



Evaluation of the hydro-lithological properties of the geological units and sedimentary deposits, southeast of the municipality of Villanueva- La Guajira (Colombia), for the determination of the aquifer potential

Evaluación de las propiedades hidro-litológicas de las unidades geológicas y depósitos sedimentarios, al sureste del municipio de Villanueva- La Guajira (Colombia), para la determinación del potencial acuífero

Yuleineth Giseth Anteliz-Galán¹, José Valdemar Holguín-Duran², Diana Carolina Mercado-Zabaleta³, Elías Ernesto Rojas-Martínez⁴, Dino Carmelo Manco-Jaraba^{5*}

¹Ingeniera geóloga, yuleanteliz@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7711-9948>, Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia.

²Ingeniero Geólogo, jholguin2@estudiantes.areandina.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-1043-0798>, Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia.

³Ingeniera Geóloga, diamerza12@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5938-7612>, Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia.

⁴MSc en Geología Económica, erojas@areandina.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-0402-1565>, Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia.

⁵MSc en Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, dinomancojaraba@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>, Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia.

Cómo citar: Y. G. Anteliz-Galán, J. V. Holguín-Duran, D. C. Mercado-Zabaleta, E. E. Rojas-Martínez, y D. C. Manco-Jaraba, "Evaluación de las propiedades hidro-litológicas de las unidades geológicas y depósitos sedimentarios, al sureste del municipio de Villanueva- La Guajira (Colombia), para la determinación del potencial acuífero", *Respuestas*, vol. 27, n.º 3, sep. 2022, pp. 35-48. <https://doi.org/10.22463/0122820X.3667>

Received on April 22, 2022 - Approved on August 11, 2022.

RESUMEN

Palabras clave:

Acuífero;
Capacidad;
Captación de Agua;
Depósitos Aluviales;
Unidades Geológicas.

Esta investigación se enfoca a la evaluación del potencial acuífero de las unidades geológicas y depósitos sedimentarios aflorantes al sureste del municipio de Villanueva, La Guajira, a partir de ensayos de porosidad por método gravimétrico y permeabilidad al gas, permitiendo la determinación de la baja capacidad de las rocas tipo packstone del Grupo Cogollo y limolita de la Formación La Quinta para captar y transmitir agua; además, se realizaron ensayos de permeabilidad al líquido y porosidad por método gravimétrico a los sedimentos Cuaternarios determinándose un coeficiente de permeabilidad moderado a alto apoyado con análisis de granulometría para su clasificación como sedimentos areno-gravosos, asimismo, se implementó el método de Lefranc en seis puntos escogidos de manera aleatoria arrojando un coeficiente de permeabilidad alto.

Las unidades litológicas encontradas en el área se encuentran afectadas por estructuras de carácter regional, como el Sinclinal El Espíritu que constituye una estructura potencial para almacenamiento y transmisión de agua; la Formación La Quinta es afectada por la falla Cerrejón que actúa como barreras limitantes de posibles acuíferos en la zona. Se infiere que el Grupo Cogollo tiene potencial de acuífero por porosidad secundaria al encontrarse altamente fracturada y presentar estructuras de microporosidad por disolución y karstificación, los depósitos Cuaternario exhiben coeficientes de permeabilidad de moderados a alto, mientras que la Formación La Quinta no muestra potencial de acuífero promisorio debido a su compactación, silicificación y bajo coeficiente de permeabilidad.

ABSTRACT

Keywords:

Aquifer; Capacity;
Water Catchment;
Alluvial Deposits;
Geological Units.

This research focuses on the evaluation of the aquifer potential of the geological units and sedimentary deposits outcropping southeast of the municipality of Villanueva, La Guajira, based on gravimetric porosity and gas permeability tests, allowing the determination of the low capacity of the packstone rocks of the Cogollo Group and siltstone of the La Quinta Formation to capture and transmit water; In addition, liquid permeability and porosity tests were carried out by gravimetric method to Quaternary sediments, determining a moderate to high permeability coefficient supported with granulometry analysis for their classification as sandy-gravelly sediments; also, the Lefranc method was implemented in six selected points randomly yielding a high permeability coefficient. The lithological units found in the area are affected by regional structures, such as the El Espiritu Syncline, which is a potential structure for water storage and transmission; the La Quinta Formation is affected by the Cerrejón fault, which acts as a limiting barrier for possible aquifers in the area. It is inferred that the Cogollo Group has aquifer potential due to secondary porosity because it is highly fractured and presents microporosity structures due to dissolution and karstification, the Quaternary deposits exhibit moderate to high permeability coefficients, while the La Quinta Formation does not show promising aquifer potential due to its compaction, silicification and low permeability coefficient.

*Corresponding author.

