

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JÍMENEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

*Tesis presentada en opción al título
de
Ingeniera Geóloga*

*Evaluación de las reservas de agua subterránea en el
área la Ceiba-Certeneja de Güirabo, Holguín.*

Autora: Sixta Beatriz Núñez Revé.

Tutores: Ing. Marianela Crespo Lambert

MSc. Jorge Luis Blanco Blázquez

MSc. Juan Carlos Collazo

Cotutor: MSc. Yurisley Valdéz Mariño

Moa, 2019

Año 61 de la Revolución

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a toda a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido a mi formación como profesional, pero en especial a mi abuelita Lourdes Lantigua que siempre conté con su apoyo y amor, y aunque no se encuentre presenciando mi logro, todo mi triunfo lo dedico a ella.

A mis padres, Ridel y Nidia por aconsejarme y darme ánimos en todo momento para que yo llegara a cumplir mi meta.

A mis hermanitos Melani Batista Revé y Rubén Alejandro Núñez Magaña.

A mi novio Carlos Alberto Matos Pérez por saber comprenderme y aconsejarme en los momentos más difíciles.

A mis tías, tíos, primos, a toda mi familia.

A mis compañeros de clases y a esas amistades de toda la vida que a pesar de la distancia siempre han confiado en mí.

Agradecimientos

Cuando me puse a pensar en las personas a quienes deseaba expresar mi agradecimiento por su ayuda, sugerencias y esfuerzo en la creación de esta tesis, me salió una lista inacabable.

Ante todo, le agradezco a Dios por permitirme llegar a formar parte de esta gran familia de Ingenieros geólogos.

A mis padres Ridel Núñez Lantigua y Nidia Revé Roble por sus consejos diarios, su apoyo, su amor, por saber sacarme de esos momentos en los que pensé que no tenía salida y ellos me recordaron que sí, que no existe nada imposible solo debes proponerte una meta para lograr todo lo que quieras en tu vida.

A mi tutora Ing. Marianela Crespo Lambert por brindarme su tiempo y conocimientos en los momentos que la necesité, además de ser una amiga para mi durante todo el transcurso por la universidad.

A mis tutores MSc. Jorge Luis Blanco Blázquez y Yurisley Valdés Mariño por sus conocimientos y consejos brindados durante este período.

A todo el colectivo de RAUDAL por acogerme en su entidad y apoyarme en todo lo necesario, pero en especial al MSc. Juan Carlos Collazo por su tiempo y conocimientos brindados en beneficio de la realización de este trabajo.

A mi “Puchito” por saber comprenderme y aconsejarme en circunstancias difíciles y también ser partícipe de los buenos momentos.

A mi “ñuñu” que a pesar de ser tan pequeña siempre estuvo conmigo llorando mis derrotas y celebrando las batallas vencidas.

A todos mis familiares entre tías, tíos, primos y en especial a mi prima Anieska Pérez Revé por comportarse como una gran amiga y apoyarme siempre que lo necesité.

A mi compañera y amiga Lisandra Quevedo Guerra por saber alentarme en los momentos que más lo necesitaba y siempre creer en mí.

A todos mis compañeros de clases de con los cuales he compartido estos cinco años de carrera universitaria por todos los buenos y malos momentos que pasamos juntos.

Al claustro de profesores del Departamento de Geología por su dedicación y amor en estos 5 años.

Pensamiento

“Estamos hechos para conquistar entornos, resolver problemas, alcanzar metas, y no encontramos ninguna satisfacción real o felicidad en la vida sin obstáculos que conquistar y objetivos que alcanzar.”



Maxwell Maltz

RESUMEN

El agua es fundamental en el sustento de la vida y el equilibrio ecológico en todo el planeta, e indispensable en la producción de alimentos, abastecimiento de agua potable a la población y a las industrias. Por tal motivo surge esta investigación, con el objetivo de evaluar las reservas de las aguas subterráneas en el área La Ceiba-Certeneja de Güirabo, para abastecer a la Fábrica de Cerveza Bucanero S.A. Mediante la implementación de los métodos: hidrodinámico y de balance, además de analizarse la calidad de las aguas a través de la norma cubana NC 827 2017. Como conclusiones se obtuvo que las aguas varían su profundidad entre 5 y 20 metros, con movimiento tendencialmente hacia las zonas afectadas por las fallas en la zona norte y direcciones de noreste a suroeste en el miembro Pedernales y en la formación Camazán de norte a sur, existe una correspondencia entre el relieve y las cotas de nivel de las aguas. Estas aguas se clasifican como aguas hidrocarbonatadas – clóricas – sódicas – magnésicas y poseen mineralizaciones que oscilan de 0,6 mg/L a 3,8 mg/L. Las reservas de explotación calculadas poseen un caudal de 20 L/s, la cual satisface la demanda requerida para abastecer a la Fábrica de Cerveza Bucaneros S.A., que históricamente se encuentra entre los 20 L/s y 30 L/s.

ABSTRACT

Water is fundamental in the sustenance of life and ecological balance throughout the planet, and essential in the production of food, drinking water supply to the population and industries. For this reason this investigation arises, with the objective of evaluating the reserves of groundwater in the La Ceiba-Certeneja area of Güirabo, to supply the Bucanero Beer Factory S.A. Through the implementation of the methods: hydrodynamic and balance, in addition to analyzing the quality of the waters through the Cuban standard NC 827 2017. As conclusions, it was obtained that the waters vary in depth between 5 and 20 meters, with movement toward the zones affected by the faults in the north zone and directions from northeast to southwest in the Pedernales member and in the Camazán formation from north to south, there is a correspondence between the relief and the level of the waters. These waters are classified as hydrocarbonated - chloric - sodium - magnesium waters and have mineralizations ranging from 0.6 mg / L to 3.8 mg / L. The exploitation reserves calculated have a flow of 20 L / s, which satisfies the demand required to supply the Bucaneros Beer Factory S.A., which historically is between 20 L / s and 30 L / s.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO - GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES Y PARTICULARES DEL ÁREA DE ESTUDIO	12
1.1 Introducción	12
1.2 Ubicación geográfica	12
1.3 Poblaciones y redes de comunicaciones	13
1.4. Desarrollo industrial y agrícola	13
1.5 Clima	13
1.5.1 Temperatura.....	14
1.5.2 Humedad	14
1.5.3 Evaporación	14
1.5.4 Vientos	14
1.6 Vegetación	14
1.7 Orografía y red hidrográfica	15
1.8 Geología y estratigrafía local	16
1.9 Tectónica regional y local	18
1.10 Características hidrogeológicas regionales y locales	21
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS	24
2.1 Introducción	24
2.2 Etapa I	25
2.3 Etapa II	25
2.3.1 Levantamiento hidrogeológico a escala 1: 25 000	25
2.3.2 Muestreo hidroquímico	25

2.3.3 Puntos de muestreo	26
2.4 Técnicas empleadas para las tomas de muestras de agua en los puntos muestreados	26
2.5 Trabajos de perforación	26
2.6 Trabajos geofísicos	29
2.7 Trabajos hidrogeológicos	29
2.8 Trabajos de laboratorio	30
2.9 Análisis y procesamiento de la información	32
2.10 Metodología para la interpretación de los análisis físicos, químicos y bacteriológicos.	32
2.11 Metodología para la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas por el método hidrodinámico.....	34
2.12 Metodología para la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas por el método de balance.....	35
CAPÍTULO III: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS TRABAJOS HIDROGEOLÓGICOS	37
3.1 Introducción	37
3.2 Descripción de los puntos de muestreo.....	37
3.3 Descripción de las calas perforadas.....	44
3.4 Caracterización del régimen y movimiento de las aguas subterráneas	54
3.4.1 Profundidad de yacencia de las aguas subterráneas en la zona de estudio.....	54
3.4.2 Fronteras hidrogeológicas.....	55
3.4.2 Fuente de alimentación y potencia acuífera.....	56
3.4.3 Dirección del flujo.....	57
3.5 Análisis de las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas de las	

aguas subterráneas	58
3.5.1 Mineralización (mg/L).....	58
3.5.2 Conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$).....	59
3.5.3 Dureza Total (mg.eqv/L).....	60
3.5.4 Nitrito (NO_2^-) mg/L.....	61
3.5.5 Nitrato (NO_3^-) mg/L.....	62
3.5.6 pH.....	62
3.5.7 Sulfato (SO_4^{2-}) (mg/L).....	63
3.5.8 Turbidez (NTU).....	64
3.5.9 Carbonatos (CO_3^{2-}) e Hidrocarbonatos (HCO_3^-) (mg/L).....	65
3.5.10 Concentración de Calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+}), (mg/L).....	66
3.5.11 Concentración de Sodio (Na^{2+} , mg/L) y Cloruros (Cl^- , mg/L).....	67
3.5.11 Coliformes totales y coliformes termotolerantes.....	67
3.5.12 Métodos para el tratamiento de aguas.....	68
3.6 Evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas del área La Ceiba-Certeneja de Güirabo, Holguín	70
3.6.1 Fundamentación del cálculo de reservas de aguas subterráneas.....	70
3.6.2 Cálculo de reservas de aguas subterráneas por el método hidrodinámico.....	71
3.6.3 Cálculo de reservas de aguas subterráneas por el método de balance.....	73
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88

INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental en el sustento de la vida y el equilibrio ecológico en todo el planeta, es indispensables en la producción de alimentos, abastecimiento de agua potable a la población y a las industrias. En el presente, el déficit de este preciado líquido constituye una de las problemáticas más preocupantes en la sociedad a nivel mundial, pues la escasez de agua para el abastecimiento a la población y las industrias, forma parte de la demanda continuamente creciente del empleo de este fluido. Por lo cual, ese incremento de las necesidades de recursos hídricos ha sido controlado mediante el uso de las reservas de aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas constituyen la mayor reserva de agua dulce del mundo, y representan más del 97 % del total de agua dulce disponible en el planeta, excluyendo los glaciares y los casquetes polares. El 3 % restante corresponde esencialmente a las aguas superficiales, lagos, ríos, humedales y a la humedad del suelo (Herraíz L, 2009) citado por (Silot Ochoa, 2017).

En nuestro país el potencial hídrico asciende a 38,1 km³, de los cuales 31,6 km³ (83 %) corresponden a las aguas superficiales y 6,5 km³ (17 %) a las aguas subterráneas. De este potencial solo son aprovechables 24 km³ y de ellos están disponibles 13,6 km³, con una mayor incidencia en las aguas superficiales (67 %), (García Hernández, 2007) citado por (Díaz Duque, 2018).

Son diversos los factores de carácter natural que inciden en la escasez de agua en el país, entre ellos se encuentran su carácter insular, la disposición y estructura del relieve, la extensión del carso, el predominio de ríos de pequeña longitud (menores de 40 km) y cuencas hidrográficas con menos de 200 km² de superficie. Las principales reservas de aguas subterráneas de Cuba están asociadas a las rocas miocénicas, las que se caracterizan por su elevada capacidad acuífera. En gran medida estas rocas se corresponden con rocas carbonatadas, carsificadas y con un alto grado de acuosidad; en menor cuantía se encuentran representados los complejos de rocas vulcanógenas y ultrabásicas (Díaz Duque, 2018).

Las cuencas subterráneas cubanas en su mayoría son cársticas, libres y abiertas al mar, siendo su fuente de alimentación las precipitaciones pluviales, lo que indica la importancia de la correcta explotación y observación sistemática del régimen de las aguas.

Como consecuencia del acelerado aumento demográfico y el desarrollo de las industrias, así como el impacto del cambio climático sobre las aguas superficiales y subterráneas, nuestro país implementa el Plan de Estado “Tarea Vida”, para el enfrentamiento al cambio climático. Conformada por 5 acciones estratégicas y 11 tareas, de las cuales en la presente investigación responde a la tarea 4, al asegurar la disponibilidad y uso eficiente del agua como parte del enfrentamiento a la sequía y la tarea 9. Fortalecer los sistemas de monitoreo, vigilancia y alerta temprana para evaluar sistemáticamente el estado y calidad del agua.

Producto de las intensas sequías en los últimos años hasta la actualidad, en la ciudad de Holguín se han visto notablemente afectados, los recursos y reservas de agua subterránea, lo cual provoca el descenso de sus niveles hasta un estado crítico, el deterioro de la calidad de las aguas y una disminución severa de las entregas del líquido a la población y a el renglón económico.

Debido a las intensas sequías como resultado del cambio climático, el municipio de Holguín, presenta dificultades en el abastecimiento de agua a la población e industrias. Una de las industrias afectadas es la fábrica de Cerveza Bucanero S.A que, a partir de la intensa sequía afrontada en el 2015, provocó que los pozos que la abastecen sufrieran cambios en su caudal, lo cual propició que no se contara con los volúmenes de agua requeridos para satisfacer la demanda.

A partir del déficit de agua para la producción de la industria surge la investigación titulada: **“Evaluación de las reservas de agua subterránea en el área La Ceiba-Certeneja de Güirabo, Holguín”**, que a su vez define como **problema científico** la siguiente interrogante: ¿Serán las aguas subterráneas del área La Ceiba-Certeneja de Güirabo perspectivas para satisfacer las demandas de agua de la Fábrica de Cerveza Bucaneros S.A?

Objeto de estudio: las aguas subterráneas en el área La Ceiba-Certeneja de Güirabo.

Campo de acción: las reservas de agua subterránea en el área La Ceiba-Certeneja de Güirabo.

Objetivo general: evaluar las reservas de las aguas subterráneas en el área La Ceiba-Certeneja de Güirabo, para abastecer a la Fábrica de Cerveza Bucanero S.A.

Hipótesis: Si se evalúan las reservas de aguas subterráneas del área La Ceiba-Certeneja de Güirabo, se podrá conocer si el acuífero satisface la demanda de la Fábrica de Cerveza Bucanero S.A.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el régimen y movimiento de las aguas subterráneas.
2. Evaluar las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas de las aguas subterráneas.
3. Determinar las reservas de aguas subterráneas por el método hidrodinámico y método de balance.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Hidrogeología

Es la ciencia encargada del estudio de las aguas subterráneas que a su vez estudia su origen, distribución, formación, las formas de yacencia, su difusión, movimiento, su interacción con los suelos, rocas y humedales, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y las propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas) así como las condiciones que determinan las medidas para su aprovechamiento, regulación y evacuación. Incluye el ciclo hidrológico, los recursos hídricos y la sostenibilidad ambiental de cuencas hidrográficas (Mijailov, 1985).

Agua subterránea

El agua subterránea es la que se encuentra bajo la superficie terrestre y ocupa los poros y las fisuras de las rocas más sólidas. Mantiene una temperatura muy similar al promedio anual en la zona, por ello, en las regiones árticas, puede helarse.

Acuíferos

Capaces de almacenar y transmitir el agua (gravas, arenas, calizas, etc.). Son formaciones con capacidad de drenaje alta, en las que se pueden perforar pozos y sondeos, con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento, agricultura, industria, ganadería, etc. (Rodríguez Elías, 2012).

Acuitardos

Capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.) y su capacidad de drenaje es de media a baja; no son de interés para obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel muy importante como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies (Rodríguez Elías, 2012).

Acuicludos

Pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.). En hidrogeología se asumen como impermeables (Rodríguez Elías, 2012).

Acuífugos (hidrófugas)

Formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por rocas compactas como granitos, gneises, y a veces incluso calizas muy compactas si carsifican; se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que puedan permitir flujos (Rodríguez Elías, 2012).

Circulación subterránea

Es la circulación del agua por debajo de la superficie. Se produce a favor de la gravedad, como la escorrentía superficial, de la que se puede considerar una versión. Se presenta en dos modalidades:

- Primero, la que se da en la zona vadosa, especialmente en rocas carsificadas, como son a menudo las calizas, la cual es una circulación siempre cuesta abajo.
- Segundo, la que ocurre en los acuíferos en forma de agua intersticial que llena los poros de una roca permeable, de la cual puede incluso remontar por fenómenos en los que intervienen la presión y la capilaridad (Rodríguez Elías, 2012).

Calidad del agua

La calidad del recurso se define como la capacidad intrínseca del agua para responder a los usos que se podrían obtener de ella, incide de manera directa en la salud tanto de los ecosistemas que habitan en esta como en el bienestar del ser humano, de la calidad del recurso depende tanto la biodiversidad como la calidad de los alimentos, la salud humana y las actividades económicas (Sánchez, 2018).

