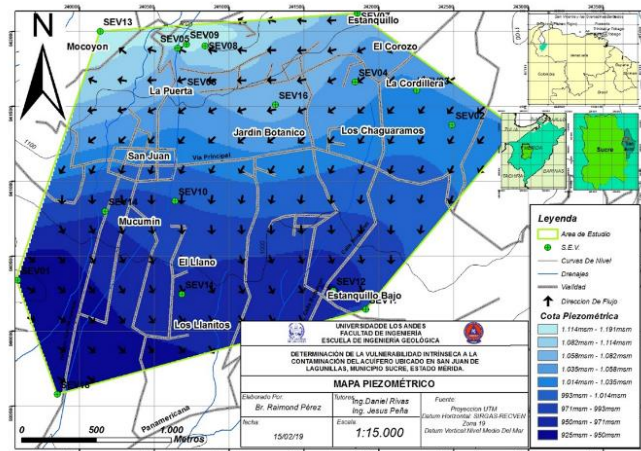


Fig. 16. Mapa de Profundidad del Agua y Dirección de Flujo.

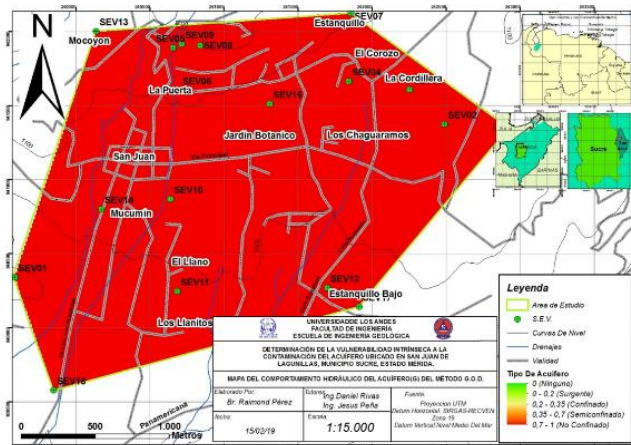


Fig. 17. Mapa del Grado de Confinamiento Hidráulico del Acuífero.

4.5.2 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (O) del Método GOD: Ocurrencia del Sustrato Suprayacente

Posee una degradación de colores de rojo (los cuales representan litologías conformadas por gravas y arenas), naranja (representan litologías compuestas por gravas con matriz arcillosa), hasta llegar a amarillo (representa una litología compuesta por limos), como se muestra en la Figura 18, siendo medianamente desfavorables y muy desfavorables, ya que, el acuífero es vulnerable a la contaminación por sustancias que puedan percolar a través de ellas, debido a que son materiales permeables y aunque algunas litologías contienen arcilla que es impermeable, esta se encuentra en menor proporción.

4.5.3 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (D) del Método GOD: Distancia al Agua

Los colores rojo y naranja que cubren el área de estudio, son distancias no mayores a los 10mts de profundidad, como se observa en la Figura 19, que indican que el nivel freático se encuentra a poca distancia de la cota topográfica, y por lo tanto es desfavorable y vulnerable a la contaminación, debido que de haber alguna sustancia contaminante, esta tiene que recorrer una corta distancia hasta llegar al reservorio de agua, disminuyendo la posibilidad de que dicha sustancia se evapore o sea consumida por microorganismos en la zona vadosa.

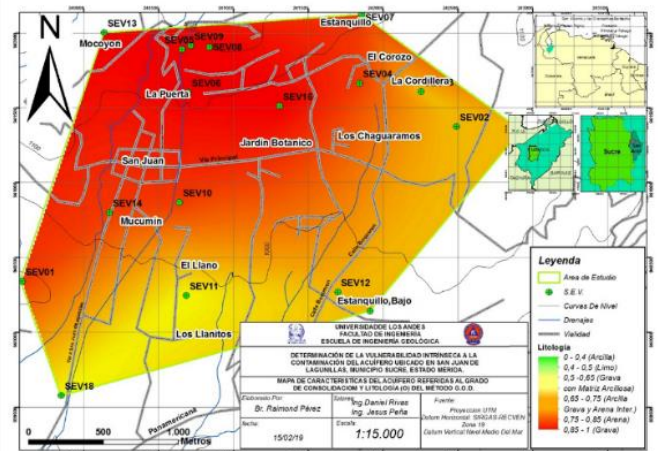


Fig. 18. Mapa de Ocurrencia del Sustrato Suprayacente.