E-mail Address: dinomancojaraba@gmail.com (Dino Carmelo Manco-Jaraba)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0



Introducción

El agua es el recurso natural más utilizado e importante para la humanidad debido a que es fuente de vida [1]–[4]. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce como derecho humano el acceso al agua y al saneamiento [5]–[7], es un elemento fundamental en el desarrollo sostenible, indispensable en sus aspectos sociales, económicos y ambientales [8]. La cantidad de agua dulce en la tierra es limitada y su calidad está bajo presión constante [9]. A través de la historia el hombre la ha utilizado para diversos fines, generando escasez por la sobreexplotación, por lo que se hace necesario su administración racionalmente para el beneficio común de la sociedad sin afectar futuras generaciones; lo cual implica establecer políticas de uso, manejo, disposición y control [9]–[12].

La calidad del agua es uno de los factores más importantes en un ecosistema saludable. El agua sustenta la diversidad de plantas y vida silvestre. Aunque al principio parezca no estar relacionado, la interacción humana afecta la calidad del agua. Los contaminantes, exceso de nutrientes, fertilizantes y sedimentos con frecuencia se transportan a los lagos y ríos locales a través de escorrentía de las áreas urbanas o los campos agrícolas [13]. El índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano -IRCA, advierte el riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano.

En el municipio de Villanueva, departamento de La Guajira, se evidencian influencia directa del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico superficiales disponibles para la comunidad y la satisfacción de sus necesidades básicas. Este estudio pretende como objetivo evaluar las propiedades hidro-litológicas de las unidades geológicas y depósitos sedimentarios, para la determinación del potencial de acuíferos al sureste del municipio de Villanueva- La Guajira.

Localización

La zona de investigación se encuentra al sureste del municipio de Villanueva, departamento de La Guajira, Colombia; en las estribaciones nororientales de la Serranía del Perijá (SP), con un área de 12.5 Km² perteneciente a la plancha 28IC del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Figura 1).

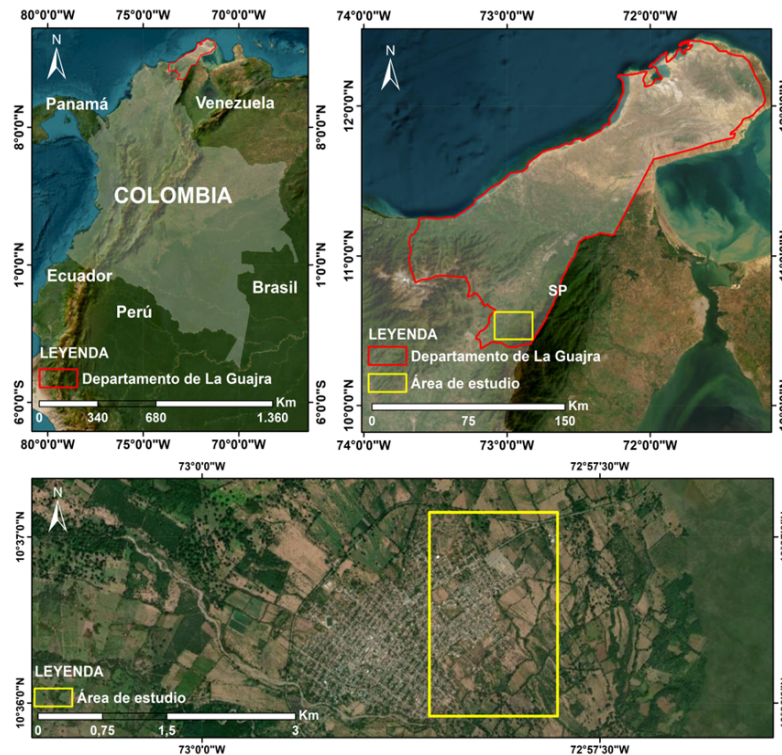


Figura 1. Localización del área de estudio.

Materiales y Métodos

En la ejecución de la investigación se realizó una caracterización fotogeológica a partir de imágenes satelitales con controles geológicos en campo que conllevó a una cartografía de la zona intervenida, obteniéndose las características litológicas, rasgos estructurales e identificación de puntos de muestreos. Las muestras de suelos y rocas se sometieron a análisis petrográficos, clasificándose textural y composicionalmente de acuerdo a Dunham 1962 [14], Folk 1962 [15] y Folk 1974 [16]. Además, se implementaron ensayos de porosidad por método gravimétrico, permeabilidad al gas y líquido en rocas y suelos respectivamente, cuyos resultados fueron complementados con la geología de superficie del área para la determinación del potencial hidrogeológico.

Para la realización de los ensayos de permeabilidad se hizo necesario tener presente el concepto básico del término, que es definido como la capacidad o propiedad de un material poroso de permitir el paso de fluidos, y depende enteramente de factores como el número, tamaño de los poros y lo más importante que los poros se encuentren interconectados además de la existencia de fracturas [17]. La medición de la permeabilidad en suelo generalmente se realiza a través de sondeos, no obstante, para este estudio se efectuó por medio de excavaciones de poca profundidad y geometría definida, aplicando el ensayo de Lefranc para obtener el coeficiente de permeabilidad en suelos permeables o semipermeables de tipo granular situados por debajo del nivel freático y también en rocas muy fracturadas [17].