Agua potable

El producto generado a partir del proceso de potabilización que se realiza al agua dulce y queda óptima para el consumo humano se conoce como agua potable, permite ser consumida sin condicionamientos de ningún tipo porque está garantizado que por su condición y tratamiento no presentará efectos negativos en el organismo humano (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2018).

Reservas de aguas subterráneas

Las reservas de aguas subterráneas, como su nombre indica, están bajo tierra y, concretamente, son las que incluyen a las masas de agua dulce que se encuentran en el espacio poroso de suelos y rocas. También incluyen el agua de los acuíferos bajo el nivel freático. En ocasiones, este tipo de aguas subterráneas, como el agua de los acuíferos, se llama agua fósil y hay que diferenciarla bien de las aguas hiporréicas, pues no son exactamente lo mismo (Sánchez, 2018).

Reservas naturales

Es el volumen de agua gravitacional que se encuentra en los poros, grietas y cavidades cársticas de las rocas acuíferas en condiciones naturales. (De Miguel Fernández, 2012).

Recursos de aguas subterráneas

Son aquellos cuerpos de agua que presentan un valor determinado. Los mismos se pueden encontrar de forma natural o artificial.

Recursos naturales

Es la suma de todos los elementos que forman la alimentación natural de un acuífero determinado (infiltración de las precipitaciones atmosféricas, infiltración de aguas superficiales de ríos y lagos, desbordamiento de horizontes acuíferos aledaños al de análisis). Estos recursos pueden ser determinados por la magnitud del caudal del flujo de las aguas subterráneas, o por la suma de los caudales de los distintos elementos (De Miguel Fernández, 2012).

Zonas de descarga

Una zona de descarga es la evidencia más viable de identificar el funcionamiento del agua subterránea, es el sitio donde el agua aflora (superficie) y representa la fase final de recorrido del flujo subterráneo; así, el agua ha adquirido propiedades particulares (salinidad, temperatura, pH, entre otros) tiene una continuidad específica de caudal en el tiempo. La descarga de agua subterránea ocurre a una elevación topográfica más baja que donde se origina la recarga (Peñuela Arévalo y Carrillo Rivera, 2013).

Zona de recarga

Para que exista una zona de recarga su primer indicador está asociado con la conductividad hidráulica de la roca, la cual puede permitir la infiltración del agua de lluvia; un segundo es que tal roca se localice en una elevación topográficamente alta. En la zona de recarga el nivel freático se encuentra profundo, el suelo es ácido y poco desarrollado con poca cantidad de materia orgánica, baja concentración de sodio y/o sales (Peñuela Arévalo y Carrillo Rivera, 2013).

Trabajos realizados en el Mundo y Cuba sobre el cálculo de reservas de aguas subterráneas

(Rodolfo, Ib y Manrique, 2011) en este trabajo presenta un análisis sobre la aplicación del cálculo de la recarga en un área de 105 km² con resultados satisfactorios, el mismo se desarrolla en Guatemala. Sobre la base de que el 15 % de la superficie está integrada por áreas de características semiáridas en las que el conocimiento cualitativo y cuantitativo del recurso hídrico subterráneo resulta de vital importancia. A pesar, de que la mayor parte de los procesos y mecanismos de la recarga en los acuíferos son relativamente bien conocidos y la obtención de una estimación fiable de la magnitud de la recarga natural presenta dificultades. Ellas están definidas en la variabilidad espacial de los factores que determinan las condiciones climáticas y especialmente la ocurrencia, magnitud y calidad de la recarga. Debido a ello, la mayoría de los métodos existentes para la estimación de la recarga generan resultados con un alto índice de incertidumbre.

(Del Toro Guerrero, Hinojosa Corona y Kretzschmar, 2014) el trabajo de investigación se efectuó en la subcuenca El Mogor en el Valle de Guadalupe (VG) en Baja California, México. En el mismo se realiza una caracterización integral, con el objetivo de cuantificar el aporte hidrogeológico de la subcuenca hacia el valle en el año hidrológico de 2010- 2011. Como parte de la caracterización, se estableció la conductividad hidráulica no saturada mediante la ecuación de Kozeny-Carman (KC). Se estimó un balance hídrico, con los que se obtuvo una infiltración potencial (I) en la subcuenca de 974 000 m³ y un escurrimiento (Es) de 86 000 m³. Asimismo, se calculó de forma directa el escurrimiento superficial mediante el uso de un vertedor triangular de pared delgada con el que se estimó un volumen de 60 000 m³. Finalmente, mediante fórmulas empíricas, se calculó una recarga (vertical, de sistema montañoso, horizontal y por percolación por agua de riego) de 466 000 m³, que fue equivalente al 7 % de la precipitación infiltrable en el año hidrológico en estudio.

(D'Elia, Paris y Pérez, 2018) exponen el resultado del balance de agua que ingresa y egresa de los acuíferos en un área de llanura del centro de la Provincia de Santa Fe (Argentina) y la identificación preliminar de algunos ecosistemas dependientes del agua subterránea. Para estimar la recarga local del acuífero libre se utilizaron diferentes metodologías, mientras que la descarga del acuífero se evaluó a partir de la continuidad entre dos secciones del río Salado. La demanda de agua subterránea para distintos usos fue estimada a partir de datos oficiales de los censos poblacionales, económicos y agropecuarios. La identificación de los ecosistemas dependientes del agua subterránea se realizó por medio de muestreos de agua y análisis en laboratorio y análisis de imágenes satelitales. Los resultados muestran que anualmente la recarga local del acuífero libre es del orden de 21 Hm³, la recarga local del acuífero semiconfinado es del orden de los 4 Hm³ y la descarga al río Salado del orden de 18 Hm³. La demanda de uso ganadero es del orden de 2 Hm³ y el consumo humano en áreas urbanas de 14 Hm³. No se contó con datos oficiales de uso de agua para fines industrial e irrigación.

(Calvete Samper, 2018) realizó una evaluación de las extracciones de agua

subterránea mediante balances hídrico, la ecuación de balance resulta de imponer el principio de conservación de la masa, por el cual el balance neto de entradas y salidas de agua entre dos fechas determinadas debe coincidir con la variación de masa almacenada en el acuífero. Producto a que, la componente recarga presenta dificultades y presenta incertidumbres considerables entonces la estimación de las extracciones puede contener una elevada incertidumbre. Dicha incertidumbre, se puede reducir si se dispone de una adecuada caracterización hidrogeológica de la zona y de datos históricos sobre la evolución hidrodinámica e hidroquímica del sistema durante la fase de explotación de sus recursos subterráneos. Este método tiene mayor fiabilidad en acuíferos en los que el régimen de explotación provoca de forma simultánea una disminución de las descargas comparable a la disminución de las reservas.

En Cuba (Teruel García, 2005) plantea la necesidad de evaluar las reservas de aguas subterráneas del sector Managua – El Aserrío, para abastecer a la fábrica de Cerveza Bucanero S.A, debido a que las fuentes que la abastecen se encuentran en estado de sequía. Por lo cual se requiere la búsqueda de nuevos yacimientos de aguas subterráneas para la construcción de pozos de explotación alternativos que solucionen dicho problema. Se realiza una evaluación de las condiciones hidrogeológicas del sector de estudio, así como la identificación de las posibles áreas perspectivas a través de la combinación de los métodos propios de la hidrogeología, apoyadas en técnicas geofísicas. Mediante la perforación de 11 calas de estudio se determinó el nivel freático, los valores de transmisividad, la composición química de las de aguas subterráneas, y se determina que es posible cubrir satisfactoriamente en calidad y cantidad la demanda de agua que necesita la industria (25 L/s).

(Fernández-Miguel y Vázquez-Taset, 2006) exponen los principales factores de origen antrópico, geológico y climático que pueden originar contaminación por nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) en las condiciones de Cuba. Se analiza la contaminación por estos compuestos nitrogenados en territorios del Sur del Valle del Cauto y la provincia Holguín. Se concluye que, en las condiciones de Cuba, la contaminación por nitratos y nitritos puede considerarse alarmante, atendiendo al

grado de desarrollo actual y a su posible incidencia sobre la salud de la población, evaluada de forma cualitativa. Finalmente se recomiendan una serie de medidas para detallar las causas principales de la contaminación y como erradicarlas.

(Del Toro Sánchez, 2009) realiza la evaluación cuantitativa de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca hidrográfica Sagua La Grande con el fin de lograr una satisfacción de las demandas de la producción y los servicios de manera sostenida, con el mínimo deterioro ambiental para el desarrollo agrícola, industrial y socio-económico del territorio, a partir de la información del Instituto Nacional De Recursos Hídricos (INRH) y otros organismos. Se describen las condiciones geológicas e hidrogeológicas del área y se realizó la regionalización hidrogeológica en la cuenca. Mediante el método de balance de las aguas subterráneas en sus tres principales variantes, se calculó los recursos naturales y explotables de las aguas subterráneas en cada tramo hidrogeológico.

(Hernández Valdés, 2011) alerta sobre la imprecisión de los métodos convencionales para evaluar recursos en acuíferos y por ende su inadecuado manejo. También se muestra el empleo de herramientas novedosas como la modelación matemática para realizar dicha evaluación y al mismo tiempo, apoyada en ella, mejorar los planes de asignación de dichos recursos con diferentes horizontes de planeamiento y aplicar políticas de explotación óptima. Se ilustra un procedimiento para evaluar recursos con la utilización la tecnología AQÜIMPE, que se desarrolla en Cuba y se aplica en algunos acuíferos cubanos, no solo para el manejo de recursos, sino también para evaluar la respuesta del acuífero ante las distintas obras de ingeniería.

((RAUDAL), 2012) evalúa los recursos de aguas subterráneas existentes en los sectores Cuentas Claras y Cayo Redondo, con el propósito de abastecer a la ciudad de Manzanillo y sus alrededores. La demanda de agua requerida es de 700,0 L/s para abastecer a 140 348 habitantes para el 2030. Se evalúan las condiciones hidrogeológicas imperantes en el sector de estudio y de esa forma dar una respuesta rápida y concisa a la demanda de agua que se necesita para abastecer a la ciudad de Manzanillo en el tiempo requerido. A través del uso de los

modelos matemáticos (programa AQÜIMPE) en combinación con los cálculos hidrogeológicos que se realizaron por los métodos hidrodinámico y de balance además de la complementación de las 32 calas perforadas concluyeron que si era posible abastecer a la ciudad de Manzanillo con el volumen y la calidad química y bacteriológica requerida, para el 2030.

((RAUDAL), 2014) evalúa la factibilidad de las aguas para consumo humano, a partir del análisis minucioso del muestreo hidroquímico en el sector de estudio. Tiene como finalidad determinar la calidad de las aguas. El acuífero se caracterizó por la presencia de manantiales con agua hidrocarbonatada-cálcica con mineralización de 1,5 g/L y caudal de 259,2 m³/día, las cuales se determinaron como aptas para el consumo humano.

(Suárez Pecosó, 2015) realiza un estudio de los elementos monitoreados durante el proceso de Balance de Agua que inciden directamente en los volúmenes de los Recursos Hídricos Disponibles en el sector hidrogeológico VC-I-1A , a partir de la información brindada por la Delegación y la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico del INRH en Villa Clara. Se realizó el análisis estadístico de las variables lluvia, nivel estático y entregas a los diferentes usuarios, lo que permitió obtener un algoritmo de trabajo que permite realizar la determinación del Recurso Hídrico Disponible en el sector de forma operativa y lo más cercano posible a los valores reales.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO - GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES Y PARTICULARES DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Introducción

En este capítulo, se describen las características físico-geográficas, rasgos geológicos de la región y el área de estudio.

1.2 Ubicación geográfica

El área de estudio se encuentra ubicada al oeste de la ciudad de Holguín, limita al Norte con el Cruce el Coco y la Yaba, al Sur con el poblado Certeneja de Güirabo, al Este con la parte occidental de la presa de Güirabo y al Oeste con toda la línea desde la Ceiba a Tomí Uno y Aserrío de Yareyal. El área está enmarcada dentro de las coordenadas: X_{mín}: 534 400; Y_{mín}: 232 800 y X_{máx}: 561 400; Y_{máx}: 251 600, con un área total de 507,6 km² (ver Figura 1).

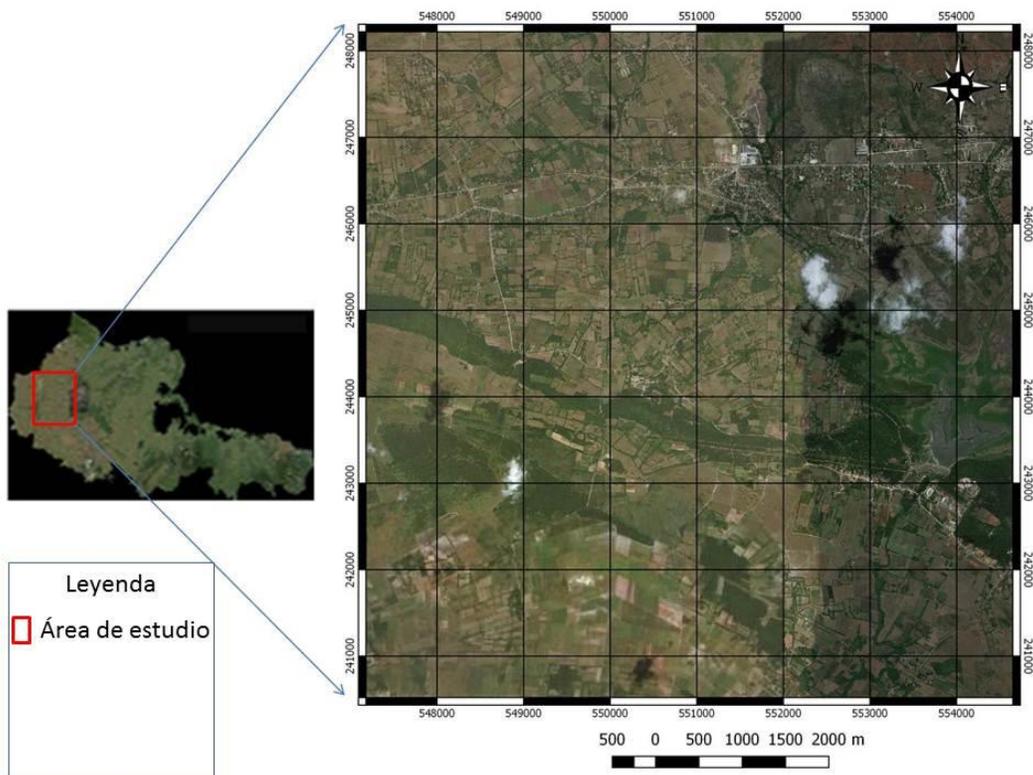


Figura 1. Ubicación del área de estudio, escala 1:50 000.

1.3 Poblaciones y redes de comunicaciones

Los poblados más cercanos al área investigada son la ciudad de Holguín se encuentra aproximadamente a 11 km con acceso a través de la carretera central. El poblado de San Andrés a unos 11 km de la zona de los trabajos, la comunicación con el mismo es a través de caminos y terraplenes. Mientras que el poblado Antonio Maceo está a una distancia aproximada de 8 km del borde sur de la zona y su comunicación es a través de una carretera que se encuentra en regular estado y a unos 4 km del área de estudio el poblado el Coco.

La zona tiene buenas vías de comunicación. La principal es la carretera central al norte de la zona que está en buen estado, así como una red de terraplenes y caminos en condiciones regulares, pero que permiten la circulación normal en época de seca, no así en época de lluvia, donde debe usarse la doble tracción.

1.4. Desarrollo industrial y agrícola

Las localidades próximas al área de estudio, depende fundamentalmente de la agricultura y la ganadería, donde predomina el cultivo de la caña de azúcar y la cría de ganado vacuno y granjas avícolas.

1.5 Clima

El clima de la provincia de Holguín es tropical húmedo, típico de sabana, con verano caluroso y húmedo presenta dos períodos bien definidos, uno de lluvia y otro de menos precipitaciones: el primero se extiende de mayo a octubre. El segundo, denominado de menos lluvia va de noviembre hasta abril con un mes más seco, febrero; además podemos agregar que las precipitaciones varían del interior a la costa y de oeste a este en todo el territorio de la provincia (Holguín, 2019).

Las precipitaciones presentan un valor anual que oscila entre 452,50 - 1712,60 mm (milímetros) para un promedio de 846, 01mm, registrado en los ultimo 10 años. El pluviómetro utilizado para analizar el comportamiento de las precipitaciones en el periodo investigado es el 817, se ubica en el sector de estudio.