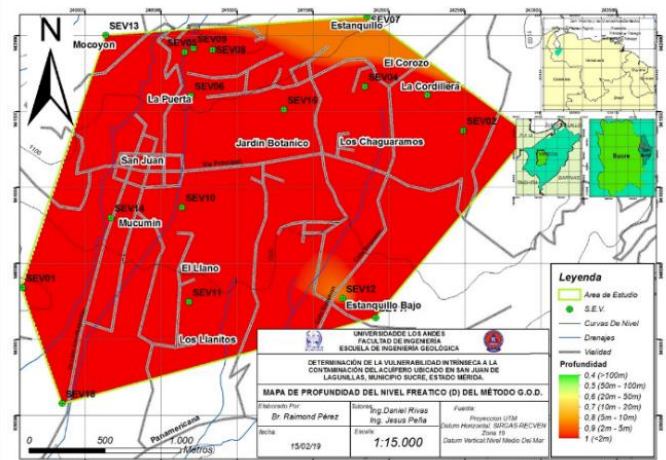


Fig. 19. Mapa de Profundidad del Nivel Freático.

4.5.4. Análisis y Resultados del Mapa del Método GOD

El acuífero presenta vulnerabilidades que van de moderada a extrema, debido a que los valores de los parámetros pertenecientes a este método representan características intrínsecas

medianamente desfavorables, como lo es la clasificación de suelo de litología correspondiente a gravas con matriz arcillosa del acuífero, y muy desfavorables, como lo es la clasificación de acuífero libre, la litología compuesta gravas, arenas y limos, la poca profundidad del nivel freático, indicando que es un acuífero accesible a los contaminantes, ya que, carece de una capa impermeable que evite el contacto de los posibles contaminantes con el agua, además presenta en la zona vadosa una litología permeable que permite el paso de los posibles contaminantes por percolación al reservorio de agua y por último la distancia que tienen que recorrer el contaminante para estar en contacto con el agua es corta, disminuyendo la posibilidad de que dicho contaminante se evapore por las altas temperaturas y que sea digerido por algunos microorganismos tal como se muestra en la Figura 20.

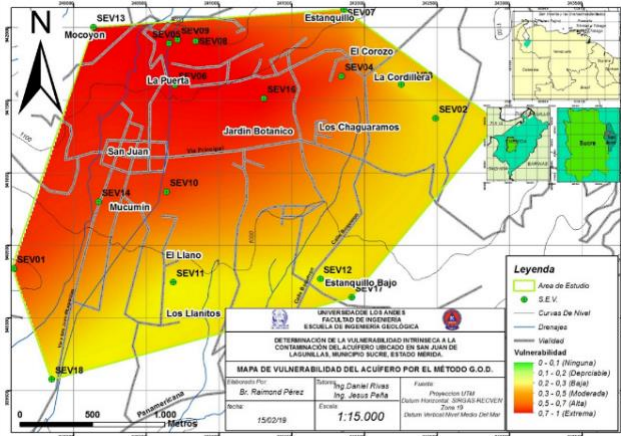


Fig. 20. Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero por el Método GOD.

4.6 Análisis y Resultados de los Mapas del Método DRASTIC

4.6.1 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (D) del Método DRASTIC: Profundidad del Nivel Freático (D)

Presenta colores rojo en mayor proporción y naranja hacia la parte norte del área de estudio, como se muestra en la Figura 21, con distancias no mayores a 10mts de profundidad, que indican que el nivel freático se encuentra a poca distancia de la cota topográfica y por lo tanto es desfavorable y vulnerable a la contaminación, debido que de haber alguna sustancia contaminante esta tiene que recorrer una corta distancia hasta llegar al reservorio de agua, disminuyendo la posibilidad de que dicha sustancia se evapore o sea consumida por microorganismos en la zona vadosa.

4.7 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (R) del Método DRASTIC: Recarga (R)

4.7.1 Análisis y Resultado de la Determinación de la Recarga del Acuífero por Método Indirecto

El balance hídrico realizado a partir de los datos de precipitación y evapotranspiración para determinar la recarga del acuífero es cero 0 como resultado (ver Tabla 5), confirmando que la zona de estudio es semiárida, donde se presenta vegetación xerófila, el contenido de humedad es bajo para las muestras de suelo y es propicio para que se produzcan geoformas como los abanicos aluviales. Además, hace que el acuífero sea menos vulnerable a ser contaminado por la infiltración de alguna posible sustancia contaminante mediante la percolación