Existen dos métodos para realizar el ensayo de Lefranc, el primer se basa en el nivel constante donde se rellena de agua el sondeo midiendo el caudal necesario para mantener el nivel (Ensayo de régimen

permanente), y el otro método consiste en medir la velocidad de descenso del nivel de agua (Ensayo de régimen variable) [17]. El método de régimen variable fue seleccionado y aplicado en esta investigación.

Para la implementación del ensayo, se eligieron 6 puntos sobre los depósitos sedimentarios, donde se efectuaron excavaciones cuyas profundidades oscilaron entre 90 a 60 cm, posteriormente se introdujo un revestimiento en material PVC de 4" de diámetro, procediéndose con el llenado hasta que el nivel de agua se mantenga constante, transcurrido un lapso de tiempo de una hora se toma la medición del volumen drenado, nuevamente es llenado hasta el nivel constante tomándose datos sucesivos del volumen de agua drenado con intervalos de 5 min, paralelamente se hace prueba de bombeo manual extrayéndose agua de pozo cercano a la zona evaluada, por medio de tanque artesanales para llevar a cabo el cálculo del caudal, se parametriza el tiempo que tarda el pozo en recuperar su nivel base inicial.

Para la medición de la permeabilidad y porosidad en rocas se efectuó un muestreo aleatorio probabilístico de seis especímenes, tres perteneciente a la unidad geológica Grupo Cogollo (packestone), y tres de la Formación La Quinta (limolitas), adicionalmente muestras de suelo de depósitos del abanico aluvial, utilizando dos tubos de PVC con 25cm de longitud y una pulgada y media de diámetro, introducidos para la toma de suelo.

Los especímenes fueron debidamente empacados, rotulados, posteriormente llevados al laboratorio donde se procedió a sacar núcleos con un diámetro de 4cm y longitudes comprendidas entre 9 y 12cm aproximadamente, para los ensayos de permeabilidad y porosidad.

Resultados y Discusión

Contexto Geológico

La región sureste del municipio de Villanueva se encuentra dominada por las Formaciones La Quinta, de carácter detrítico y volcánico sedimentarios, implicando un magmatismo efusivo durante la sedimentación clástica. El evento volcánico es posterior a un segmento de deposición clástica de la Formación La Quinta y anterior a las calizas de edad Cretácica del Grupo Cogollo y Formación La Luna, originadas por un cambio paleogeográfico en la cual el ambiente continental que rige la Formación La Quinta se ve interrumpida por transgresiones marinas terminando con el evento magmático.

Formación La Quinta (JLq)

La Serranía del Perijá está compuesta en gran parte por rocas volcanosedimentarias de la Formación La Quinta [18] quien empleó el término La Quinta para nombrar a las rocas rojas que yacen estratigráficamente entre el paleozoico (Formación Palmarito o Formación Mucuchachi) y el Cretácico en los Andes de Mérida en Venezuela [19].

La Formación La Quinta se encuentra aflorando al sureste del área, afectada por la Falla La Yaya de carácter regional de tipo inversa, suprayace cabalgando al Grupo Cogollo, geomorfológicamente se caracteriza por exhibir relieves altamente escarpados.

La Figura 2 presenta las muestras macroscópicas de las litologías constituyentes de la Formación La Quinta, Figura 2A: Areniscas de color marrón rojizo claro, según Folk 1974 [16] composicionalmente es

una sublitarenita. Figura 2B: Arenisca, de cemento ferruginoso, granos subangulares de alta esfericidad, bien empaquetada. Figura 2C: Arenisca conglomerática, grano soportada, de cemento silíceo, con granos subredondeados a redondeados de baja esfericidad, moderadamente empaquetada.



Figura 2. Muestras macroscópicas de la Formación La Quinta.

Grupo Cogollo (Kic): Se encuentra distribuido en la región noreste de la zona evaluada abarcando aproximadamente un 25% del área total con espesores de 200 metros aproximadamente, litológicamente constituida por calizas tipo wackestone y packstone con alta microporosidad por disolución, procesos de karstificación y alta fracturación.

La Figura 3 presenta las muestras macroscópicas y fotomicrografía del Grupo Cogollo, Figura 3A: Caliza gris, según Dunham (1962) [14] packstone. Figura 3B: Caliza con vetillas de calcita, según Dunham (1962) [14] wackestone. Figura 3C: Microfotografía de packstone, con algas, braquiópodos, bioclastos que se atribuye a un ambiente marino somero. Figura 3D: Estructuras de micro disolución características karstificación.