1.5.1 Temperatura

Durante el transcurso del año, la temperatura como promedio varía de 19 °C a 33 °C y rara vez baja a menos de 16 °C o sube a más de 34 °C (Weather Spark, 2018).

1.5.2 Humedad

En Holguín la humedad percibida varía extremadamente. El período más húmedo del año dura 9,5 meses, desde finales de marzo hasta inicios de enero. El día más húmedo del año es el 9 de septiembre, con humedad el 98 % del tiempo. El día menos húmedo del año es el 26 de febrero, con condiciones húmedas el 43 % del tiempo (Weather Spark, 2018).

1.5.3 Evaporación

La evaporación media anual es de 2 311 mm, se obtiene este valor con 17 años de observación (Batista J.C; 2000) citado por (Teruel García, 2005).

1.5.4 Vientos

La velocidad promedio del viento por hora en Holguín tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 6,6 meses, del 30 de octubre al 16 de mayo, con velocidades promedio del viento de más de 15,1 Km/h. El día más ventoso del año es el 26 de noviembre, con una velocidad promedio del viento de 17,3 Km/h.

El tiempo más calmado del año dura 5,4 meses, del 16 de mayo al 30 de octubre. El día más calmado del año es el 30 de septiembre, con una velocidad promedio del viento de 12,8 kilómetros por hora (Weather Spark, 2018).

1.6 Vegetación

La vegetación está en relación con el clima y la acción antropogénica. Se caracteriza por ser poco abundante, predominan las plantaciones de caña de azúcar, cultivos menores, zonas de sabanas y hierbazales dedicadas al pastoreo, y algunos bosques aislados en las márgenes de los ríos y arroyos. (Batista J.C; 2000) citado por (Teruel García, 2005).

1.7 Orografía y red hidrográfica

El relieve es predominantemente colinoso hacia el norte, y llano ha ligeramente ondulado hacia el sur. Las colinas están compuestas por rocas duras del tipo calizas y ultramafitas, en las llanuras predominan los sedimentos arcillosos carbonatados, con intercalaciones de calizas arcillosas. Las elevaciones de la zona son alineadas según el rumbo de las capas, existen desplazamientos de estas estructuras como consecuencia de los sistemas de fallas. Hay una correspondencia entre el relieve y las características geólogo-estructurales.

La red hidrográfica es de tipo dendrítica, se destaca como corriente principal el río Colorado con sus afluentes de corrientes no permanentes. El río Güirabo, también de corriente no permanente, aunque en ambos casos existe circulación a través de los aluviones. Todos los ríos corren de norte a sur, excepto algunos de sus afluentes, que, adaptándose a las estructuras geológicas, corren de este a oeste y de oeste a este en algunos tramos antes de llegar al río principal. Las principales corrientes son de tipo antecedentes o anteriores al relieve actual (ver Figura 2).

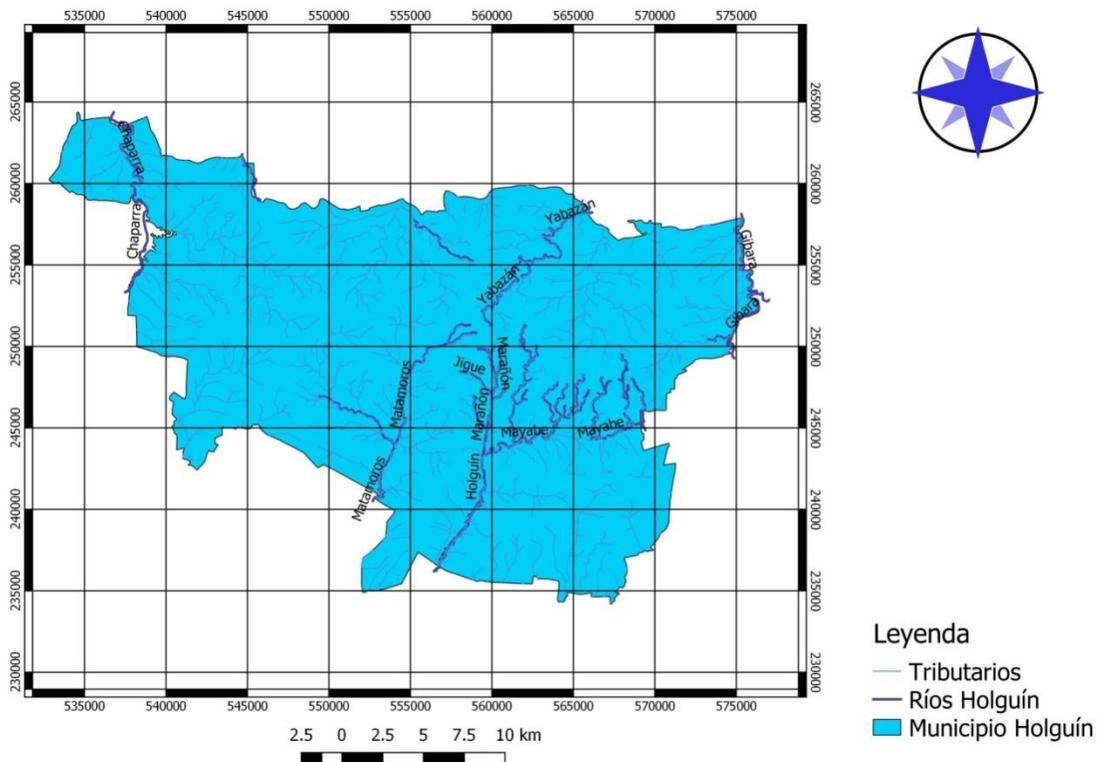


Figura 2. Mapa de la red hidrográfica del municipio Holguín, escala 1:50 000.

1.8 Geología y estratigrafía local

El área se caracteriza por presentar serpentinita alterada, fracturada, agrietada de color gris verdoso que en los primeros metros se presenta con un grado mayor de alteración, pero a medida que aumenta su profundidad, se encuentra más conservada. Dentro de las rocas de la asociación ofiolítica, aparecen rocas intrusivas representadas por grabodioritas, gabros y dioritas de composición media a básica con coloraciones grisáceas. Se manifiesta el magmatismo dividido en tres etapas o períodos, el magmatismo intrusivo de corteza oceánica, el magmatismo del arco Cretácico y el magmatismo del arco Paleógeno. En todos estos períodos se formaron cuerpos intrusivos y secuencias efusivas de lavas y piroclásticas. Los cuerpos intrusivos que aparecen fundamentalmente de gabros, pertenecen a la asociación ofiolítica, mientras que los de dacitas están más ligados al vulcanismo cretácico. Las rocas efusivas andesíticas-basálticas y basálticas cercanas a la zona, se desarrollaron en el arco Cretácico, mientras que las de rocas piroclásticas y vulcanomícticas se desarrollaron en el vulcanismo terciario.

En el área de estudio afloran las siguientes formaciones: serpentinitas y graboides, en contacto tectónico con la formación La Jíquima, Olistostroma Haticos, formación Vigía, Miembro Pedernales, formación Camazán y Paso Real (ver Figura 3). A continuación, se describen cada una de ellas.

Serpentinitas y melange serpentinitico (Formación Yaguajay) s(j7-b4):

Serpentinitas foliadas y brechosas con mezclas de un melange ofiolítico con rocas volcánicas del arco Cretácico. Aparecen relacionados cuerpos de gabro y gabrodiabasas de diferentes dimensiones que van desde pocos metros hasta varios kilómetros de extensión.

Formación La Jíquima (lj k5-k6): aparece hacia la parte norte centro del área. La representa areniscas vulcanomícticas, de grano fino a medio con intercalaciones de aleurolitas vulcanomícticas y argilitas.

Olistostroma Haticos ht (e3) (unidad informal): Secuencia olistostrómica constituida por brechas y conglomerados polimícticos, la matriz está formada por areniscas y aleurolitas, con intercalaciones de areniscas y aleurolitas. El tamaño de los

olistolitos es variable, van desde algunos centímetros hasta algunos metros y los mismos son de ultramafitas serpentinizadas, gabros, gabro-diabasas, granodioritas, cuarcitas, calizas, areniscas, aleurolitas, basaltos, andesito-basaltos, tufitas y granodioritas. La parte superior de esta unidad está constituida por conglomerados y brechas tobáceas con intercalaciones de tobas riodacíticas o dacíticas, las cuales cuando transicionan a los conglomerados contienen fragmentos de estos.

Formación Vigía vg (e₃-e₅): Areniscas polimícticas de granos grueso, medio a fino, aleurolitas con intercalaciones de tobas riodacíticas, tufitas, margas y arcillas bentoníticas. Las tobas riodacíticas son, en ocasiones carbonatadas, porosas, de color blanco y blanco-grisáceo. Las tufitas están frecuentemente silicificadas, carbonatadas o bentonizadas, bien estratificadas y en ocasiones plegadas y fracturadas. Entre las tobas riodacíticas, tufitas y areniscas se encuentran en ocasiones capas finas de diatomitas.

Miembro Pedernales (pd e₉-n₁): existen conglomerados polimícticos, débilmente cementado compuesto principalmente por clastos de diabasas, gabros y ultramafitas, redondeados. Con matriz masiva carbonatada que reacciona fuertemente con el ácido clorhídrico. La coloración de los clastos es oscura, abigarrada.

Formación Camazán (cz e₉-n₁): se extiende en forma de faja de oeste a este con una extensión de unos 500 – 700 m de ancho y unos 6900 m de largo. La representa caliza dura, recristalizada, fosilífera coralina - algáceas (biolititas), calizas biodetríticas, presencia de numerosos corales y otros fósiles. Su coloración es amarillo, crema. En ellas son escasas las grietas y abundantes las oquedades cársicas.

Formación Paso Real (psre₉-n₂): compuesta por calizas margosas, arcillas y margas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y aleurolitas calcáreas además de arcillas. Así como conglomerados polimícticos de matriz margosa. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos.

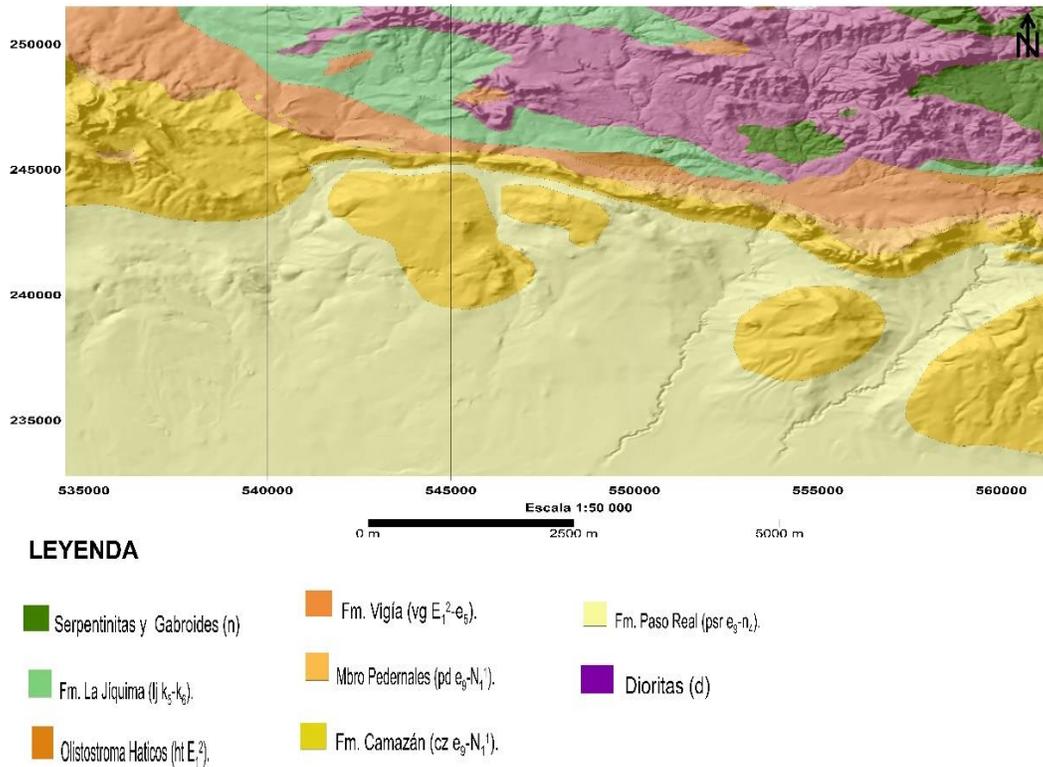


Figura 3. Mapa geológico del área de estudio, escala 1:50 000.

1.9 Tectónica regional y local

La región de Holguín se caracteriza desde el punto de vista geológico por presentar dos grandes pisos estructurales: el basamento plegado pre-Oligoceno y la cobertura neoplatafórmica del Oligoceno al Mioceno Medio parte alta (ver Figura 4).

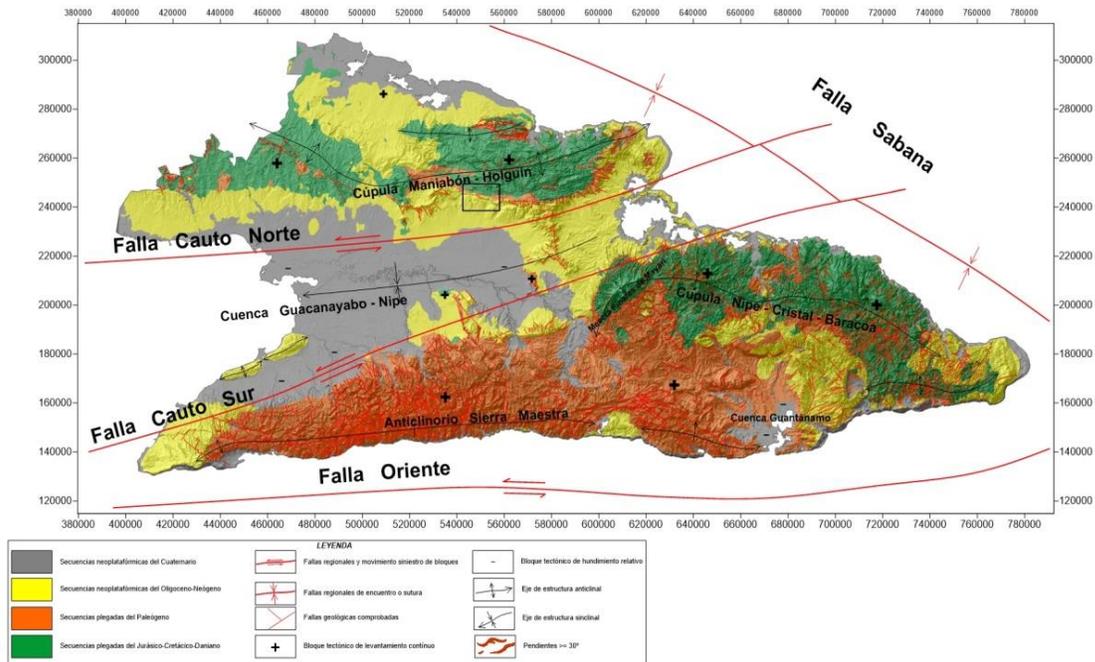


Figura 4. Mapa morfotectónico de Cuba Oriental. Tomado de (Blanco Blázquez, 2016), escala 1:50 000.

El basamento se caracteriza por estar intensamente plegado y fracturado con fallas normales verticales y subverticales, predominan las fallas inversas de bajo ángulo o corrimientos, formadas durante el emplazamiento tectónico de estas secuencias al colisionar con la plataforma norteamericana o de Bahamas más al norte y que forman casi todos los contactos entre las formaciones estratigráficas o asociaciones litológicas que afloran en el área. Este piso estructural se puede subdividir en dos subpisos: el del Cretácico y el de Paleógeno (ver Figura 5).