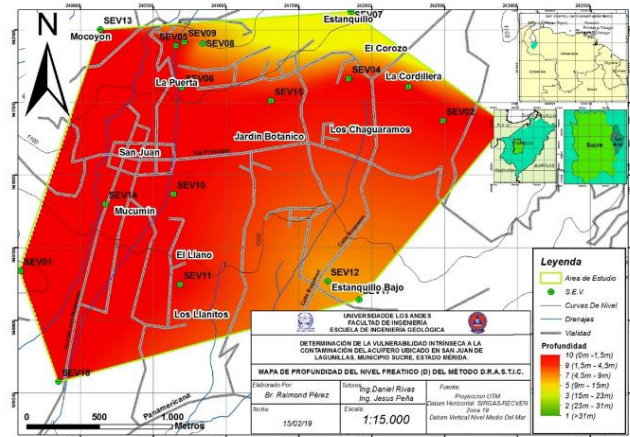


Fig. 21. Mapa de Profundidad del Nivel Freático.

Tabla 5. Balance Hídrico.

	enero	febr	marzo	abril	mayo	junio	julio	agost	sept	octu	nov	dic
T	25,6	26	26,5	26,5	26	25,3	25,1	25,3	25,8	26	25,9	25,5
PP	49,2	51,3	63,4	133,4	235,4	301	304,2	265,7	194,2	161,3	139,1	86,3
N	11,7	11,8	12	12,2	12,5	12,6	12,4	12,4	12,1	11,9	11,7	11,6
d	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
i	11,85	12,13	12,49	12,49	12,13	11,64	11,50	11,64	11,99	12,13	12,06	11,78
l	143,87	143,9	143,87	143,87	143,87	143,87	143,87	143,87	143,87	143,9	143,87	143,87
a	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74
E	138,38	146,6	157,49	157,49	146,65	132,40	128,53	132,40	142,47	146,6	144,55	136,36
ETP	139,41	134,6	162,74	160,11	157,85	139,02	137,24	141,38	143,65	150,3	140,93	136,21
Cc	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Pmp	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
RAU	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
PROF RADICUL	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
PESO ESPECIFI	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440
RAU	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4
P	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4
Y	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
h	0,0504	0,05	0,0504	0,05	0,0504	0,0504	0,0504	0,0504	0,0504	0,05	0,0504	0,0504
h(mm)=RAU	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4
ETR	99,6	101,7	113,8	183,8	285,8	351,4	354,6	316,1	244,6	211,7	189,5	136,7
EXCE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DEFICI	39,81	32,89	48,94	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESCORRENTIA	12,3	12,83	15,85	33,35	58,85	75,25	76,05	66,425	48,55	40,33	34,775	21,575
RECARGA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Presenta una coloración verde que cubre el área de estudio como se muestra en la Figura 22, con una recarga de 0mm, lo que es favorable de existir un contaminante, ya que este no sería llevado hasta el reservorio de agua por la acción de la precipitación.

4.7.2 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (A) del Método DRASTIC: Tipo de Acuífero (A)

Presenta un color rojo que cubre el área de estudio, correspondiente a litologías compuestas por gravas y arenas, como se muestra en la Figura 23, que es desfavorable, ya que es vulnerable a la contaminación por sustancias que puedan percolar a través de la zona vadosa hacia el nivel freático por acción de la gravedad, debido a que carece de una capa impermeable que impida el acceso de contaminantes.

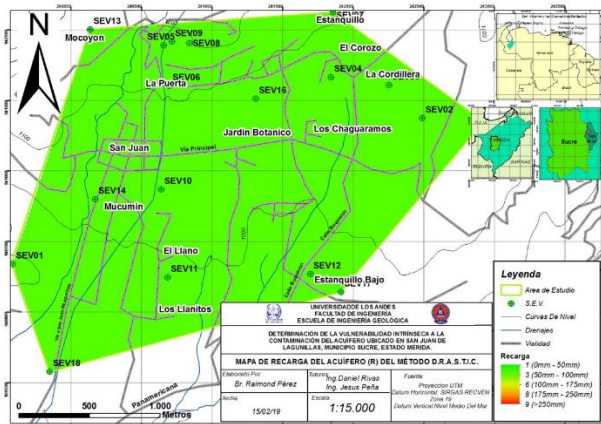


Fig. 22. Mapa de Recarga del Acuífero.