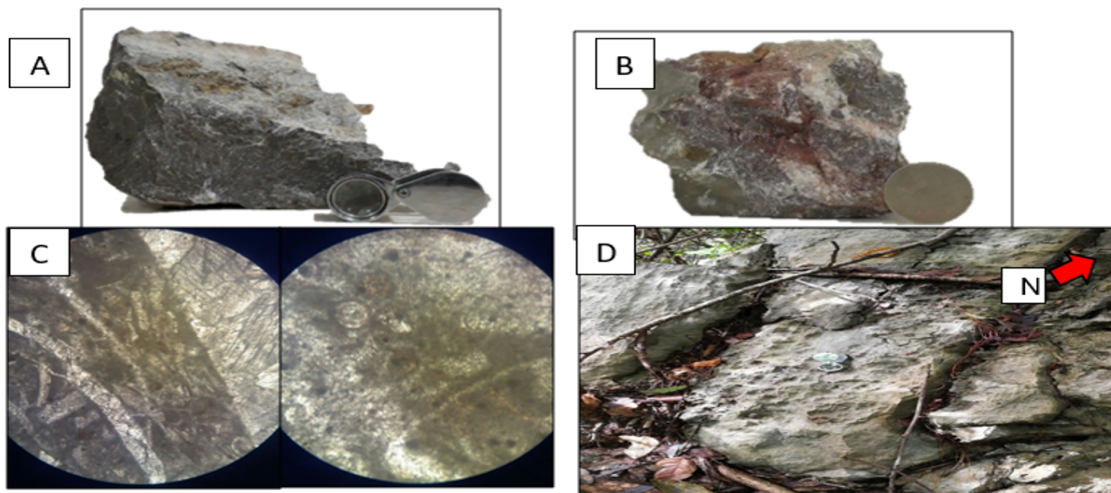


Figura 3. muestras macroscópicas, fotomicrográficas y procesos kársticos del Grupo Cogollo.

Formación La Luna (Ksl): Rollins (1965) [20] describe la Formación La Luna en el departamento de La Guajira como una secuencia de calizas, hacia la base suprayacida por lutitas que finalizan al tope con delgadas capas de conglomerados.

Depósitos Cuaternarios (Qaal): Distribuidos en el 50% del área total de la zona analizada, representados por un abanico aluvial, caracterizado en el ápice o cabeza por grandes cantos, gravas y guijarros, seguido de

la zona intermedia con dominio de materiales de grano más finos tamaño arenas, y la zona distal localizado en Villanueva, con sedimentos limo arcillosos.

Al igual que la Falla La Yaya, el sinclinal El Espíritu se encuentra afectando las litologías pertenecientes al Grupo Cogollo y la Formación La Luna, con una extensión de 1725 metros y con edad según eventos estructurales Cretácica, su presencia se corroboró a partir de datos estructurales tomados en cada flanco del pliegue encontrándose los siguientes datos: N55E /52° SE en el flanco occidental y en el flanco oriental N55°E /44°NW (Figura 4).

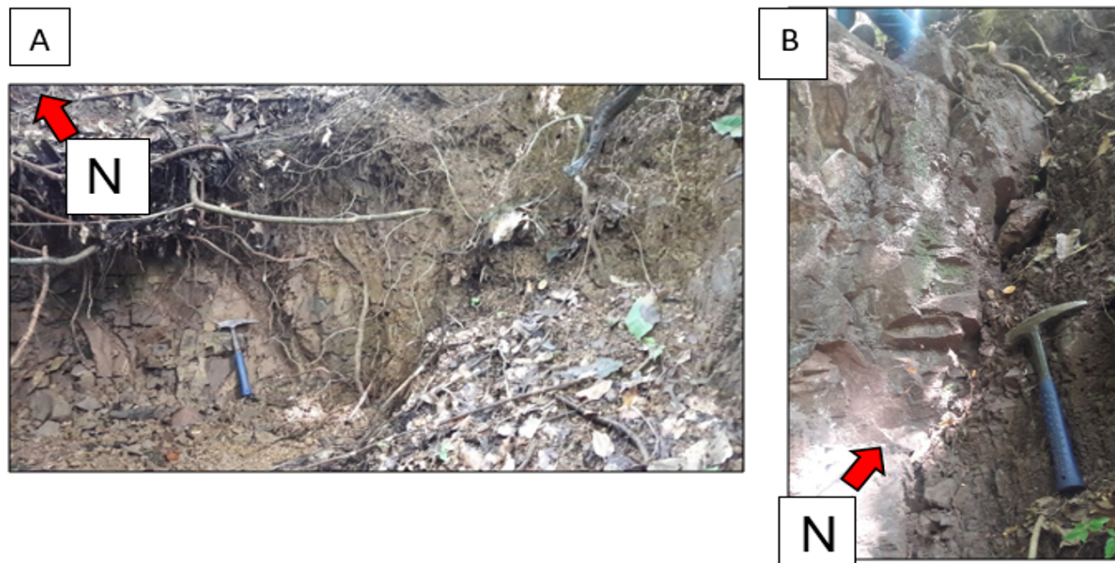


Figura 4. A. Afloramiento donde se evidencia alto grado de fracturamiento por la influencia de la Falla La Yaya sobre el comportamiento mecánico de la roca, su orientación es N29E/33NW. B. Plano de Falla cuyo dato estructural corresponde a N75E/80SE.

Ensayos de permeabilidad y porosidad

Formación La Quinta (JLq): De la Formación La Quinta fue seleccionada un espécimen, petrográficamente corresponde a una limolita con el objeto de evaluar la porosidad y permeabilidad.