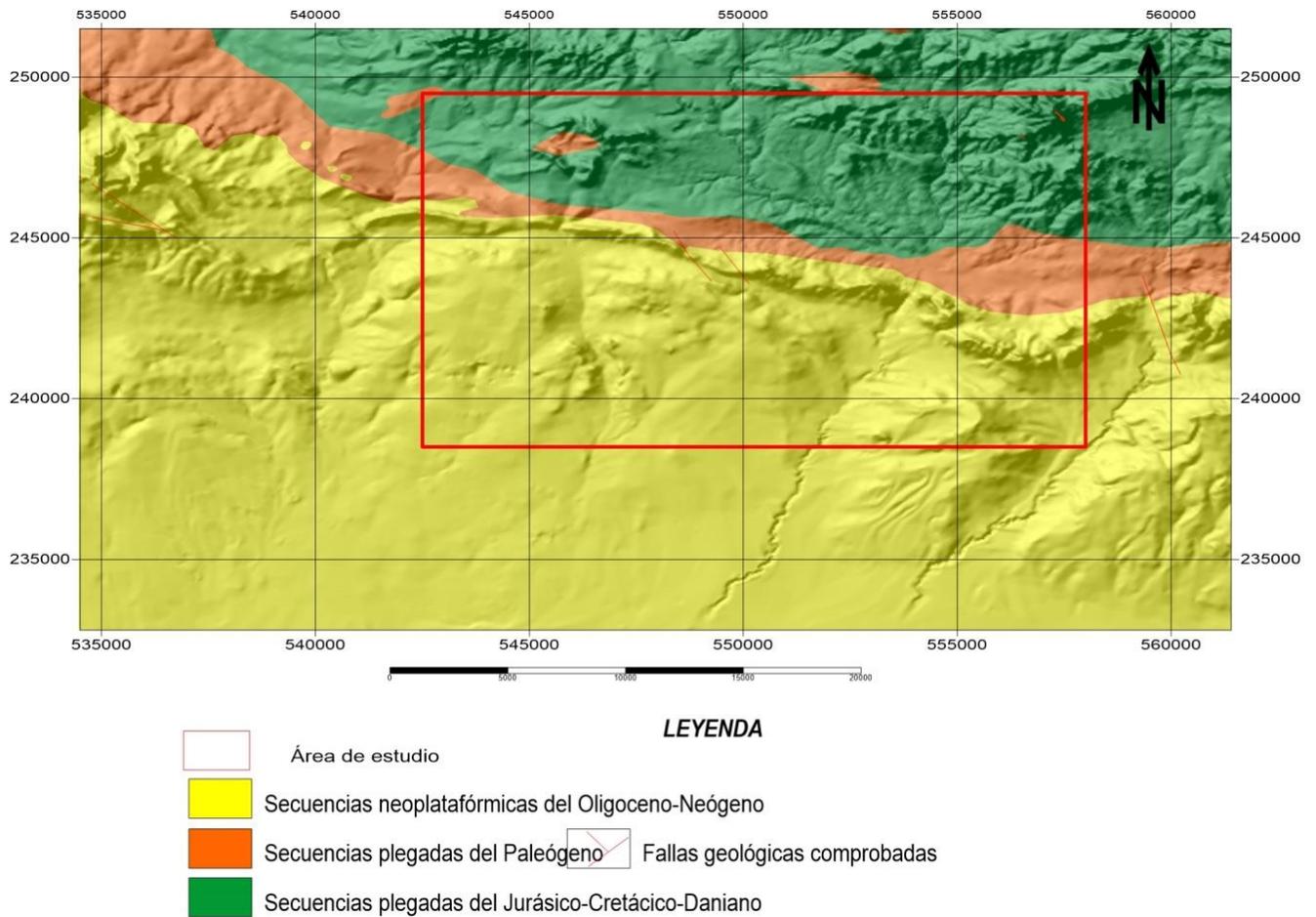


Figura 5. Mapa morfotectónico del área de estudio. Tomado de (Blanco Blázquez, 2016), escala 1:50 000.

Discordante sobre estas secuencias plegadas, se encuentran las rocas de la neoplataforma o cobertura, formadas por las rocas post-oligocenas desde el miembro Pedernales de la formación Camazán, las calizas de esta última formación, así como las margas y arcillas de la formación Paso Real.

La tectónica se manifiesta por el basamento plegado, que lo conforman estructuralmente pliegues isoclinales a ligeramente tumbados hacia el norte, más apretujados hacia el norte en las ofiolitas serpentinizadas donde pueden ser foliados y un poco suaves hacia el sur. En la cobertura neoplatafórmica están las secuencias menos plegadas con buzamientos pequeños al sur y mayores en las

proximidades de las fallas. Abundan las fracturas con fallas normales subverticales.

Existe una gran falla que limita las calizas de la Formación Camazán y las calizas con intercalaciones de arcillas y margas de la Formación Paso Real, dicha falla detectada durante la investigación hidrogeológica efectuada en Managua - El Aserrío, tiene una dirección este-noreste a este-sureste. Esta gran falla determinante en la yacencia de las aguas subterráneas en la zona y a su vez desplazada por fallas noroeste-sureste (conductoras de agua).

1.10 Características hidrogeológicas regionales y locales

La dirección del flujo subterráneo es hacia el sur, desde el parte aguas regional hacia la zona llana del valle del Cauto. El extremo este de la dirección del flujo es variado hacia el oeste, sudoeste y sur, en el resto del territorio de esta cuenca, su flujo es con dirección sudoeste, hacia el río Cauto y repitiendo la dirección de pendiente del terreno (ver Figura 6).

En las proximidades del río Cauto, el flujo de las aguas subterráneas es paralelo al cauce del río, hacia el oeste. El río Cauto representa un drenaje regional de las aguas subterráneas en gran parte del valle del Cauto, tanto dentro de los límites de la provincia Holguín como fuera de ellos. La potencia de los distintos complejos acuíferos presentes en la cubierta de esta cuenca es muy variada, desde menos de 1 m en zonas de acuñamiento de calizas hasta más de 80 m donde están los sedimentos de la formación Cauto. La acuosidad también es muy variada, incluso dentro de una misma formación.

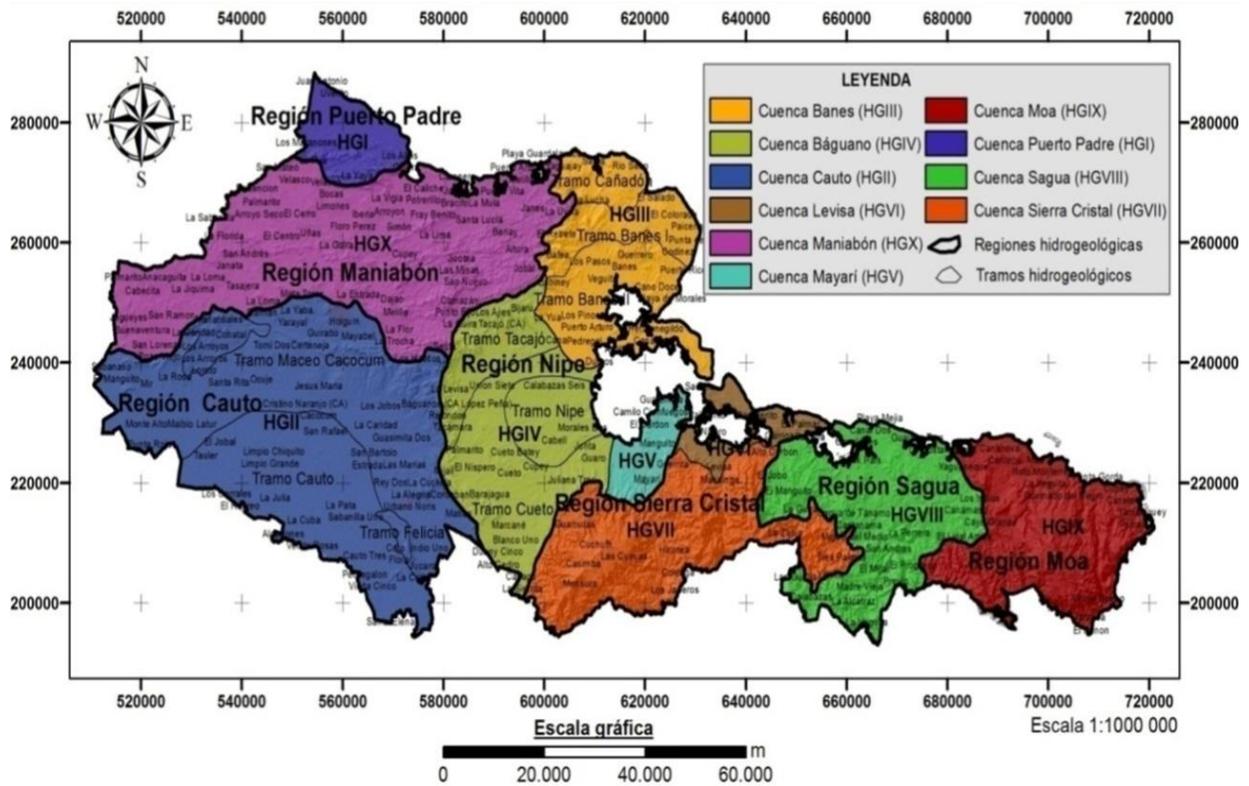
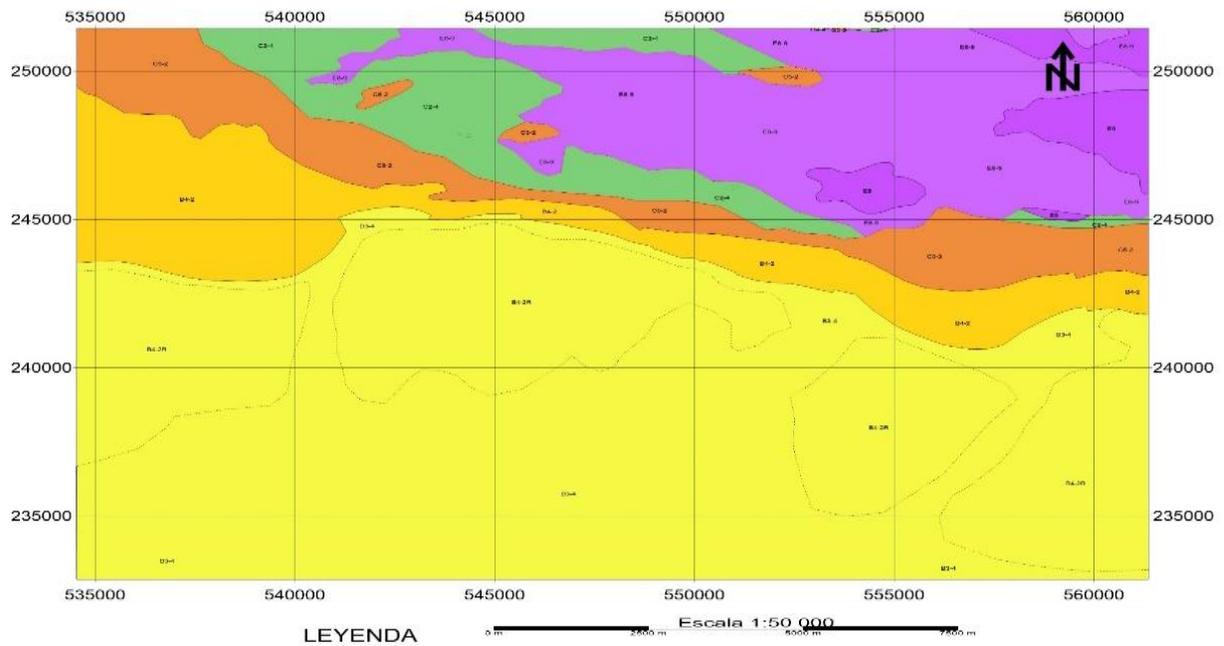


Figura 6. Mapa de la sistemática hidrogeológica de la provincia Holguín. Tomado de (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), 2009)

Las aguas presentes en el área de investigación corresponden al complejo acuífero de las rocas del Neógeno (ver Figura 7). En esta área el complejo acuífero del Neógeno está representado fundamentalmente por calizas carsificadas y bioalcarenitas, margas y areniscas porosas de la formación Camazán.



- LEYENDA**
- B₄₋₂ Carbonatado-clástico del Neógeno-Oligoceno
 - B₃₋₄ Terrígeno-carbonatado del Neógeno-Oligoceno
 - C₂₋₄ Clástico Carbonatado del Paleógeno-Cretácico
 - C₅₋₂ Vulcanógeno-Sedimentario del Paleógeno-Cretácico
 - E₉ Intrusivo básico (gabroides) del Cretácico-Jurásico. Asociación Ofiolítica
 - E_{8.7} Ultrabásico metamorfozido del Cretácico-Jurásico. Asociación ofiolítica

Figura 7. Mapa temático de los complejos acuíferos, escala 1:50 000.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1 Introducción

En el presente capítulo se expone la metodología empleada para la evaluación de las reservas de agua subterránea en el área de estudio, para propiciar el cumplimiento de los objetivos trazados. Se aplicaron un complejo de métodos de investigación que consistieron en levantamiento hidrogeológico, trabajos geofísicos y de perforación. A través de tres etapas fundamentales (ver Figura 8).

- Etapa I. Recopilación de la información y revisión bibliográfica.
- Etapa II. Trabajo de campo y de laboratorio.
- Etapa III. Trabajo de gabinete.

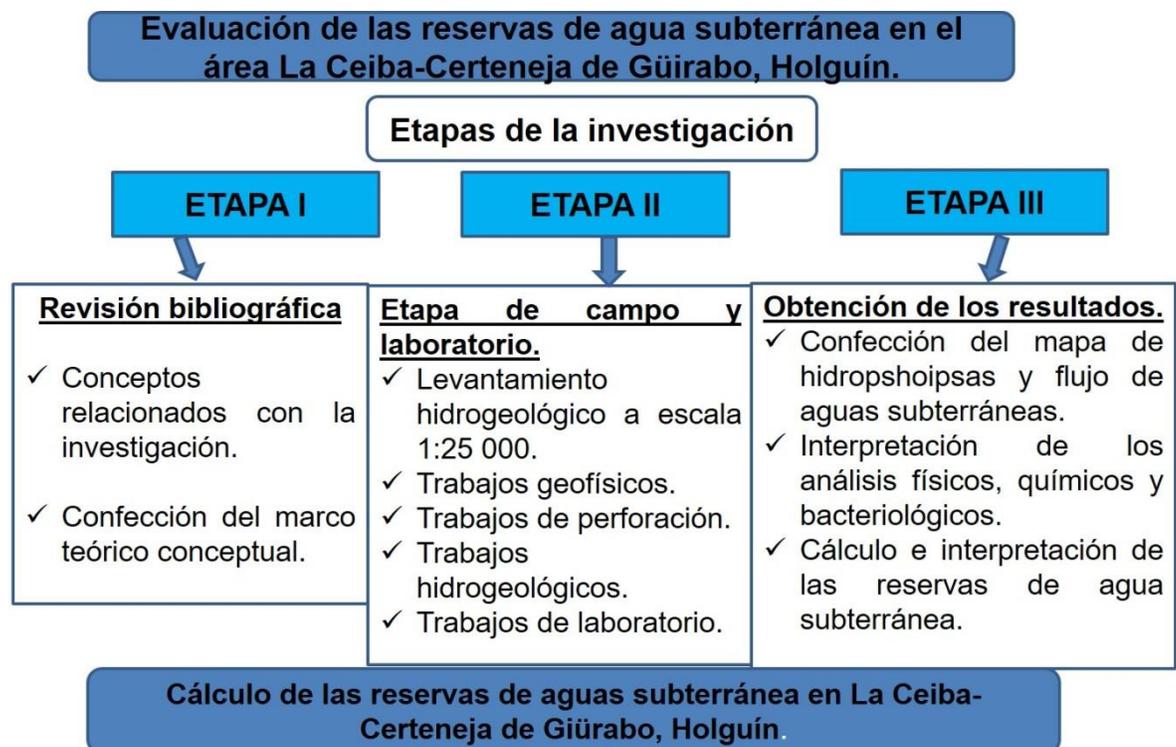


Figura 8. Flujograma de la investigación.

2.2 Etapa I

Durante esta primera etapa de la investigación, se realizó una búsqueda de la información bibliográfica existente en los archivos técnicos de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (RAUDAL) de Holguín y en sitios web relacionado con investigaciones anteriores que se hayan realizado en el área, así como investigaciones análogas en otras áreas, con el fin de obtener la mayor información posible sobre este sector.

2.3 Etapa II

En esta etapa se realizó el correspondiente levantamiento hidrogeológico a escala 1: 25 000 y seguido a ello la toma de muestras de las reservas de aguas subterráneas en el sector de estudio para su posterior análisis en el laboratorio mediante la determinación de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos.