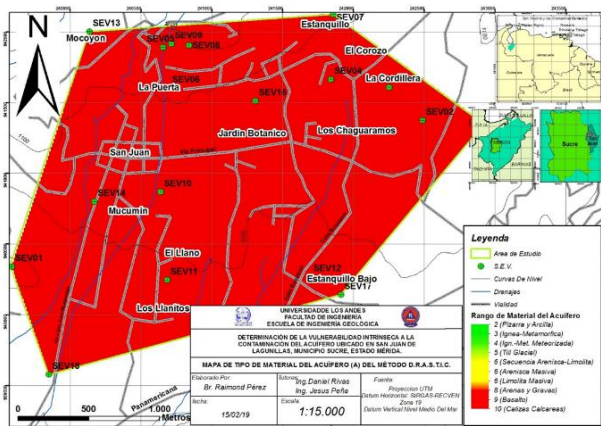


Fig. 23. Mapa de Tipo de Material del Acuífero.

4.7.3 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (S) del Método DRASTIC: Tipo de Suelo(S)

Las tonalidades de los colores rojo y amarillo que cubren la zona de estudio, los cuales representan en su mayoría litologías compuestas por gravas, arenas y limos, como se muestra en la Figura 24, que es desfavorables y medianamente desfavorables respectivamente, ya que es vulnerable a la

contaminación por sustancias que puedan percolar a través de la zona vadosa hacia el nivel freático por ser materiales permeables.

4.7.4 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (T) del Método DRASTIC: Topografía (T)

Los tonos de los colores rojos y amarillos que cubren la mayor parte de la zona de estudio, mostrado en la Figura 25, representan bajas pendientes, que son desfavorables, ya que es vulnerable a la contaminación por estancamiento de sustancias en relieves de baja pendiente, impidiendo que el contaminante fluya por escorrentía, excepto para la parte noroeste del área de estudio que presenta coloraciones verdes característico de pendientes elevadas, permitiendo que los contaminantes fluyan por escorrentía.

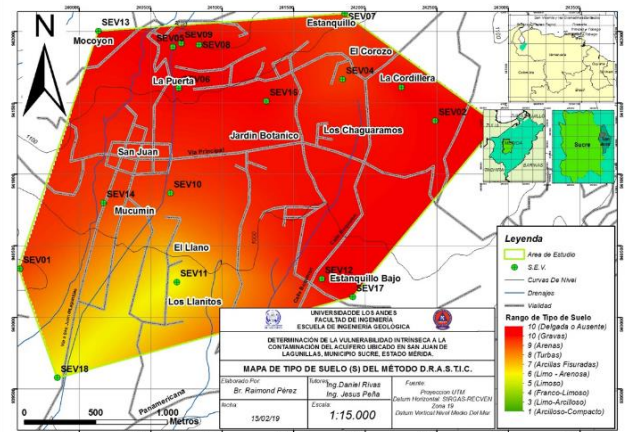


Fig. 24. Mapa de Tipo de Suelo.

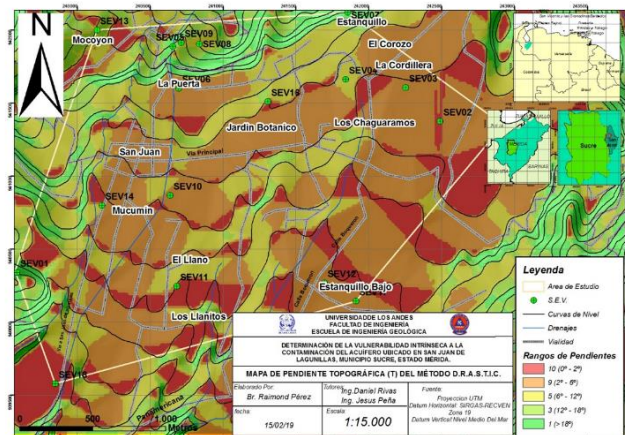


Fig. 25. Mapa de Pendiente Topográfica.

4.7.4 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (I) del Método DRASTIC: Impacto de la Zona Vadosa (I)

Las tonalidades de los colores amarillo y rojo que cubren el área, correspondientes a litologías compuestas por gravas y arena para el color rojo y limos para el color amarillo, tal como se muestra en la Figura 26, que es desfavorable o medianamente desfavorable, ya que es vulnerable a la contaminación por sustancias que puedan percolar a través de la zona vadosa hacia el nivel freático por ser materiales permeables.