Porosidad por Método Gravimétrico

Como primer paso para la implementación del ensayo, se debe preparar la salmuera que va a ser usada en esta prueba y en el test de permeabilidad al líquido, la concentración de cada aditivo se muestra en la Tabla I [21].

Tabla I. Salmuera preparada con un litro de agua.

CONCENTRACIÓN SALMUERA			
Aditivo	PPM	Valor teórico (g)	Valor real (g)
NaCl	10000	10,0000 ± 0,0001	10,0589 ± 0,0001

Realizando un balance de masa teniendo en cuenta que el volumen de los poros es ocupado por el fluido, se obtiene la ecuación 1.

$$V_p = \frac{m_{sat} - m_{seco}}{\rho_l} \quad (1)$$

Donde:

m_{sat} : Masa del núcleo saturado.

m_{seco} : Masa del núcleo seco.

ρ_l : Densidad del líquido con el que se satura la muestra (se asume como 1 g/cm³).

V_p : Volumen Poroso Efectivo.

De esta manera midiendo la masa de la muestra y el núcleo artificial y asumiendo una densidad de 1g/cm³ para el fluido en cuestión se obtiene (Tabla II).

Tabla II. Datos de Porosidad por Gravimetría.

Datos	Valor medido
	Limolita
Peso de muestra seca	(327,5932 ± 0,0001) g
Peso de muestra saturada	(327,5965 ± 0,0001) g
Densidad del fluido de saturación	1 g/cm ³
Volúmen Poroso	(3,003 ± 0,001) cm ³
Porosidad efectiva	3,2%

Medición de permeabilidad al gas (Muestras consolidadas)

Para este ensayo la medición se realiza bajo presión de sobrecarga fija de 300 psig, variando la presión de entrada, el gas usado es Helio con viscosidad igual a 0,0018 cp y la presión barométrica es de 12,34 psia. Los datos de las presiones deben estar en unidades absolutas para poder usar la ecuación 2 [22].

$$k = 491,2 \frac{\mu \cdot L}{A} \cdot \frac{q \cdot p_{atm}}{(p_e^2 - p_s^2)} \quad (2)$$

Dónde:

k : Es la permeabilidad.

μ : Es la viscosidad del gas.

L : Es la longitud de la muestra.

A : Es el área transversal de la muestra.

q : Es el caudal impuesto a la muestra.

P_e y P_s : Son las presiones de entrada y salida respectivamente.

Es necesario realizar la conversión de los datos de presión, por lo tanto, al ΔP medido se le suma 14,7. Las presiones de entrada son 5, 15, 30, 60, 100, 300 psig. Sin embargo, para la muestra el fluido solo fluyó a 300 psig a un caudal de 0,01 cm³/min. Obteniéndose:

$$k[mD] = 491,2 \frac{0,018 * 8,218}{11,401} \cdot \frac{0,01 * 12,34}{(300 + 14,17)^2}$$

$$k[mD] = 0,00000794 = 8 * 10^{-6}$$

De lo anterior y con base en la Tabla III, se infiere que la muestra es poco permeable, que no contiene agua o que contiene poros no intercomunicados, de manera que no es capaz de proporcionar agua por ningún método práctico.

Tabla III. Caracterización de los valores de permeabilidad.

RANGO DE PERMEABILIDAD	CLASIFICACIÓN
K < 1 md	Muy baja
1 md < K < 10 md	Baja
10 md < K < 50 md	Moderada
50 md < K < 250 md	Buena
K > 250 md	Muy buena

Formación Cogollo (Kic): En esta unidad fue seleccionada una roca tipo packstone según Dunham 1962 [14], para realizar ensayos de permeabilidad y porosidad.

Porosidad por Método Gravimétrico

Inicialmente se prepara la salmuera descrita en la tabla 1, se utiliza la ecuación (1), se mide la masa de la muestra y el núcleo artificial [23], y se asume una densidad de 1g/cm³ para el fluido, obteniéndose los valores de la Tabla IV.

Tabla IV. Datos de Porosidad por Gravimetría.

DATOS	VALOR MEDIDO
	CALIZA
Peso de muestra seca	(315,4267 ± 0,0001) g
Peso de muestra saturada	(317,4301 ± 0,0001) g
Densidad del fluido de saturación	1 g/cm ³
Volúmen Poroso	(2,003 ± 0,001) cm ³
Porosidad efectiva	2,2%

Medición de permeabilidad al gas (Muestras consolidadas)

Se realiza bajo una presión de sobrecarga fija de 300 psig, variando la presión de entrada, el gas usado es helio de viscosidad igual a 0,0018 cp. y la presión barométrica es de 12,34 psia. Los datos de las presiones deben estar en unidades absolutas para emplear la ecuación (2). Las presiones de entrada son 5, 15, 30, 60, 100, 300 psig. Sin embargo, para la muestra el fluido solo fluyo a 300 psig a un caudal de 0,01 cm³/min. Obteniéndose:

$$k[mD] = 491,2 \frac{0,018 * 7,848}{11,401} \cdot \frac{0,01 * 12,34}{(300 + 14,17)^2}$$

$$k[mD] = 0,00000758 = 8 * 10^{-6}$$

A partir de lo anterior y teniendo en cuenta la Figura 5, se infiere que la unidad geológica de donde fue extraída la muestra, es poco permeable, que no contiene agua o que contiene poros no intercomunicados, de manera que no es capaz de proporcionar agua por ningún método práctico.