2.3.1 Levantamiento hidrogeológico a escala 1: 25 000

Se realizó un levantamiento hidrogeológico en el sector de estudio que abarcó un área de 507,6 km², se tomaron un total de 40 puntos de descripción entre calas perforadas durante la investigación, pozos criollos, así como pozos existentes en el área. Recogiéndose los niveles naturales de 26 puntos muestreados, entre calas y pozos criollos, a los cuales también se les realizó análisis químicos y bacteriológicos, con el fin de realizar una interpretación de sus resultados y analizar las aguas subterráneas del área en cuanto a estas propiedades. Además, se ubicaron con el GPSMAP 62st, Garmin todos los puntos de interés, para ser ploteados en los planos resultantes del estudio y fueron descritas las litologías existentes en el área, a través de la observación en el terreno. El levantamiento se realizó a escala de 1:25 000 para realizar un trabajo bien detallado del área de estudio y los mapas resultantes de dicha investigación están elaborados a escala de 1:50 000.

2.3.2 Muestreo hidroquímico

El muestreo hidroquímico se realiza con el objetivo de determinar la composición química y el estado de calidad de las aguas a estudiar. En correspondencia con los resultados que se obtienen, definir si estas aguas son o no potables y aptas

para ser empleadas en la industria cervecera que constituye el objetivo de esta investigación. Para la obtención de una muestra representativa, se hace indispensable la extracción de tres veces el volumen de agua que se encuentre en dicho pozo, además de la limpieza de los frascos en los cuales se conservarán con el propósito de no contaminarse por el medio.

Para dicho muestreo se tomaron muestras de agua con una densidad acorde a los trabajos con escala 1: 25 000 y el volumen suficiente para obtener resultados satisfactorios en el análisis químico. Las muestras fueron tomadas en estaciones de bombeo del acueducto, en pozos criollos, además de las calas realizadas durante la investigación y los pozos ya existentes en el área. El análisis químico de estas muestras se realizó en la Empresa de Análisis y Servicios Técnicos Generales (ENAST) en Holguín.

2.3.3 Puntos de muestreo

Producto de que las aguas subterráneas del sector la Ceiba - Certenejas de Güirabo se están evaluando para abastecer a la fábrica de Cerveza Bucanero S.A se define la toma de 40 muestras, 22 de ellas en los pozos criollos muestreados, 14 corresponden a las calas realizadas en la investigación y las restantes 4 a los pozos existente en el sector.

2.4 Técnicas empleadas para las tomas de muestras de agua en los puntos muestreados

La toma de las muestras de agua se realizó a través de la conservación en pomos de plástico y fueron identificados con la simbología de PCG – 1 hasta el PCG – 22 que reflejan el lugar y el número del punto que se analiza.

2.5 Trabajos de perforación

Los trabajos de perforación se realizaron con fines de investigaciones hidrogeológicas. La perforación que se empleó fue la rotaria con recuperación del testigo, en la misma se determinó la precisión de la litología, mediciones de niveles y toma de muestras.

Las perforaciones se realizaron entre los 10 m y 170 m de profundidad. Se realizaron un total de 14 calas en el área de investigación, las cuales a su vez

permitieron aumentar el grado de conocimiento sobre el terreno. El equipamiento utilizado fue la perforadora MC80c (Sterling),(ver Figura 9). Se obtuvo como mínimo 80 % de recuperación del testigo. Se utilizaron diámetros PQ de 151 mm (es el nombre que reciben los diámetros de las máquinas modernas occidentales), con el sistema “wire line”, es un método de perforación basado en colocar doble tubo, con el fin de extraer la mayor cantidad de agua posible durante la perforación para que esta a su vez no afecte el testigo que extrae.



Figura 9. Perforadora MC80c (Sterling) empleada en las perforaciones.

Los testigos se colocaron correctamente ordenados en cajas. Estas fueron debidamente identificadas y preservadas (ver Tabla 1).

Tabla 1. Número de calas perforadas con sus profundidades de perforación.

Cala	Profundidad (m)	X	Y	Z
CG-1	32.00	549071.49	244538.62	121.7
CG-2	21.00	548681.70	246182.63	119.5
CG-3	30.00	548385.01	245050.84	123.6
CG-4	30.00	549917.60	244624.85	119.6
CG-5	20.00	549621.50	245836.08	120.8
CG-6	40.00	548822.59	244027.41	122.5
CG-7A	100.00	548990.00	244394.00	129.9
CG-8	40.00	548781.50	243339.68	130.4
CG-9	20.00	547816.86	244181.07	118.04
CG-10	30.00	548654.00	243952.00	123.5
CG-11	20.00	550452.00	244184.00	131.7
CG-12	40.00	548801.00	243672.00	130.5
CG-13	170.00	543533.00	245086.00	126.1
CG-14	10.00	553391	246483	107.6
Total		420		

2.6 Trabajos geofísicos

Los trabajos geofísicos se emplean con el fin de revelar la presencia o ausencia de cuerpos o estructuras en el subsuelo que no se observan a simple vista pero que se pueden detectar mediante los estudios geofísicos. En la investigación estos trabajos se emplearon para la determinación de las fallas existentes en el área, así como otros fenómenos tectónicos, además se determinaron las estructuras geológicas a su vez definieron los contactos litológicos y el nivel freático existente en las diferentes calas perforadas. Se realizaron 400 m de tomografías con el equipo Syscal Junior Switch 24 (ver Figura 10), con un voltaje de salida de 400 V, 2,5 A de corriente máxima y potencia total de 100 watt para investigaciones hidrogeológicas y para las geológicas hasta 25,00 m y con tomografías de 24 electrodos separados hasta 5,00 m y una longitud de 115,00 m en la ristra.

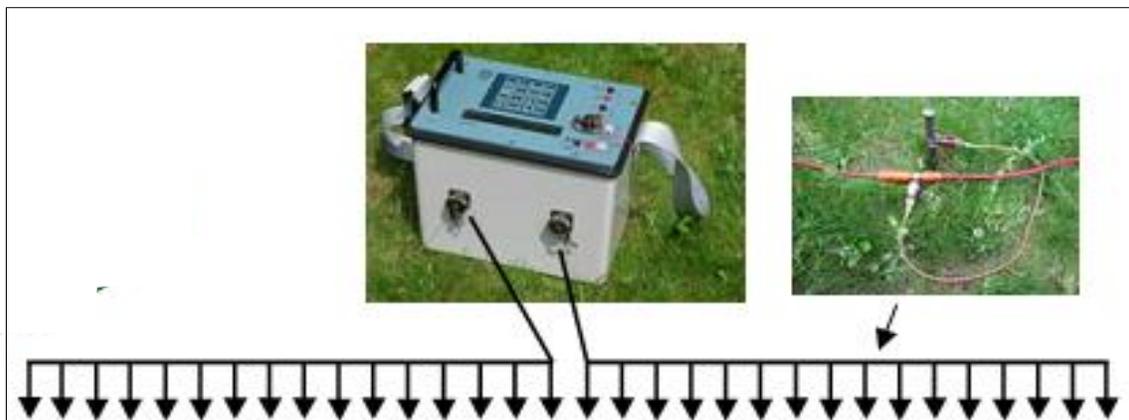


Figura 10. Equipo empleado en las tomografías

2.7 Trabajos hidrogeológicos

Los trabajos hidrogeológicos se utilizan con diferentes finalidades, como es la determinación de la dirección del flujo subterráneo, definir la calidad y la cantidad de recurso hídrico en un acuífero, entre otras. El estudio hidrogeológico de esta investigación está dirigido a determinar la composición química y volúmenes estimados de las aguas del sector de estudio.

Durante la realización de las perforaciones, se encontró el nivel freático a una profundidad entre los 2,10 m hasta los 20,8 m de perforación. Se efectuaron las

mediciones de los niveles en los pozos criollos que se encontraban dentro del área de estudio y se observó el cumplimiento de las zonas de protección sanitaria establecidas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y cualquier detalle que pueda afectar la calidad de las aguas. Se tomaron en ellos muestras de agua para análisis físico-químico y bacteriológico.

Se realizaron un total de 8 cubeteos en las calas que se realizaron, pero los datos obtenidos no permitieron el cálculo de los coeficientes de filtración, mediante el método Express, por lo que se aplicó el método de aforo al pozo 388A (cala 13) y se obtuvo como coeficiente de infiltración 7 m/día siendo este el valor que se emplea en el cálculo de reservas. En este caso se utilizó el procedimiento de realización de las pruebas de permeabilidad en calas por métodos rápidos (P (11)-2.05-04 nombrado Realización de las pruebas de permeabilidad en calas por métodos rápidos (Express)), este procedimiento establece los lineamientos para regular y uniformar los trabajos hidrogeológicos de pruebas de permeabilidades en las calas que se ejecuten durante las investigaciones hidrogeológicas, ingeniero geológicas o con otros fines.

2.8 Trabajos de laboratorio

El procesamiento y análisis de las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas de las muestras tomadas en los diferentes puntos de muestreo se llevaron a cabo en el Laboratorio de la Empresa de Análisis y Servicios Técnicos Generales (ENAST) de Holguín.

Propiedades físicas, químicas y bacteriológicas determinadas:

Se hicieron determinaciones de: Potencial de Hidrógeno(pH), Conductividad eléctrica (CE), Sólidos Solubles Totales (SST), Sólidos Totales (ST), Carbonato (CO_3^{2-}), Hidrogeno carbonato (HCO_3^{1-}), Cloruro (Cl^{1-}), Sulfato (SO_4^{2-}), Nitrato (NO_3^{1-}), Nitrito (NO_2^{1-}), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^{1+}), Potasio (K^{1+}), dureza total, turbidez(Tu), Color, Sólidos disueltos totales (SDT), coliformes totales (CT) y fecales (CF), y de esta forma, verificar la calidad de las aguas subterráneas en el área con respecto a estas propiedades (ver

Tabla 2).

Tabla 2. Métodos analíticos empleados para la determinación de las propiedades químicas y bacteriológicas.

Propiedades determinadas	Método	Equipo utilizado
Conductividad eléctrica (CE)	Electrométrico	Conductímetro 3151WTW
Potencial de Hidrógeno (pH)	Electrométrico	pH metro 7310
Sulfato (SO_4^{2-})	Espectrofotométrico	Espectrofotómetro HACH
Nitrato (NO_3^{1-})		Espectrofotómetro HACH
Carbonato (CO_3^{2-})	Valoración	-
Hidrogeno carbonato (HCO_3^{1-})	Valoración	-
Nitrito (NO_2^{1-})	Colorimétrico	Espectrofotómetro HACH
Cloruro (Cl^{1-})	Argento métrico	-
Calcio (Ca^{2+})	Titriméto con EDTA	-
Magnesio (Mg^{2+})	Cálculo	Cálculo(DT-Ca)
Sodio (Na^{1+})	Fotométrico por emisión con llama	Photometer
Potasio (K^{1+})	Fotométrico por emisión con llama	Photometer
Dureza Total (DT)	SMWW2340B C. M. por cálculo y M. valoración	-
Turbidez (Tu)	Turbidimétrico	Turbidímetro HACH
Sólidos disueltos totales (SDT)	M. de los SDT secados a $103^\circ\text{-}105^\circ\text{C}$	Estufa ECCOCELL
Coliformes totales y coliformes fecales (CT y CF)	Técnicas de los tubos múltiples de fermentación para miembros del grupo coliformes	Tubos múltiples de fermentación

Color	Comparación visual	-
-------	--------------------	---

2.9 Análisis y procesamiento de la información

A partir de los datos obtenidos tanto en los trabajos de campo como en el laboratorio se procesó la información mediante los softwares y las metodologías seleccionadas. A través del SAS Planet se realizó el mapa de ubicación geográfica del área de estudio, mientras que para la confección de los mapas geológicos y de red hidrográfica se empleó el QGis versión 3.0.1. Con la ayuda de Microsoft Excel se elaboraron las tablas que describen la cantidad de calas perforadas con sus profundidades de perforación, y los métodos analíticos que se emplearon en los trabajos de laboratorio, así como las fórmulas que se utilizaron para el cálculo de reservas. Se empleó el Surfer 12 para la confección del mapa de ubicación de los puntos y calas muestreadas, además de su utilización en la elaboración de los mapas correspondientes a las investigaciones hidrogeológicas.

2.10 Metodología para la interpretación de los análisis físicos, químicos y bacteriológicos.

Para la realización de una buena interpretación de los análisis físicos, químicos y bacteriológicos de las aguas subterráneas, es necesario regirse por las normas cubanas que establecen los requisitos sanitarios determinantes en la evaluación de la calidad de las aguas (potables o no potables). Norma Cubana NC 827: 2017 : Agua potable - Requisitos sanitarios. También se realiza una clasificación de las aguas según Aliokin y E. B. Pasovox, en correspondencia con los contenidos de pH , dureza total y por su mineralización.

Clasificación de las aguas por su composición química

 Clasificación de las aguas por su mineralización.

Esta clasificación establece la caracterización de las aguas por su mineralización; y a su vez es aplicable a estudios hidroquímicos o en evaluaciones regionales de reservas de las aguas subterráneas al no necesitarse detallar ampliamente la mineralización. Para determinar la clasificación de las aguas según su

mineralización se realizó según la clasificación de Aliokin (ver Tabla 3), a través la fórmula

$$M = \frac{\sum A+C}{1000} (g/L)$$
 , que relaciona mediante una fracción la sumatoria de los aniones y los cationes, expresado en gramos por litros (g/L).

Tabla 3. Clasificación de las aguas por su mineralización según O.A. Aliokin.

Mineralización g/L	Denominación de las aguas
< 1	Aguas dulces
1 – 3	Aguas poco salinizadas
3 – 10	Aguas saladas
10 – 50	Muy saladas
> 50	Rasoles

Tomado de (De Miguel Fernández, 2012)

✚ Clasificación de las aguas por la dureza total según O. A. Aliokin.

Está representada por el contenido total de sales de calcio y magnesio presentes en las aguas subterráneas, y se expresan en miligramos equivalentes (mg-equiv/L). A través de la fórmula: $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$, tal y como se muestra (ver Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de las aguas por su dureza total según O.A. Aliokin.

Dureza mg.eq/L	Denominación de las aguas
< 1,5	Muy blandas
1,5 – 3,0	Blandas
3,0 – 6,0	Algo duras
6,0 – 9,0	Duras
> 9,0	Muy duras

Tomado de (De Miguel Fernández, 2012)

✚ Clasificación de las aguas por su pH según E. B. Pasovox.

La concentración de iones de hidrógeno (pH) en el agua se acostumbra a expresarla en forma logarítmica con signo negativo, el cual es representado por el

símbolo pH, que nos determina el grado de acidez del agua. La clasificación de las aguas por su pH se basó en la clasificación de E. B. Pasovox (ver Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de las aguas por su pH según E. B. Pasovox.

Valor del pH	Denominación de las
< 3	Muy ácida
3 – 5	Ácidas
5 – 6,5	Débilmente ácida
6,5 - 7,5	Neutras
7,5 - 8,5	Débilmente básicas
8,5 - 9,5	Básicas
> 9,5	Muy básicas

Tomado de (De Miguel Fernández, 2012)

2.11 Metodología para la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas por el método hidrodinámico

La evaluación de reservas de explotación de aguas subterráneas por el método hidrodinámico no es más que el pase de las condiciones hidrogeológicas naturales a un modelo matemático. Es natural que en un modelo matemático no se puedan considerar todos los factores reales y elementos existentes en la naturaleza, ni el carácter de la interrelación de los mismos. La confección de modelos matemáticos de objetivos hidrogeológicos naturales representa ser una tarea sumamente compleja, la solución de la cual requiere de una fundamentación para la selección de los factores principales y poder definir aquellos que se pueden despreciar. Es necesario recalcar que durante la esquematización de las condiciones naturales tiene gran importancia la relación inversa, es decir, la influencia del tipo y régimen de trabajo de las tomas de agua que se programen sobre los principios de esquematización y métodos de confección de los modelos matemáticos. El paso de las condiciones hidrogeológicas a su modelación matemática (esquemas de cálculo).

El cálculo se fundamenta a través del principio del gran pozo el cual refiere que las tomas de aguas subterráneas se forman por una cantidad relativamente grande de pozos que tienen influencia entre sí. Los pozos que cumplen con estas

características en el sector de estudio son el pozo 439, 511, 512 y el 549, que en conjunto con el 388A conforman la batería de pozos que será analizada.

El área que ocupa tal tipo de tomas de agua, como regla debe ser mucho menor que el área de los horizontes acuíferos que se explotaran o se explotan. Esto permite analizar los pozos interrelacionados como un grupo de pozos compacto, que se analizan como un gran pozo.

La evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas en sistemas de grandes pozos la representa el cálculo de la magnitud del abatimiento en el pozo de mayor carga hidrodinámica, el esquema que se seleccionó corresponde a un acuífero semi-limitado con un límite que se considera impermeable y del tipo freático (ver Figura 11).

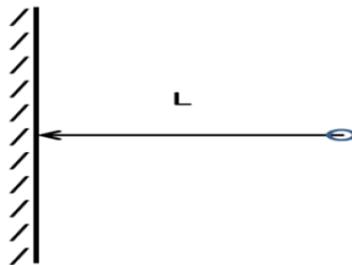


Figura 11. Esquema de cálculo de acuífero semi-limitado con un límite impermeable.

Para la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas del sector de estudio por el método hidrodinámico, debemos delimitar las fronteras hidrogeológicas así, como las principales fuentes de alimentación y potencia acuífera del mismo. También se deben establecer los diferentes parámetros hidrogeológicos inmersos en la ecuación matemática que se empleó como la conductividad de nivel (a), el coeficiente de filtración (K) y el abatimiento de explotación, algunos de estos datos se toman de los resultados del aforo que se realizó al pozo 388A que corresponde a la cala 13.

2.12 Metodología para la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas por el método de balance.

La evaluación de las reservas de explotación por el método de balance lo representa la determinación del caudal de las aguas subterráneas, que se obtiene,

por tomas de agua en los límites de un territorio que se seleccionó en el transcurso de un período de tiempo dado de explotación o, debido a la captación de volúmenes de las distintas fuentes de formación de las reservas de explotación (es el referido en la presente investigación), las cuales están incluidas en la ecuación.

En esta evaluación cada uno de las posibles fuentes de formación de las reservas de explotación se evalúa de forma independiente, y posteriormente se ejecuta la suma de los resultados. Durante la evaluación por el método de balance, el balance de un tramo se analiza en su conjunto, se considera la entrada y caudal de las aguas. En relación con esto, el método de balance permite determinar solamente el abatimiento medio del nivel del horizonte acuífero que se explotará, y no el abatimiento del nivel en las obras de tomas (pozos). Todo eso predetermina la necesidad de emplear el método de balance como un método adicional en combinación con los métodos hidrodinámico e hidráulico.

El método de balance determina el papel de las distintas fuentes de formación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas y evaluar la garantía de estas reservas, calculadas por otro método. Por ello la utilización del método de balance en conjunto con otro método de evaluación de reservas de explotación es sumamente racional e importante en la mayoría de los casos.

Para la evaluación de pequeños tramos, los cálculos de las reservas de explotación por el método de balance se pueden ejecutar de forma combinada con otros métodos, se utiliza para la evaluación de las reservas y recursos que forman las reservas de explotación los métodos analizados con anterioridad. Si se evalúan las reservas por los métodos hidrodinámicos o hidráulico las reservas de explotación (Q_e) estarán garantizadas una vez su magnitud sea menor o igual a los resultados que se obtengan por el método de balance (De Miguel Fernández, 2008).

CAPÍTULO III: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS TRABAJOS HIDROGEOLÓGICOS

3.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los resultados que se obtuvieron durante la investigación, los cuales corresponden a la obtención del mapa representativo de los diferentes puntos muestreados, el mapa de la dirección del flujo de las aguas subterráneas a través de la representación del mapa de hidroisohipsas además de la interpretación de los análisis químicos, físicos y bacteriológicos. Para finalmente realizar el cálculo de las reservas de agua subterránea en el área perspectiva con la finalidad de construir el pozo que abastecerá a la Fábrica de Cervezas "Bucanero S.A". El área que se considera perspectiva corresponde a las calizas de la Formación Camazán que ocupa un área de 3,4 km².

3.2 Descripción de los puntos de muestreo

Con el fin de realizar una buena valoración de la calidad de los recursos hídricos existentes en el sector de estudio se realizó un estudio hidroquímico de las aguas subterráneas que son empleadas tanto para el consumo humano como para otras actividades agrícolas. A continuación, se realiza la descripción de los 22 puntos de muestreo pertenecientes a pozos criollos.

P CG- 1: Pozo criollo

Coordenadas: X=547885.956 Y=246268.254.

Breve descripción: ubicado en parte frontal de la vivienda, el mismo posee brocal. La litología presente en este punto está representada con 1,00 m de espesor por una capa vegetal de color carmelita oscuro, se pudieron observar algunos fragmentos de calizas dura, masiva de color blanco crema con diámetros de 2 cm - 5 cm. De 1,00 m hasta los 8,60 m. Se encontró una roca de color amarillento con mineralización de color blanco y de dureza media, la cual reaccionó al ácido clorhídrico (HCl). La vegetación es predominantemente de hortalizas, frutales y viandas. El pozo posee una profundidad de 8,60 m, se encontró su nivel freático a los 8,40 m.

P CG- 2: Pozo criollo

Coordenadas: X=548317.241 Y=246420.051.

Breve descripción: el punto de muestreo presenta brocal y se localiza en la parte trasera de la vivienda. La litología se encuentra representada por una capa vegetal de color carmelita oscuro con algunos fragmentos de roca carbonatada con espesor apreciable de 1,00 m a unos 5 m de distancia del pozo se observan letrinas, así como corraletas de cerdos lo cual puede representar una causa directa para la afectación parcial de estas aguas. La vegetación está representada por abundantes plantas de guácimas que se reproducen con gran rapidez además de los diferentes árboles frutales.

P CG- 3: Estación de bombeo de Yareyal

Coordenadas: X=549790.428 Y=246419.027

Breve descripción: el punto de muestreo corresponde a la estación de bombeo de Yareyal. Su utilidad es el abastecimiento de agua potable a los pobladores de la localidad de Yareyal, que se realiza a través del abastecimiento directo desde una turbina debido a que el tanque que se encuentra elevado, sus tuberías están obstruidas. La litología del lugar está representada por una capa vegetal de color carmelita oscuro con algunos fragmentos de serpentinitas alteradas con diámetros de 1cm -10 cm. La vegetación está representada por hortalizas, viandas y árboles frutales.

P CG- 4: Pozo criollo

Coordenadas: X=548818.469 Y=245485.113

Breve descripción: el punto de muestreo se localiza en las cercanías de la antigua Unidad Militar de Cohetes, es un pozo criollo con brocal situado en la parte trasera de la vivienda, el mismo está cubierto con una cobertura de madera. La litología está representada por un suelo del tipo arcilloso de color carmelita claro. La vegetación predominante en los alrededores de la vivienda es de frutales. A unos 20 m del pozo se observó una letrina. El pozo posee una profundidad de 9,0 m, se encuentra su nivel freático a los 7,0 m.

P CG- 5: Pozo criollo

Coordenadas: X=548807.586 Y=244931.311

Breve descripción: el punto de muestreo se localiza en la carretera central camino a las Tunas, el pozo se encuentra en la parte trasera de la vivienda. La litología imperante es de una capa vegetal con color carmelita oscuro con fragmentos de roca de dureza media. Este pozo es empleado en el riego de las hortalizas y para el consumo animal. A unos 5 m de distancia del pozo se localizan corrales de cerdos y a unos 10 m letrinas. La vegetación existente es variada, se destacan las palmas reales y árboles frutales. El pozo posee una profundidad de 12,40 m, se encuentra su nivel freático a los 7,4 m.

P CG- 6: Estación de bombeo de Brisas de Yareyal

Coordenadas: X=548851.781 Y=244691.089

Breve descripción: El punto de muestreo se localiza en la Estación de Bombeo de Brisas de Yareyal, es un pozo criollo con brocal que se ubica en la parte trasera. La litología en este punto está dada por una capa de color carmelita oscuro con fragmentos de serpentinita alterada. Su vegetación está representada por árboles frutales y hortalizas. El pozo posee una profundidad de 40,0 m, se encuentra su nivel freático a los 16,5 m.

P CG-7: Pozo criollo

Coordenadas: X=549753.981 Y=244314.66

Breve descripción: el punto de muestreo pertenece a una propiedad privada , es un pozo criollo con brocal ubicado en la parte trasera de la vivienda, el mismo se encuentra protegido por una cubierta metálica que no está en muy buen estado. Su litología está caracterizada por una cobertura vegetal de color carmelita claro. A unos 15 m de distancia del pozo existen letrinas y corraleta de animales lo cual pudiera constituir una amenaza a la contaminación del pozo la vegetación predominante es de árboles frutales y hortalizas. El pozo posee una profundidad de 10,5 m, se encuentra su nivel freático a los 7,40 m

P CG- 8: Antigua Unidad Militar de cohetes

Coordenadas: X=550290.54 Y=244281.822

Breve descripción: se localiza en la parte trasera de la Unidad Militar, estas aguas son utilizadas en el consumo de los trabajadores de la Unidad. La litología que se observó era de una cubierta vegetal de color carmelita oscura con fragmentos de roca carbonatada. La vegetación en dicho punto está representada por Roble amarillo, Cedro y Algarrobo. El pozo posee una profundidad de 64,0 m, se encuentra su nivel freático a los 11,0 m.

P CG- 9: Granja Hortícola Brisas de Yareyal

Coordenadas: X= 549245.597 Y=246386.316

Breve descripción: se ubica a la derecha de la entrada de la Granja, protegido por una caseta. Su litología está representada por una capa vegetal de color carmelita oscuro y serpentinita alterada de color verde azulado. La vegetación en la zona está constituida por árboles frutales y vegetales. El pozo posee una profundidad de 25,0 m, se encuentra su nivel freático a los 8,0 m.

P CG- 10: Granja Hortícola Brisas de Yareyal.

Coordenadas: X=548625.598 Y=246367.576

Breve descripción: este constituye otro pozo situado en la parte trasera de la granja con características litológicas y de vegetación similares en sus alrededores que el descrito anteriormente. El pozo posee una profundidad de 21,73 m, se encuentra su nivel freático a los 9,8 m.

P CG- 11: Pozo criollo

Coordenadas: X=548250.697 Y=246693.314

Breve descripción: se localiza en las cercanías de la carretera central. Su litología está representada por una cubierta de capa vegetal de color carmelita oscuro con fragmentos de serpentinita alterada. Está situado en la parte trasera de la vivienda con brocal, está cubierto por una teja de zinc en muy mal estado. Las aguas de

este pozo están destinadas para el consumo humano. Se observa una cochiguera de cerdos en un área cercana de la cual se quejan los vecinos, y una letrina a unos 15 m del pozo y caseríos con letrinas y corrales, lo cual pudiese ser una causa directa de contaminación. La vegetación está constituida por árboles frutales, viandas (plátano) y cardona. El pozo posee una profundidad de 11,0 m, encontrándose su nivel freático a los 9,50 m.

P CG- 12: Pozo criollo

Coordenadas: X=547070.411 Y=246183.366

Breve descripción: se encuentra ubicado en la parte trasera de la vivienda. La litología de sus alrededores está representada por una cubierta vegetal de color carmelita oscuro con fragmentos de serpentinita alterada y la vegetación predominante es de árboles frutales y hortalizas.

P CG- 13: Pozo criollo

Coordenadas: X=547723.781 Y=245775.135

Breve descripción: ubicado en la parte trasera de la vivienda. Su estado físico es pésimo, pues su edificación se encuentra bastante afectada, no presenta ningún medio de protección en su parte superior. El agua del mismo es de uso doméstico. La litología está representada por una capa vegetal de color pardo. El pozo posee una profundidad de 21,0 m, se encuentra su nivel freático a los 9,0 m.

P CG- 14: Pozo criollo

Coordenadas: X=547723.781 Y=245775.135

Breve descripción: este pozo se encuentra ubicado en la parte trasera de la vivienda y es utilizado con fines domésticos. El mismo se encuentra en buen estado físico y la parte superior de este permanece bien tapado. El suelo es arcilloso de color amarillento con fragmentos de rocas carbonatadas. En las cercanías del pozo existen letrinas y corrales de animales lo cual representa un peligro a la contaminación del mismo. El pozo posee una profundidad de 12,20 m, se encuentra su nivel freático a los 12,10 m.

P CG- 15: Tienda El Calichal.

Coordenadas: X=548259.609 Y=245071.551

Breve descripción: se localiza en el lateral izquierdo de la tienda El Calichal que está situada en el poblado con el mismo nombre. El uso de este pozo es con fines de riego, el mismo se encuentra cubierto por brocal y algunos fragmentos de rocas carbonatadas. Permanece descubierto la mayor parte del tiempo. La litología que existe en la zona es de calizas de color blanco, dura y con oquedades cársicas. En sus alrededores existe una vegetación bastante tupida representada por árboles frutales, maderables y plantas silvestres. El pozo posee una profundidad de 13,20 m, se encuentra su nivel freático a los 12,20 m.

P CG- 16: Pozo criollo.

Coordenadas: X=549284.332 Y=246057.067

Breve descripción: el pozo muestreado se localiza en la parte trasera de la vivienda con brocal, encontrándose en muy buen estado físico y no está cubierto. La litología está representada por una capa vegetal de color carmelita oscuro con un espesor de 1,20 m mientras que con unos 18,00 m se observaron gabros con fábrica brechosa fina a media, muy meteorizada, con presencia de óxido de hierro. Sin embargo, en su parte inferior está un poco más meteorizada con color grisáceo. El uso de este pozo tiene fines domésticos. A unos 4 m del pozo existen corraletas de cerdos y a unos 10 m se observaron letrinas, las cuales representan un peligro eminente a la contaminación de las aguas de dicho pozo. La vegetación está representada por árboles frutales y hortalizas. El pozo posee una profundidad de 9,19 m, se encuentra su nivel freático a los 8,60 m.

P CG- 17: Pozo criollo

Coordenadas: X=549820.958 Y=246193.38

Breve descripción: es un pozo criollo con brocal que se localiza en la parte trasera de la vivienda. Es utilizado en el consumo doméstico. La litología está representada por una capa vegetal de color carmelita oscuro con fragmentos de

roca de fábrica brechosa fina, textura criptocristalina y mineralización de cuarzo. A unos 20 m del pozo se observaron letrinas y corrales de animales. El pozo posee una profundidad de 7,61m y se encuentra su nivel freático a los 7,21 m.

P CG- 18: Pozo criollo

Coordenadas: X=549866.469 Y=244809.421

Breve descripción: está ubicado en la parte trasera de la vivienda, el mismo se encuentra cubierto con brocal y totalmente descubierto en la boca del mismo. El uso de este pozo es el consumo doméstico. La litología de la zona está representada por una roca de poca dureza, arenosa, de color amarillo quemado. La vegetación predominante es de árboles maderables y pastizales. Su nivel freático fue encontrado a los 8,0 m de profundidad.

P CG- 19: Camino hacia Calichal

Coordenadas: X=548372.517 Y=244382.487

Breve descripción: este pozo se encuentra camino hacia la localidad de Calichal, presenta un estado físico deteriorado y se encuentra tapado con algunos pilones de madera. Cercanos a este no se observaron viviendas por lo que aparentemente el uso del pozo es con fines de regadío y para los animales. La litología que existe en el lugar está representada por un suelo margoso de color amarillento con abundantes fragmentos de caliza dura, masiva, carsificadas con diámetro entre 2cm –10 cm. La vegetación es abundante, se destacan árboles maderables y plantas silvestres. Su nivel freático se encuentra a los 9,0 m de profundidad.

P CG- 20: Pozo criollo

Coordenadas: X= 549569.38 Y: 243920.26

Breve descripción: este pozo se encuentra empedrado completo y es tapado con pilones de madera, el agua que contiene el mismo es salada. Su suelo es arcilloso de color pardo amarillento con pequeños fragmentos de caliza de color blanco crema con diámetro entre, constituye además un material blando puesto que al ser excavado se derrumba con facilidad. A unos 10 m de distancia de dicho pozo se

localizan letrinas albañales lo cual representa un peligro hacia la contaminación de estas aguas.

P CG- 21: Pozo criollo

Coordenadas: X= 548099.667 Y=241827.308

Breve descripción: el pozo se encuentra ubicado en la parte trasera de la vivienda. La litología que se observó dentro del pozo fueron calizas de color blanco con tonalidades rosadas de grano fino y de alta dureza. Más abajo de estas se encontraron conglomerados con clastos pequeños con diámetros entre 1 mm – 2 mm de diámetro y matriz terrígena de color blanco crema. Se observan fósiles aislados de color marrón. El uso de este es para el consumo doméstico. Debajo de los conglomerados fue encontrado el horizonte acuífero.