4.7.5 Análisis y Resultados del Mapa del Parámetro (C) del Método DRASTIC: Conductividad Hidráulica (C)

Las tonalidades de rojo las que cubren la mayoría del área de estudio, tal como se muestra en la Figura 27, donde los tonos rojos más intensos representan permeabilidades mayores a 40m/días, por lo tanto, representa una vulnerabilidad alta a la contaminación por sustancias que pudieran aprovechar los espacios vacíos interconectados entre las partículas para alcanzar el reservorio de agua, y los tonos amarillos más tenues representan permeabilidades que están en un rango de 28m/días a 40m/días, representando una vulnerabilidad media-alta a la contaminación del acuífero.

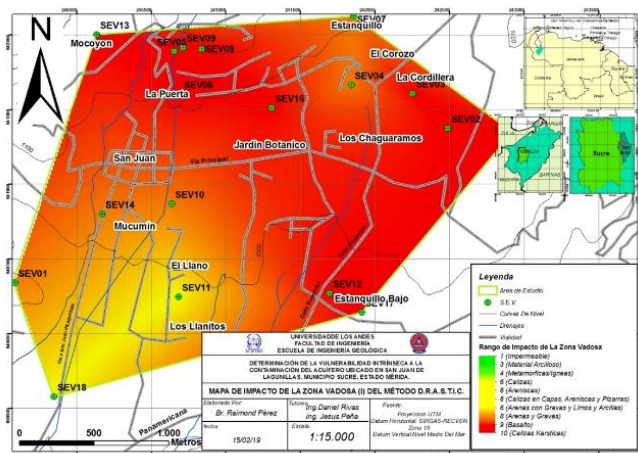


Fig. 26. Mapa de Impacto de la Zona Vadosa.

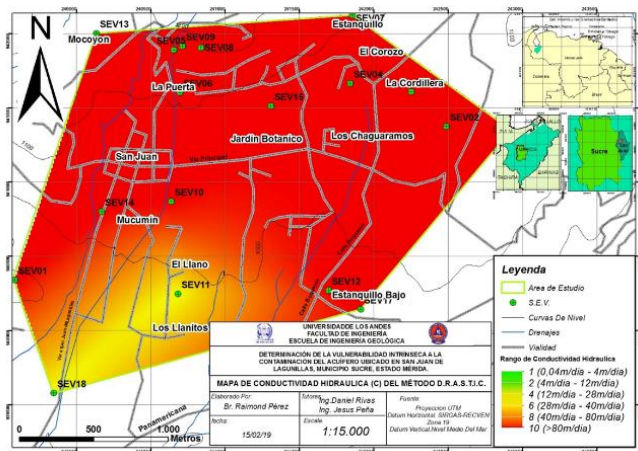


Fig. 27. Mapa de Conductividad Hidráulica.

4.7.6 Análisis y Resultados del Mapa del Método DRASTIC

Los colores rojo y amarillo son las tonalidades que cubren el área de estudio, representando vulnerabilidades a la contaminación del acuífero por características intrínsecas que van de media a alta, tal como se muestra en la Figura 28. teniendo en cuenta que la recarga del acuífero representa un parámetro favorable, el resto de los parámetros no lo son, tal como lo es la profundidad del nivel freático, la litología bajo el mismo, la pendiente del terreno y la conductividad hidráulica, obteniendo así un acuífero que a pesar de presentar una recarga cero, impidiendo que sean transportados posibles contaminantes con la ayuda del agua proveniente de la precipitación hacia el reservorio, ya que este no posee una capa impermeable que impida el paso de fluidos hacia él, con una litología permeable que permite la percolación de contaminantes por acción de la gravedad, con un nivel freático somero que le da menor distancia de recorrido por la zona no saturada a los fluidos y posibles contaminantes.

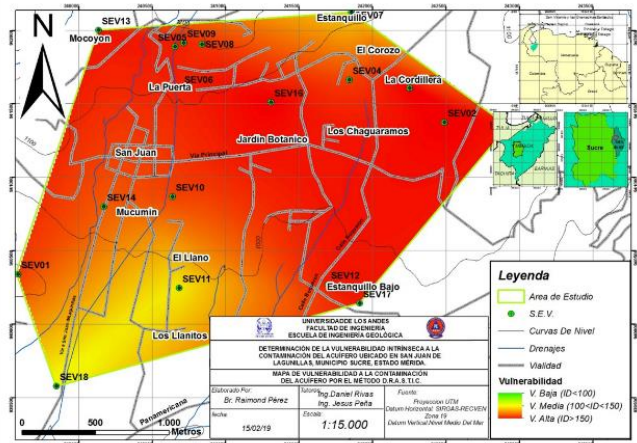


Fig. 28. Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero por el Método DRASTIC.