Figura 5. A. Limolita de la Formación La Quinta. B. Caliza del Grupo Cogollo.

Cuaternario

La zona de estudio se encuentra en el ápice del abanico aluvial que conforma la parte sureste del municipio de Villanueva, La Guajira, constituido por clastos de origen terrígeno procedentes de las rocas siliciclasticas de la Formación La Quinta y por aportes de detritos carbonatados del Grupo Cogollo, clasificándose como un suelo areno-gravoso con un porcentaje de retención de 37.83% para arena medias, 33.37% arena fina y 19.02% arena gruesa (Tabla V) (Figura 6).

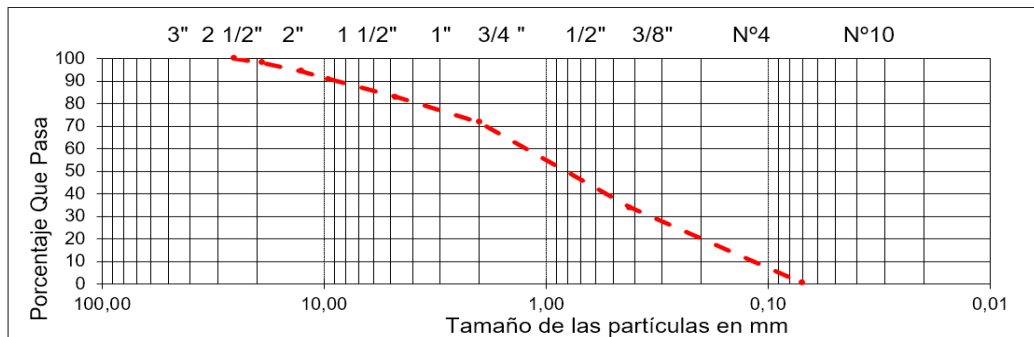


Figura 6. Curva granulométrica

Tabla V. Resultado de Granulometría

P ₁ = 613gr		P ₂ = 611,7 gr	
TAMIZ NO.	PESO RETENIDO (GR)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2 ½"	0	0%	100%
2"	0	0	100
1 ½ "	0	0	100
1"	0	0	100
¾"	10,8	1,76	98,24
½"	23,6	3,85	94,39
3/8"	21,2	3,46	90,93
Nº. 4	48,8	7,96	82,97
Nº. 10	67,8	11,06	71,91
Nº. 40	231,9	37,83	34,08
Nº. 200	204,6	33,37	0,71
P 200	3	0,49	0,22
Σ	611,7gr	99,78 %	-

%Gravas = 9,07%

%Arenas Gruesas=19,02%

%Arenas Medias=37,83%

%Arenas Finas=33,37%

%Limos=0,49%

Los datos de permeabilidad realizados in situ arrojan resultados comprendidos entre 0,2 y 0,3 cm cúbicos por segundo, clasificando al suelo con un coeficiente permeabilidad alto (Figura 7).

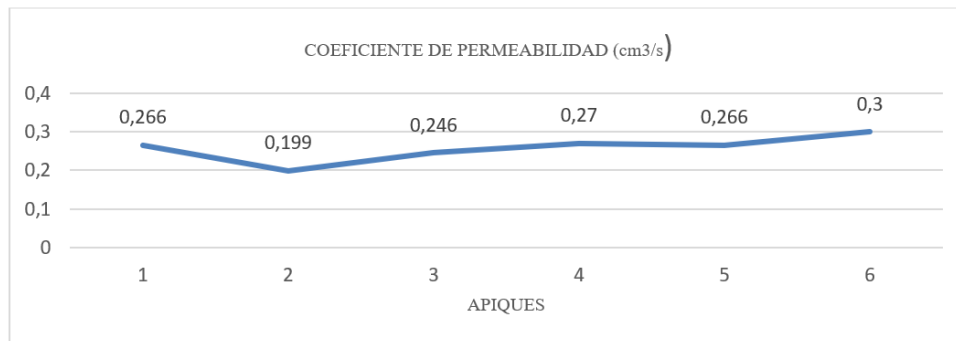


Figura 7. Coeficiente de permeabilidad vs apiques.

Asimismo, con el coeficiente de permeabilidad expresado en la Tabla 6, se obtuvo el valor de la porosidad utilizado por el método gravimétrico cuyos resultados se expresan en la Tabla 7.

Medición de permeabilidad al líquido (Núcleo artificial)

Para obtener la permeabilidad al líquido, el ensayo se realiza bajo presión de sobrecarga fija de 1000 psi, para fines de cálculos se trabaja con la ecuación (3), obteniéndose los valores de la Tabla VI.