P CG- 22: Pozo criollo

Coordenadas: X=548015.384 Y=241381.132

Breve descripción: se localiza en la parte trasera de la vivienda, presenta un buen estado físico y está cubierto con brocal. El suelo es arcilloso de color carmelita oscuro con abundantes fragmentos de caliza de dureza media. La vegetación que predomina es de palmeras y hortalizas.

3.3 Descripción de las calas perforadas

CALA 1

La profundidad de la cala es de 32.00 m y su nivel freático fue encontrado a los 9.20 m de perforación. En los primeros 0.20 m de profundidad se observó la capa vegetal, con suelo arcilloso color pardo oscuro y pequeños fragmentos de calizas y restos de materia orgánica que se comprobó su reacción hacia el ácido clorhídrico (HCl). Entre los 0,20 m – 0,50 m se encontró eluvio. El suelo es de color pardo rojizo, con abundantes fragmentos sub redondeados de calizas, en su mayoría menores de 1 cm de tamaño, presentó una reacción activa al ácido clorhídrico (HCl) al 1 %.

De 0,50 m - 1,70 m se observaron margas de color crema rosácea que no

presentaban plasticidad, posee nódulos de CaCO_3 untuosos al tacto, así como fragmentos y pequeños bloques de caliza un poco meteorizados y con dureza de media a alta, se comprobó su reacción activa frente al HCl al 1 % (Formación Camazán). Mientras que de 1,70 m – 32,00 m se observaron areniscas vulcanomícticas que no reaccionaron al ácido clorhídrico (HCl). A los 6,30 m presenta un color beige con una granulometría que va de fina a media, muy fracturada y agrietada (formación La Jíquima). Desde 6,30 m varia de un color grisáceo hasta un gris claro, en su mayoría masiva, compacta, con algunas grietas verticales y oblicuas. Se recuperaron cilindros mayores de 1 m de longitud. A los 11.50 m – 12.30 m la roca se encuentra muy fracturada.

CALA 2

La profundidad de la cala perforada es de 21,00 m, se encuentra su nivel freático a los 9,10 m se observó la capa vegetal con un suelo arcilloso de color pardo oscuro, plástico y carbonatado con pequeños fragmentos de roca y restos de materia orgánica. Desde los 0,20 m- 21,50 m se observó un material de color gris claro a gris oscuro de grano fino y con elevada dureza. Existían partes que estaban fragmentadas y otras masivas bastante meteorizadas. Presencia de grietas oblicuas de los tipos cerrados y abiertos, rellenas en su mayoría con calcitas, otras con FeO y MnO. Poseen ángulos muy variables, algunos de 45 °C (Asociación ofiolítica). Desde los 3,00 m el material es más fresco y a medida que aumenta la profundidad se torna de un color gris azulado y en los 9,00 m la dureza del material es elevada. Se recuperan cilindros de 5 cm a 30 cm de largo.

CALA 3

La profundidad de la cala perforada es de 30,00 m, se encuentra su nivel freático a los 10,40 m de la perforación. A los 2,50 m de perforación se encontraba la capa vegetal con un material de color carmelita oscuro con algunos fragmentos de caliza de color blanca y dureza media. Desde los 2,50 m- 3,00 m se encontraron margas de color blanco rosáceo un poco plásticas conjuntamente con gravas y escasos fragmentos verdosos de posibles tobas (formación Camazán). A partir de los 3,00 m hasta los 9,00 m se encontraron tobas psefíticas de color gris claro

junto con gravas de colores que variaban desde blanco, carmelita y verdes. Presentaban una dureza de media a baja con matriz de color claro, perteneciente a un material carbonatado. Mientras que desde los 9,00 m hasta los 19,50 m se observaron nuevamente las tobas pefíticas en conjunto con las gravas bastante fracturadas y presencia de grietas con un ángulo de inclinación de 15°, los clastos tienen una dimensión de 2 cm -10 cm de diámetro. Y ya entre los 19,50 m y 30.00 m se observaron las tobas de color gris verdoso, grano fino y dureza media. Desde los 3,00 m hasta los 30,00 m están presentes las rocas de la formación Vigía.

CALA 4

A la cala perforada con profundidad de 30,00 m se le encontró el nivel freático a los 10,00 m de perforación. A los 13,00 m de perforación se encontraron los conglomerados polimícticos de composición vulcanogénica, con clastos subredondeados y algunos angulosos con diámetros entre 2,00 cm y 10,00 cm. Presentan en su mayoría matriz carbonatada de color blanco, dura y además se comprobó su reacción frente al ácido clorhídrico (HCl) al 1 %. Desde los 13,00 m hasta los 15,00 m se encontraron las calizas masivas, elevado peso específico, de color blanco con tonalidades naranjas, en partes con manchas negruzcas. Estas calizas se encontraban poco agrietadas con algunas oquedades rellenas con calcita. Alrededor de los 15,00 m y hasta los 15,20 m encontramos tobas de grano fino con color gris verdoso y dureza media. Los conglomerados fueron encontrados a una profundidad de 15,20 m hasta los 30,00 m poseen una matriz carbonatada dura con pocos clastos. Sin embargo, la mayor cantidad de clastos con diámetros de 1-3 cm y menor matriz, se localizan entre los 17,70 m y los 21,00 m. Todas las rocas que se identificaron en esta cala pertenecen a la formación Miembro Pedernales.

CALA 5

La cala que se perforó tiene una profundidad de 20,00 m y su nivel freático se encontró a los 10,40 m. En los 3,50 m la roca presenta grietas con aberturas de 2 mm - 3 mm e inclinación de 45 a 60°. A los 10,50 m de perforación se encontraron

tobas de grano fino de color verde grisáceo y con dureza media hasta los 11,00 m de profundidad (Formación Miembro Pedernales y Formación Vigía). Desde los 11,00 m hasta los 20,00 m se localizan las grabo diabasas, criptocristalina, con abundantes grietas y fracturas, con manchas de óxido de hierro (FeO) y ligeras vetas de material carbonatado (asociación ofiolítica).

CALA 6

La profundidad de la cala que se perforó fue de 40,00 m y el nivel freático se encontró a los 7.10 m de una vez que inició la perforación. Entre los 0,50 m hasta los 0,80 m estaban las arcillas de color amarillento. Mientras que desde los 0,80 m hasta los 1,70 m las margas de color verde amarillento, a las cuales se les comprobó su reacción ante el ácido clorhídrico (HCl) al 1 % y el material se adhería a la lengua. Seguidamente de este material y hasta los 9,50 m se determinó la existencia de arcillas color pardo amarillento con tonalidades verdosas, que al final del intervalo presentó cierta plasticidad. Desde los 9,50 m hasta los 18,50 m se determinó las margas de color verde grisáceo alternadas con arcillas color pardo amarillento, estas arcillas se encontraron hasta los 21,50 m, pero estas eran algo compactas. A partir de los 21,50 m hasta los 30,50 m se encontraron brechas, con fragmentos angulosos de calizas de color blanco crema y con matriz arenosa, presentaba alta dureza. Las rocas que se encontraron hasta esta profundidad (30,50 m) pertenecen a la formación Camazán.

Entre los 30,50 m hasta los 32,00 m estaban las tobas de color gris verdoso, grano fino y fracturadas por los efectos de la perforación. A los 33,50 m nuevamente las brechas con fragmentos de caliza dura y matriz tobácea. Seguida de estas las tobas de color gris verdoso, fracturada por los efectos de la perforación que al final del intervalo se torna de mayor dureza a los 40,00 m de perforación. Las rocas desde los 30,50 m hasta los 40,00 m pertenecen a la formación Vigía.

CALA 7

La cala fue perforada hasta los 100 m de profundidad y no se encontró el nivel freático. Desde el inicio de la perforación hasta los 72,50 m se encontraron calizas duras de color blanco con abundante mineralización férrica lo cual le proporciona

una coloración rosácea hasta los 10,00 m. Existencia de abundantes oquedades cársicas de diámetro entre 2 cm -3 cm. Son organógenas y se observaron fósiles, algunos incrustados en la roca y otros que dejaron sus huellas bastante agrietadas. En partes aparecieron fracturadas con fragmentos entre 2 cm -10 cm. Se comprobó su reacción fuerte al HCl al 1 %. Desde los 10.00 m hasta los 11,70 m se observaron arcillas muy plásticas de color carmelita amarillento que pudiera ser una caverna. En el intervalo de los 11,70 m a 33,0 m la roca se presenta de forma más densa y dura mientras que de 20,0 m a 22,0 m se observaron algunos clastos al parecer de roca volcánica que toman un aspecto conglomerático. También se observaron margas de color amarillento a partir de los 64,50 m a los 69,50 m que reaccionaron fuertemente con el HCl al 1 %. Entre los 72,50 m y los 99,00 m se encontró una roca volcánica de color gris oscuro de dureza media, que de 72,50 m a 85,50 m se presenta de grano fino y de 85,50 m a 99,0 m de grano grueso. No reaccionó con el HCl. Se observaron también grietas de buzamiento casi vertical.

CALA 8

La cala fue perforada hasta los 40,00 m y el nivel freático se encontró a los 16,55 m. Desde que se inició la perforación hasta los primeros 0,50 m se observó la capa vegetal y a continuación las arcillas plásticas de color carmelita oscuro con algunos fragmentos pequeños de caliza blanca (1 mm -2 mm de diámetro) y raíces de plantas. A partir de los 0,50 m y los 3,50 m se encontró arcilla carbonatada algo plásticas, de color crema que desde 1,00 m era más clara, reaccionó al HCl. Se encontró arcilla plástica, húmeda de color gris verdoso, no reaccionó con el HCl. Seguida de estas se observaron las calizas de color blanco crema, algo porosa entre los 7,40 m y los 13,00 m. A los 9,00 m existe una grieta con buzamiento vertical y dureza media a los 7.40 m hasta los 9,50 m, más alta entre los 12,00 m y los 12,40 m, reacciona fuertemente al HCl al 1 %. Desde los 22,10 m hasta los 25,30 m existencia de caliza intercalada con arcillas con un espesor de 3,20 m. Seguidas de calizas margosas, consolidada y de dureza media localizadas entre los 25,30 m y los 27,25 m de perforación. Entre los 27,25 m y 28,30 m se observaron nuevamente las arcillas de color amarillento y alta plasticidad, mientras

que desde los 28,30 m hasta los 31,30 m aparecieron nuevamente las calizas margosas de color blanco y dureza media. Y posterior a estas las calizas de color amarillento con dureza alta, con un espesor de 2,20 m. Desde los 33,50 m a 34,00 m se observaron arcillas de color amarillento y con una plasticidad elevada. A partir de los 34,00 m y hasta los 34,80 m de profundidad se localizaron las calizas margosas de color amarillo blancuzco que en profundidad pierde la tonalidad amarillenta, presenta dureza media. Desde los 34,80 m hasta los 40,00 m de profundidad se observaron intercalaciones de arcillas con tonalidades de gris verdoso a negro con alta plasticidad y calizas margosas de color amarillo blancuzco.

CALA 9

La cala fue perforada hasta los 20 m de profundidad y el nivel freático encontrado a los 2,10 m de iniciada la perforación. En los primeros 0,40 m se encontró la cubierta vegetal, color carmelita oscuro, con raíces de plantas y algunos fragmentos de caliza crema de 1 mm - 3 mm de diámetro. Entre los 0,40 m y los 6,60 m se encontraron arcillas carbonatadas de color amarillento con algunos fragmentos de calizas dura de 0,5 mm - 4 mm de diámetro, se comprobó su reacción ante el HCl. Entre los 6,60 m y los 15,00 m se encontró nuevamente las arcillas carbonatadas pero esta vez de color pardo amarillento y plásticas, más compactas y con manchas de óxido de hierro, reaccionó fuertemente al HCl al 1%. A estas arcillas le sigue una capa de 0.60 m de argelita color gris verdoso, compacta, de grano fino y reaccionó ligeramente con el HCl. Desde los 15,60 m hasta los 19,80 m se observaron arcillas orgánicas de color negro y finalmente hasta los 20,00 m de perforación se localizaron los conglomerados de granos pequeños. Las rocas encontradas en esta cala pertenecen a la formación Miembro Pedernales.

CALA 10

La cala descrita fue perforada hasta los 30,00 m y el nivel freático fue encontrado en los 1.35 m de profundidad. Desde iniciada la perforación y hasta los 6,50 m se observaron calizas de color blanco y alta dureza, carsificada (con oquedades de

0,5 cm - 3 cm), algunas con material de calcita en su interior, con grietas verticales. Entre los 6,50 m-12,50 m se determinaron calizas de color blanco, muy dura, carsificada, organógenas y bastante agrietada con grietas rellenas por material arcilloso de color carmelita rojizo, las grietas prácticamente verticales. Hasta los 30,00 m de perforación se encontraron nuevamente las calizas de color blanco, de dureza alta, carsificadas, organógenas muy agrietadas y trituradas fundamentalmente al final de la cala lo cual constituye un indicio de la presencia de una falla.

CALA 11

La cala descrita se realizó a una profundidad de 20,00 m; no se logró encontrar el nivel freático durante dicha perforación. Desde los inicios de la perforación hasta los primeros 0,50 m se encontró la cubierta vegetal, además de arcillas poco plásticas de color oscuro con algunos fragmentos pequeños de caliza blanca (1 mm - 2 mm de diámetro) y raíces de plantas. Los restantes 19,50 m de espesor eran de margas de color amarillento, las cuales reaccionaron al contacto con el HCl al 1 %. Existían en estas algunas intercalaciones de caliza de dureza media de color crema además de la presencia de fósiles.

CALA 12

La cala fue perforada hasta los 40,00 m de profundidad y el nivel freático encontrado a los 5,05 m de iniciada la perforación. Desde el inicio de la perforación hasta los 0,50 m se encontraba la capa vegetal y arcillas poco plásticas de color carmelita oscuro con algunos fragmentos pequeños de caliza blanca (1 mm - 2 mm de diámetro) y raíces de plantas. Hasta los 7,40 m se localizaron arcillas con un poco de plasticidad y de color crema a gris verdoso. Mientras que entre los 7,40 m – 13,00 m se encontraron las calizas de color blanco crema algo porosa y con dureza de media a alta, existencia de grietas con buzamiento casi vertical. Durante los 13,00 m – 22,10 m se localizaron las arcillas de color amarillento y alta plasticidad, reacciona fuertemente con el HCl al 1 %. Desde los 22,10 m – 36,30 m se observaron calizas margosas de dureza media y color amarillento blancuzco que en profundidad pierde la tonalidad amarilla

intercalado con arcillas de color amarillento y alta plasticidad. En los últimos metros de perforación existencia de arcillas amarillentas intercaladas con calizas. Las litologías que se identificaron en dicha perforación pertenecen a la Formación Camazán.

CALA 13

La cala descrita fue perforada hasta los 170 m de profundidad y el nivel freático encontrado a los 18,10 m de perforación. Desde los inicios de la perforación y hasta los 30,00 m se encontraron calizas recristalizadas de color crema, grano fino y elevada dureza. Un poco meteorizada hasta los 3,50 m y carsificadas, reacción activa con el HCl al 1 %. En 3,90 m -13,40 m es masiva, en partes compactas, poco afectada por el carso, algunas oquedades de hasta 5 cm de diámetro, se recuperaron cilindros mayores de 1 m de largo. Desde 13,40 m existen cavernas de 10,00 cm – 20,00 cm, algunas rellenas de arcillas plásticas, la roca toma coloración amarillo crema. En toda la roca hay grietas, oblicuas, a veces manchadas por FeO. En 2,00 m - 3,90 m se reportó caída libre del instrumento de perforación y fuga total del líquido de perforación. A partir de los 30,00 m – 37,40 m se observaron calizas recristalizadas, color crema de grano fino a medio, elevada dureza, fosilífera, reacción activa con el HCl al 1 %, con oquedades vacías de hasta 3,00 cm de diámetro, existía desgarraduras de la roca en partes agrietadas. Dichas grietas eran oblicuas, subverticales, en otras masivas con algunos intervalos intercalados donde es fragmentada. Se recuperaron cilindros de hasta 40,00 cm de longitud.