4.8 Análisis y Comparación de las Metodologías Empleadas para Determinar las Áreas Factibles a la Explotación del Acuífero

Las metodologías GOD y DRASTIC coinciden en que la parte noroeste de la zona de estudio correspondiente a los sectores de Mocoyón, La Puerta, San Juan, Mucumín y Jardín Botánico presentan valores de vulnerabilidad elevados, los cuales están representados con tonalidades de color rojo. Además, ambos métodos coinciden en que el área noreste correspondiente a los sectores Estanquillo y el Corozo y el área Sur-Oeste correspondiente a los sectores El Llano y Los Llanitos presentan valores de vulnerabilidad medios, representados por tonalidades de color amarillo. Sin embargo, difieren en el área correspondiente a los sectores de La Cordillera,

Los Chaguaramos y Estanquillo Bajo, donde para el método GOD presenta valores de vulnerabilidad media, representado por tonalidades amarillas y para el método DRASTIC presenta valores de vulnerabilidad elevadas, representados por tonalidades rojas.

En las Figuras 29 y 30 se observan los mapas de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de los métodos DRASTIC y GOD respectivamente, combinados con el modelo de elevación del terreno y dirección de flujo, necesarios para determinar la zona más factible para la extracción del agua del reservorio, además se representa en gráficos la vulnerabilidad para cada método expresado en porcentaje del área, siendo el método DRASTIC el que presenta mayor porcentaje de vulnerabilidad alta con el 67% del área de estudio, comparado con el 54% para el método GOD.

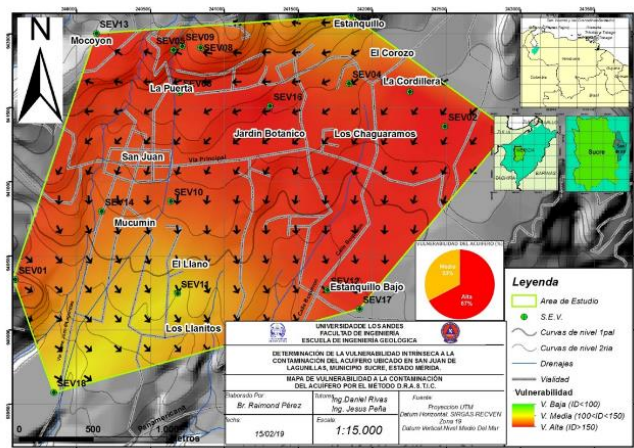


Fig. 29. Mapa del Método DRASTIC con Dirección de Flujo y Elevación del terreno.

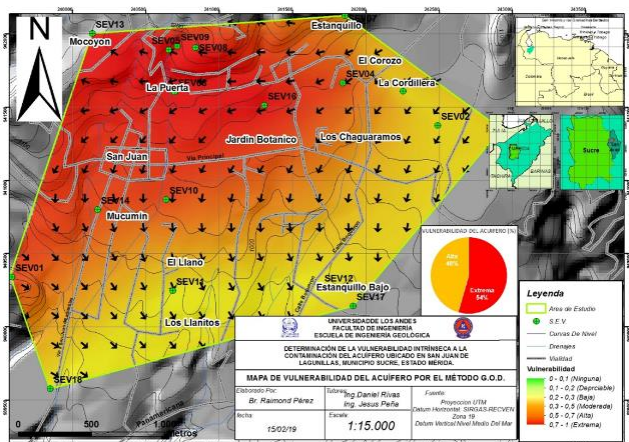


Fig. 30. Mapa del Método GOD con Dirección de Flujo Elevación del Terreno.