Tabla VI. Datos de Permeabilidad al líquido.

P sobrecarga [psi]	Q[cm³/min]	ΔP [psi]	Viscosidad [cp]	K [mD]
1000	2	3,4	1	28

Utilizando la ecuación de ley de Darcy para determinar la permeabilidad absoluta obtenemos que:

$$k[mD] = (2,56) \frac{(\mu[cp].L[cm].q [cm3/ min])}{\Delta P[psi].A[cm^2]} \quad (3)$$

Dónde: K : Es la permeabilidad

μ : Es la viscosidad del fluido.

ΔL : Es la longitud de la muestra.

A : Es el área transversal de la muestra.

q : Es el caudal impuesto a la muestra.

ΔP : Es el cambio de presión.

$$k[mD] = (2,56) \frac{(1 * 5,748 * 2)}{3,4 * 11,401} = 28$$

Así, teniendo en cuenta la Tabla III, se obtuvo una permeabilidad moderada para el suelo.

Porosidad por Método Gravimétrico

Se prepara la salmuera descrita en la tabla 1, se utiliza la ecuación (1), de esta manera midiendo la masa de la muestra y el núcleo artificial y asumiendo una densidad de 1 g/cm^3 [24] para el fluido en cuestión (Tabla VII).

Tabla VII. Datos de Porosidad por Gravimetría.

DATOS	Valor medido
	Suelo
Peso de muestra seca	$(114,0088 \pm 0,0001)$ g
Peso de muestra saturada	$(133,8340 \pm 0,0001)$ g
Densidad del fluido de saturación	1 g/cm^3
Volúmen Poroso	$(19,825 \pm 0,001)$ cm^3
Porosidad efectiva	30,3%

Por otro lado, se calcula el caudal aproximado en uno de los pozos cercanos a la zona de estudio a razón de recuperación de 0.7 litros/segundos y el nivel freático ubicado a 3,77 metros de profundidad, los datos obtenidos permiten deducir que los sedimentos Cuaternarios en el municipio de Villanueva, presentan una alta tasa de captación y transmisión de aguas que podrían ser de origen meteórico y filtrados a través de fracturas o de la porosidad misma del suelo; la zona se encuentra estructuralmente afectada por fallas de rumbo (Falla Cerrejón) y fallas inversas de cabalgamiento (Falla La Yaya) que funcionan como sello en la zona impidiendo el tránsito libre de agua desde las áreas de recarga adyacentes.

Conclusiones

Se identificaron las diferentes unidades litológicas en la zona, siendo la de mayor extensión los sedimentos Cuaternario (abanico aluvial, cauce aluvial, y llanura de inundación), además, la Formación La Quinta, Grupo Cogollo y la Formación La Luna.

La zona está enmarcada en el ápice y la zona proximal del abanico aluvial de Villanueva, con expresiones geomorfológicas y cinemáticas que demuestran la existencia de fallas de cabalgamiento, con presencia del sinclinal El Espíritu constituyéndose en la principal zona de recarga para posibles acuíferos, debido a su extensión y grado fracturamiento que presentan las rocas calizas de tipo wackestone y packstone del Grupo Cogollo, con resultados de permeabilidad y porosidad de $8 \times 10^{-6}\text{ mD}$ y 2.22% respectivamente, indicando

que la transmisibilidad de agua a través de ellas no se realiza por porosidad primaria, si no a través de porosidad secundaria.

Los ensayos de porosidad y permeabilidad realizados en la limolita de la Formación La Quinta, arrojaron resultados de 3,2% y 8×10^{-6} mD, respectivamente, mostrando que la transmisión de agua a través de ella es baja, su poca continuidad lateral, bajos espesor, alto grado de compactación y silicificación la convierten en una unidad con bajo potencial de acuífero.

Los sedimentos Cuaternarios se clasificaron a partir de ensayos de granulométricos, como suelo areno gravoso según la USCS, los ensayos de permeabilidad in situ como en laboratorio los categorizan con un coeficiente de permeabilidad de moderado a alto, con porcentaje de porosidad del 30.3%, esto aunado al caudal aproximado de 0.7 l/s, obtenido en el pozo cercano a la zona, teniendo en cuenta el nivel freático del área, permite deducir un alto grado de potencial como acuífero, siendo afectado únicamente por los sellos estructurales del área como la Fallas Cerrejón, y La Yaya.