5 Conclusiones

Para aplicar las metodologías GOD y DRASTIC que permiten determinar la vulnerabilidad a ser contaminado el acuífero ubicado en San Juan de Lagunillas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas, fue necesario tener la interpretación de las fotografías aéreas, los resultados de los ensayos de laboratorio, los datos de la recarga del acuífero por precipitación y los datos de los estudios previos en la zona como los sondeos eléctricos verticales (SEV) y microzonificación sísmica (ReMi), de los cuales se puede decir que:

Se identificó una bajada a lo largo del frente de montaña constituido por la unión de dos abanicos aluviales principales y un tercer abanico de menor tamaño, mediante interpretación de fotografías aéreas, donde está contenido el acuífero. Se confirmó la existencia de dos abanicos aluviales principales depositados por regímenes hidráulicos diferentes, a partir de las propiedades intrínsecas, como uniformidad, gradación, clasificación y permeabilidad, obtenidas de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras tomadas en la zona de estudio. Donde el primer y más antiguo abanico aluvial es originado por un depósito de corrientes laminares el cual obedece la secuencia de sedimentos gruesos (gravas) hacia el abanico superior, sedimentos intermedios (arenas) hacia la parte proximal y sedimentos finos (limos y arcillas) hacia la parte distal del abanico aluvial. El segundo y más grande abanico aluvial es originado por un depósito de corrientes de flujo de detritos el cual presenta a lo largo de toda su extensión una matriz areno-arcillosa soportando gravas. Ambos abanicos presentan sedimentos permeables (>30 m/día) que los hacen vulnerables a la contaminación por percolación. El balance hídrico determinó que la recarga del acuífero es igual a cero, lo que es favorable para evitar la contaminación del acuífero por percolación de sustancias, ya que al ser derramadas estas sustancias no llegarían al reservorio de agua, alcanzando solo la zona vadosa de profundidad, pudiéndose evaporar por las elevadas temperaturas y en algunos casos ser digeridos por microorganismos.

Se clasificó el acuífero como libre según sus circunstancias hidráulicas y estructurales observadas de los perfiles geológicos realizados a partir de la microzonificación sísmica (ReMi), porque carece de una capa impermeable que lo proteja de sustancias que pueda entrar en contacto con el reservorio de agua, por lo tanto, es vulnerable a ser contaminado. Se determinó la profundidad del nivel freático del acuífero de los sondeos eléctricos verticales (SEV), dando como resultado profundidades someras que lo hace vulnerable a la contaminación de sustancias que tendrían que recorrer cortas distancias en la zona no saturada para llegar hasta el nivel freático.

El área elegida como la más factible para la captación del acuífero corresponde a los sectores Estanquillo y El Corozo

porque presenta vulnerabilidades intermedias para ambos métodos, es un área con gradiente bajo y la dirección de desplazamiento de los fluidos indica que no se concentrarían posibles contaminantes provenientes de otras áreas de la zona de estudio.