Referencias

- [1] J. A. Méndez Sayago and J. M. Méndez Sayago, “Tasas por utilización del agua ¿instrumento de asignación eficiente del agua o mecanismo de financiación de la gestión ambiental?,” *Estud. Gerenciales*, vol. 26, no. 115, pp. 93–115, 2010, doi: [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(10\)70114-5](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(10)70114-5).
- [2] S. V Américo, “Gobernanza multidimensional del agua: la Directiva Marco del Agua europea. Dificultades de su aplicación,” *Econ. Inf.*, vol. 381, pp. 74–90, 2013, doi: [https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(13\)71329-X](https://doi.org/10.1016/S0185-0849(13)71329-X).
- [3] J. Orellana-Salas and T. Lalvay-Portilla, “Uso e importancia de los recursos naturales y su incidencia en el desarrollo turístico. Caso Cantón Chilla, El Oro, Ecuador,” *Rev. Interam. Ambient. y Tur.*, vol. 14, no. 1, pp. 65–79, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-235X2018000100065>.
- [4] O. Rubio et al., “Índice de calidad de Agua (Ica) En La Presa La Boquilla En Chihuahua, México,” *Ecosistemas y Recur. Agropecu.*, vol. 1, no. 2, pp. 139–150, 2014, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000200005%0Ahttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=en%0Ahttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S20
- [5] E. T. Alonso, “Fernando Pérez Correa (coord.), Gestión pública y social del agua en México, México, UNAM, 2014, 154 pp.,” *Estud. Políticos*, vol. 35, pp. 173–176, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.espol.2015.03.001>.
- [6] Naciones Unidas, “Cuestiones sustantivas que se plantean en la aplicación del pacto internacional de derechos económicos, sociales y culturales,” 2003.
- [7] Ó. Torres-Arango, “El agua como elemento fundamental para la vida y el desarrollo sostenible en Colombia,” *Rev. Asun.*, vol. 27, no. 2, pp. 111–119, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Martha-Ortiz/publication/281594148_DIFERENCIA_DESIGUALDAD_Y_PERSISTENCIA

INSTITUCIONAL_EN_MEXICO/links/55ef70bf08ae0af8ee1b24ed/DIFERENCIA-DESIGUALDAD-Y-PERSISTENCIA-INSTITUCIONAL-EN-MEXICO.pdf#page=111

- [8] Global Omnium, “La importancia del agua para el desarrollo sostenible,” 2015. <https://actualidad.globalomnium.com/la-importancia-del-agua-para-el-desarrollo-sostenible/>
- [9] J. Sainz Santamaría and M. Becerra Pérez, “Los conflictos por el agua en México,” *Gac. Ecológica*, vol. 67, pp. 61–67, 2003, [Online]. Available: http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/conf_agua_mex.pdf
- [10] V. Shiva, *Las guerras del agua: contaminación, privatización y negocio*, vol. 200. Icaria Editorial, 2004.
- [11] J. Durán Juárez and A. Torres, “Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media,” *Espiral*, vol. 12, no. 36, pp. 129–162, 2006, [Online]. Available: <https://www.scielo.org.mx/pdf/espiral/v12n36/v12n36a5.pdf>
- [12] A. Fernández-Cirelli, “El agua: un recurso esencial,” *Rev. Química Viva*, vol. 3, pp. 147–170, 2012, doi: 10.48213/travessia.vi81.866.
- [13] S. A. Rotoplas, “Importancia de la calidad del agua: ¿Cómo mejorarla?,” 2021. <https://rotoplascentroamerica.com/importancia-de-la-calidad-del-agua-como-mejorarla/>
- [14] R. J. Dunham, “Clasificación de las rocas de carbonatos de acuerdo con la textura de deposición. en: jamón,” Asociación americana de geólogos de petróleo, 1962.
- [15] R. L. Folk, “Clasificación de las rocas de carbonatos de acuerdo a las proporciones relativas de los tres constituyentes básicos: granos (aloquímicos), matriz micrítica y cemento, esparítico (ortoquímicos),” 1962.
- [16] R. L. Folk, *Petrologie of sedimentary rocks*. 1974.
- [17] L. González de Vallejo, *Ingeniería geológica*. Madrid (España), 2002. [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro_2.pdf
- [18] E. Kündig, “The Precretaceous rocks of the central Venezuelan Andes with some remarks about the tectonics,” *Bol. Geol. y Minería*, vol. 2, 3, 4, pp. 21–43, 1938.
- [19] L. Radelli, “Introducción al estudio de la geología y de la petrografía del Macizo de Santa Marta (Magdalena-Colombia),” *Geol. Colomb.*, vol. 2, no. 0 SE-Artículos, pp. 41–115, May 1962, [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30349>
- [20] J. F. Rollins, *Stratigraphy and Structure of the Goajira Peninsula, Northwestern Venezuela and Northeastern Colombia*. The University of Nebraska, 1965. [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/univstudiespapers.https://digitalcommons.unl.edu/univstudiespapers/76>

- [21] S. H. Lopera, “Notas Analisis Petrofísicos Basicos y Especiales,” *Univ. Nac. Colomb. Sede Medellín*, 2007.
- [22] N. Marquardt, “Introduction to the principles of vacuum physics,” 1999.
- [23] T. Smithson, “Como se mide la porosidad,” *Oilf. Rev.*, vol. 24, pp. 65–66, 2012.
- [24] R. Nolen-Hoeksema, “El Flujo De Fluidos A Través De Los Poros,” *Oilf. Rev.*, vol. 26, pp. 68–70, 2014.