Referencias


- Angeleone, S., Casaux, M., Garibay, T. (2006). Permeabilidad de Suelos Geología y Geotecnia. Universidad Nacional del Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
- Araujo, M., & Peña, A. (2011). Caracterización geoelectrica del suelo de la zona sureste del abanico aluvial de Ejido, a partir de sondeos eléctricos verticales someros. Mérida. Trabajo especial de Grado. Universidad de Los Andes.
- Arnold, H. C. (1966). Upper Paleozoic Sabaneta-Palmarito Sequence of Mérida Andes, Venezuela, *Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull*, 50 (11): 2366-2387.
- Audemard, F.A. y Audemard, F.E. (2002). Structure of de Merida Andes, Venezuela: relations whit the South America-Caribbean geodynamic interaction". *Bulletin of Tectonophysics*, vol.345, pp.229-327.
- Auge, M. (2004). Contenidos Ebook Vulnerabilidad de Acuíferos. Obtenido de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html> consultado Mayo 2018.
- Benedetto, G., & Odreman, O. (1977). Nuevas evidencias paleontológicas en la Formación la Quinta, su edad y correlación con las unidades aflorantes en la Sierra de Perijá y Cordillera Oriental de Colombia. In *Memorias del V congreso geológico de Venezuela (Vol.1, pp. 87-106)*.
- Briceño, M. (2005). Análisis de Vulnerabilidad a la Contaminación del acuífero de los Llanos de Calabozo, estado Guárico. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Bosque, J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica* Ed. Rialp, Madrid, España.
- Casteletti, I. (1996). *Nociones de Mecanica de Suelo*. Facultad de Ingeniería. Merida, Venezuela.
- Chavarrí, Y., Hurtado, A. (2015). Estudio hidrogeofísico somero del Sector Jardín Botánico " Ing. Carlos Liscano" San Juan de Lagunillas, Estado Mérida. Trabajo Especial de Grado. Universidad de los Andes.
- Foster, S., Lawrence, A. (1998). Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano: Evaluacion de las necesidades de gestion y formulaciones de estrategias. Documento tecnico 390. Banco Mundial. Washington, DC.
- Foster, S., Hirata, R. (2002). *Groundwater Qualities Protection*. The World Bank, Washington, D.C.
- Gonzales de Juana, C. (1998). *Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*. Caracas: FONINVES.
- Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Granada, A., Granada, T., & Madrid, A. (2005). El método de la sísmica pasiva: una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas. *International Geophysical Technology, S.L. Madrid*. 1-5 pp.
- La Marca, E. (1997). Origen y Evolución Geológica de la Cordillera de Mérida, Andes de Venezuela. Mérida: Cuadernos de la Escuela de Geografía, Nueva Época, N°. 1:1-110. Universidad de Los Andes.
- Leal, P., Zambrano, G. (2018) Modelo hidrogeofísico de los acuíferos ubicados en la población de San Juan de Lagunillas, Municipio Sucre del estado Mérida. Trabajo Especial de Grado. Universidad de los Andes.
- Lopez, J., Fornés, J., Ramos, G., y Villarroya, F. (2009). Las Aguas Subterráneas Un Recurso Natural del Subsuelo. Instituto geológico y minero de España. Grupo industrial de artes gráficas Ibersaf Industrial, S. L.
- López, S., Perdomo, J. (2018). Determinación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero ubicado en las parroquias Tucaní y Florencio Ramírez del municipio Caracciolo Parra Olmedo del estado Mérida. Tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Méndez, J. (2006). *Petrología*. Instituto de ciencias de la tierra. Universidad central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Muñoz, M., y Ruiz, E. (2008). Caracterización estratigráfica de la cuenca "La González", en su sección de la Quebrada Casés e implicaciones neotectónicas, estado Mérida. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Geológica. Universidad de Los Andes, Mérida.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Cartografía Nacional. (1975). *Mapas Topográficos de Las Tapias y Jají (5241-III-NE y 5941-IV-SE)*. Escala 1:25.000.
- Mora, K., Pérez, W. (2015). Zonificación Preliminar de Amenazas Geomorfológicas e Hidrogeomorfológicas en el Sector Compreendido entre San Juan de Lagunillas y las Gonzáles. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Geológica. Universidad de Los Andes, Mérida.
- Schubert, C. (1982). Neotectonics of Boconó Fault, Westem Venezuela. *Tectonophysics*, 85, 205-220.
- Schubert, C., & Vivas, L. (1993). El Cuaternario de la

- Cordillera de Mérida. Universidad de los Andes-Fundación Polar.
- Peña, S., Martínez, V., Pedraza, Y. (2014). Vulnerabilidad a la Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Ciudad de Yopal, Casanare. Universidad tecnológica de Pereira, ISSN 0122-1701. Colombia.
- Tarback, E., Lutgens, F., Tasa, D. (2005). Ciencias de la Tierra. PEARSON, Prentice Halls. Madrid, España.
- The World Bank Group. Climate Change Knowledge Portal. (2019). Region Latin America. Average Monthly Temperature of Latin America for 1991-2016. Obtenido de: <http://climateknowledgeportal.worldbank.org/region/latin-america/climate-data-historical>
- Uzcategui, M. (2017). El Agua Subterránea y su Almacenamiento. Trabajo presentado durante la realización del año sabático.
- Vivas, L. (1992). El Cuaternario. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Ward, A. (2016). Determinación de la condición local del subsuelo a partir de mediciones de Microtremores (ReMi) en la población de San Juan de Lagunillas, estado Mérida. Mérida. Trabajo Final de Grado. Universidad de Los Andes.

Recibido: 5 de octubre de 2022

Aceptado: 8 de febrero de 2023

Pérez, Raimond: *Ingeniero Geólogo, Investigador de riesgos geológicos. Dirección de Gestión de Riesgos, instituto autónomo Protección Civil Mérida, estado Mérida, Venezuela.*

 <https://orcid.org/0009-0000-9787-5302>

Ángel, Franklyn: *Ingeniero Geólogo, Petrofísico Integral. Desarrollo de Yacimientos Orinoquía, Ecopetrol SA, Bogotá DC, Departamento de Cundinamarca, Colombia. Correo electrónico: franklynangel@hotmail.com.*

 <https://orcid.org/0009-0000-9118-7337>

Rivas, Daniel: *Profesor en Escuela de Ingeniería Geológica. ULA. Ingeniero Geólogo. Maestría de Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos en Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).*

Correo electrónico: erivasdaniel@gmail.com; danielrivas@ula.ve

 <https://orcid.org/0000-0003-3899-1447>