Entre los 37,40 m y los 63,00 m de perforación se encontraron caliza poco cristalizada, algo porosa, de poca dureza, poco carsificada, menos densidad que la anterior, menos agrietada, fosilífera, granulometría de media a gruesa. Además de caliza recristalizada, que a los 45,00 m existía una caverna rellena de arcillas. Desde los 63,00 m – 80,00 m se identificaron nuevamente las calizas con igual color, fosilíferas, bastante carsificadas, fracturada y agrietada (ver Figura 12). De granulometría fina a gruesa, elevada dureza, reaccionó ante el HCl al 1 %, pero entre los 66,00 m existen arcillas rellenas una caverna.

Hasta los 121,00 m de perforación fueron encontradas las calizas porosas color crema, con granos de medio a grueso y dureza media, agrietadas, manchadas de óxido de hierro y con evidencia de circulación de agua. Esta a su vez se encontraba alternada con caliza recristalizada de color crema, menos agrietada que la anterior, pero con pequeños intervalos masivos, presentaron afectación parcial a severa de carso que se manifestó hasta los 121,00 m de perforación. Se comprobó su reacción activa ante el HCl al 1 %. Desde los 121,00 m – 122,00 m se observaron brechas tectónicas de color grisáceo con clastos muy angulosos de diferentes tamaños y litologías (predominan las tobas), unidos por una matriz de granulometría menor. Desde estos últimos metros perforados hasta los 125,00 m se encontraron las calizas organodetríticas de color blanco grisáceo y aspecto arenoso, roca porosa, de dureza baja y agrietadas. Aparecen nuevamente las brechas tectónicas con un espesor de 1,00 m y seguida de estas y hasta la profundidad de 152,00 m las calizas organodetríticas pero esta vez con un contenido de fósiles superior a las anteriores, de alta dureza, más compacta y pesada también presentó inclusiones de arcilla orgánica.

En los últimos 18,00 m de perforación se determinaron las brechas polimícticas de color grisáceo, con clastos de diversas litologías (tobas, diabasa, arcilla orgánica) de hasta 15,00 mm de largo intercaladas con calizas organodetríticas y gravelita muy compacta. Las brechas en profundidad tomaron un color gris oscuro y poseen clastos de hasta 4,00 cm de largo con abundante materia orgánica negra. Las litologías descritas en esta cala pertenecen a la formación Camazán.



Figura 12. Caliza algácea, fosilífera, masiva con grietas y oquedades que demuestran el curso desarrollado en el área de estudio.

CALA 14

La cala fue perforada hasta la profundidad de 10,00 m y no se registró el nivel freático durante la perforación. En sus inicios se encontró la cubierta vegetal de color pardo con algunos fragmentos pequeños de roca. Y durante el resto de la perforación se observaron microgabros de color gris con tonalidades verdosas, presenta grietas que se encuentran rellenas de CaCO_3 , presenta alta dureza y densidad. Reaccionó con el HCl al 1%, no constituye una roca acuífera ya que las grietas estaban rellenas.

Se logró plotear los puntos muestreados en el mapa de ubicación (ver **Figura 13**)

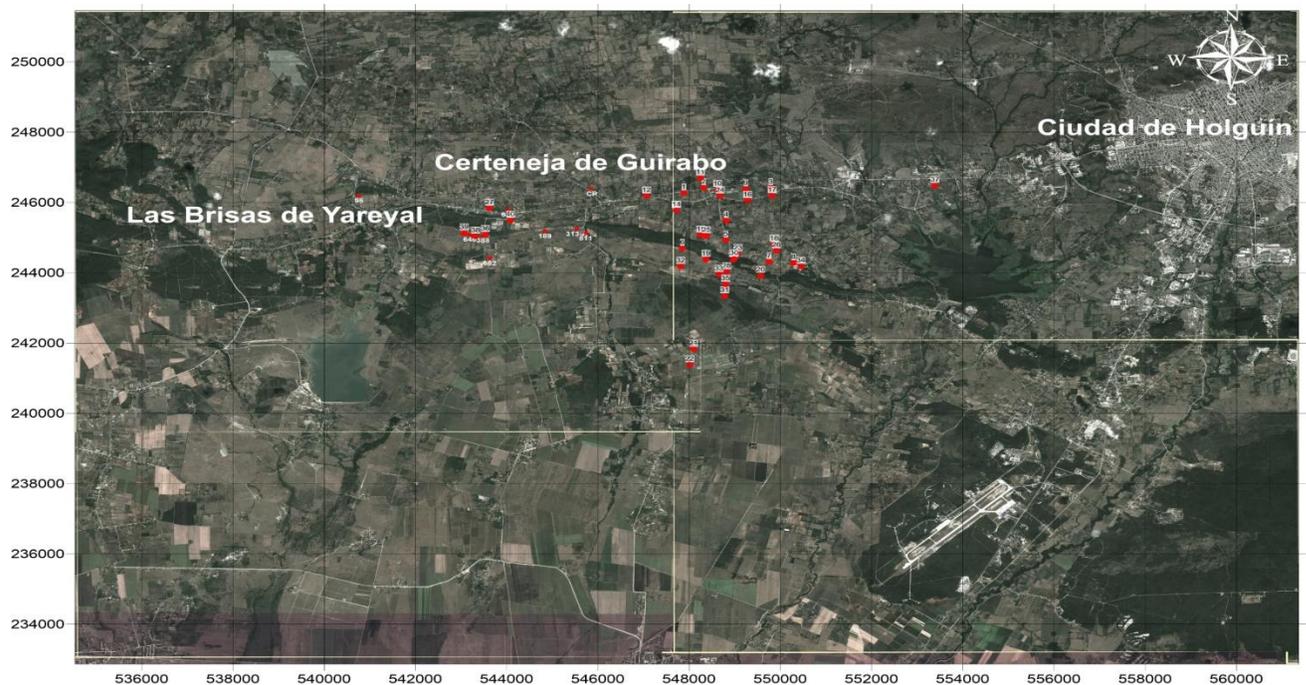


Figura 13. Mapa de ubicación de los puntos muestreados.

3.4 Caracterización del régimen y movimiento de las aguas subterráneas

3.4.1 Profundidad de yacencia de las aguas subterráneas en la zona de estudio

La profundidad de yacencia es muy importante, porque condiciona la mayor o menor posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas: mientras más profundas estén, existirá menor contaminación.

En la zona, la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas aumenta paulatinamente de norte a sur con valores que oscilan entre 5 y 20 metros de profundidad. Con el movimiento de las aguas subterráneas hacia el sur, se produce una disminución de las velocidades al circular éstas antes de llegar a los conglomerados por la Formación Vigía la cual está compuesta por tobos.

Existe una correspondencia entre el relieve y las cotas de nivel de las aguas, es decir que a niveles elevados de relieve se encuentran cotas elevadas de agua y viceversa. Las cotas con menores valores se encuentran hacia la parte sureste del área (ver Figura 14).

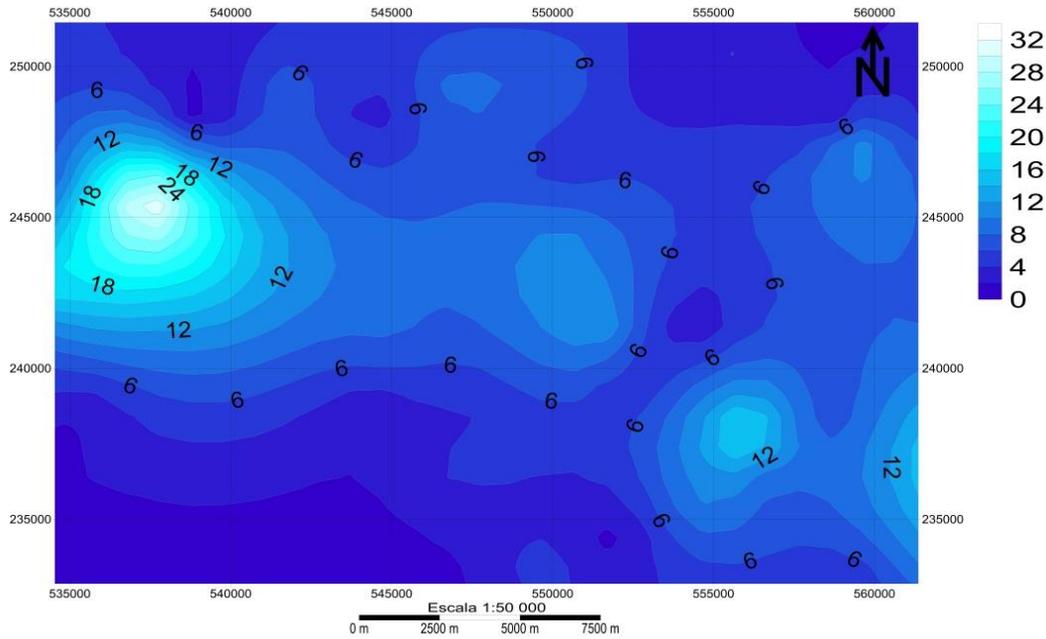


Figura 14. Mapa de profundidad de yacencia, escala 1: 50 000.

3.4.2 Fronteras hidrogeológicas

De la interpretación del mapa geológico, con sus fronteras litológicas y tectónicas, además del mapa de hidroisohipsas y profundidad de yacencia de las aguas así como los resultados arrojados durante las perforaciones se tiene que las fronteras hidrogeológicas del área perspectiva son: al norte limita con la Formación Vigía que a la vez subyace (se encuentra por debajo) a la Formación Camazán, al sur con la falla que se denomina Los Arroyos-Certenejas – Tacajó (falla F-II) que constituye una frontera impermeable, pues separa a las calizas de la Formación Camazán de las arcillas carbonatadas de la Formación Paso Real, al este una falla supuesta de dirección norte–noreste y sur sureste y al oeste la falla discontinua de dirección noreste- sureste (ver Figura 15).

En profundidad, la frontera hidrogeológica se constituye convencionalmente por rocas volcánicas en partes recrystalizadas.

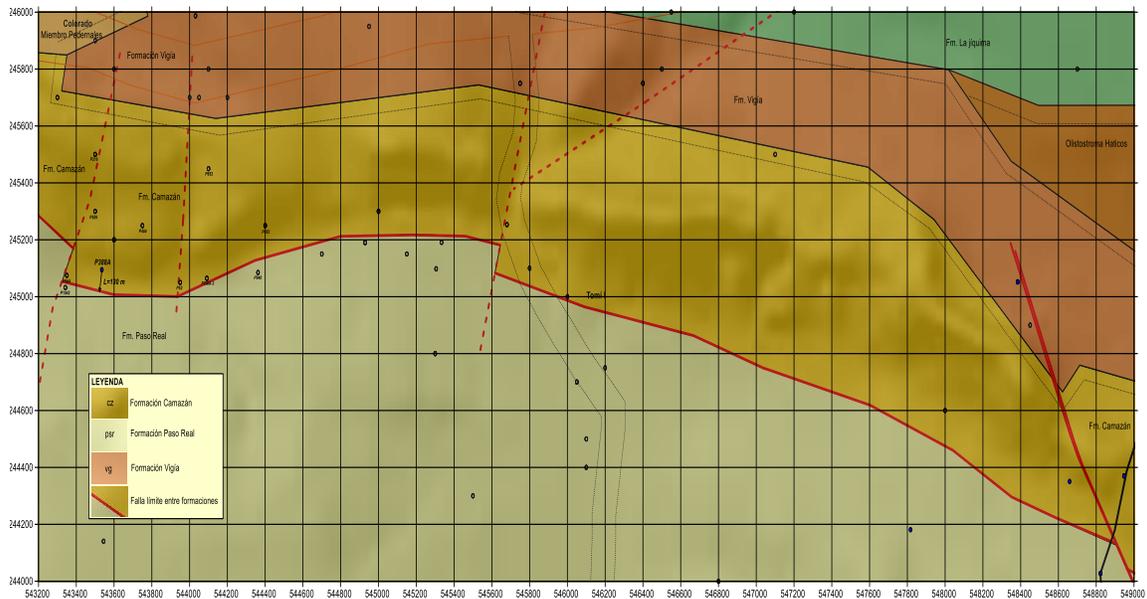


Figura 15. Esquema de las fronteras hidrogeológicas en el área de estudio, escala 1: 50 000.

3.4.2 Fuente de alimentación y potencia acuífera

La fuente de alimentación principal del acuífero la constituyen las precipitaciones atmosféricas, que llegan hasta el contacto del miembro Pedernales con la Formación Camazán, en esta franja se produce la infiltración, se efectúa la circulación del agua a través de las fallas. Principalmente y parcialmente, por los conglomerados que constituyen el basamento de las calizas agrietadas, donde ocurre la acumulación de las aguas subterráneas en el contacto entre la Formación Camazán y la Formación Paso Real. Estas dos últimas, en contacto tectónico en la zona de estudio, definido por la falla Los Arroyos-Certenejas-Tacajó (falla F-II), donde las aguas son retenidas puesto que, la Formación Paso Real está compuesta fundamentalmente por facies arcillosas, con existencia de poca descarga por esta zona.

La potencia acuífera promedio en la zona alcanza los 40 m, se escoge producto a las descripciones litológicas de las calas que se perforaron, por los resultados de los trabajos geofísicos además de las propiedades de filtración que se obtuvieron en las calas, en las cuales, por debajo de los 40 m de profundidad aparecen las calizas con poca fracturación y sin carsificación. Los coeficientes de filtración de estas rocas son pequeños (0-0.050 m/día).

3.4.3 Dirección del flujo

Al observar el plano de hidroisohipsas es notorio que las aguas subterráneas se mueven tendencialmente hacia las zonas afectadas por las fallas, en la zona norte, de donde proviene la alimentación. El movimiento predominante de las aguas subterráneas es de noreste a suroeste en el miembro Pedernales, y en la formación Camazán es predominantemente de norte a sur (ver Figura 16).

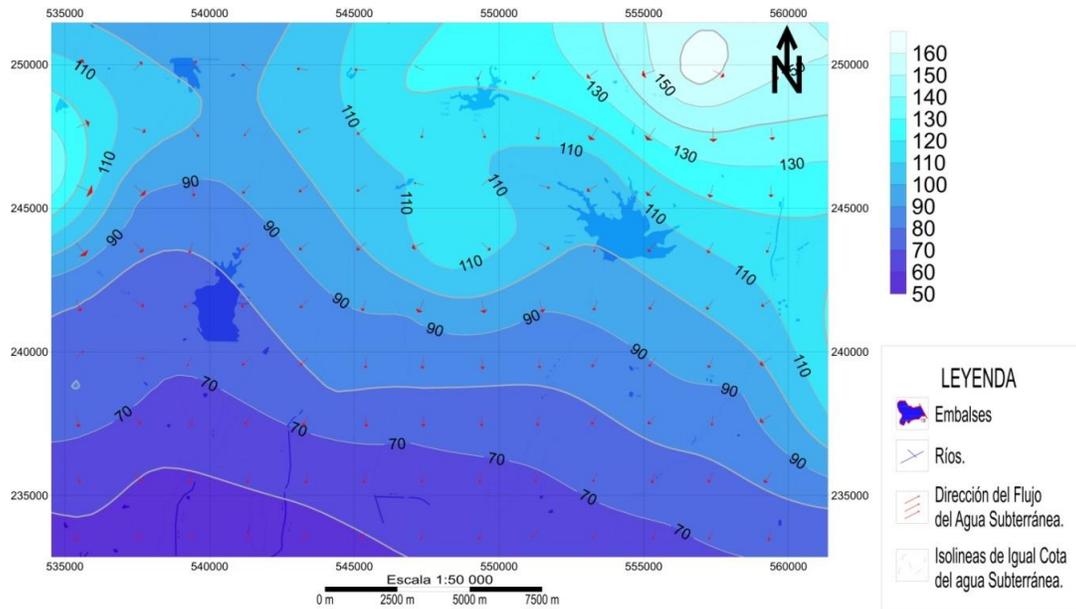


Figura 16. Mapa de hidroisohipsas, escala 1: 50 000.

Existe una correspondencia entre el relieve y las cotas de nivel de las aguas, es decir que a niveles elevados de relieve se encuentran cotas elevadas de agua y viceversa. Los mayores valores de cotas se localizan en los complejos E9 (Intrusivos básicos del Cretácico-Jurásico (asociación ofiolítica)), E8-7 (Ultrabásicas metamorfizadas del Cretácico- Jurásico), el C2-4 (Clástico Carbonatado del Paleógeno - Cretácico) y la parte más occidental del B4-2 (carbonatado clástico del Neógeno), tal y como se muestra en la (ver Figura 17).

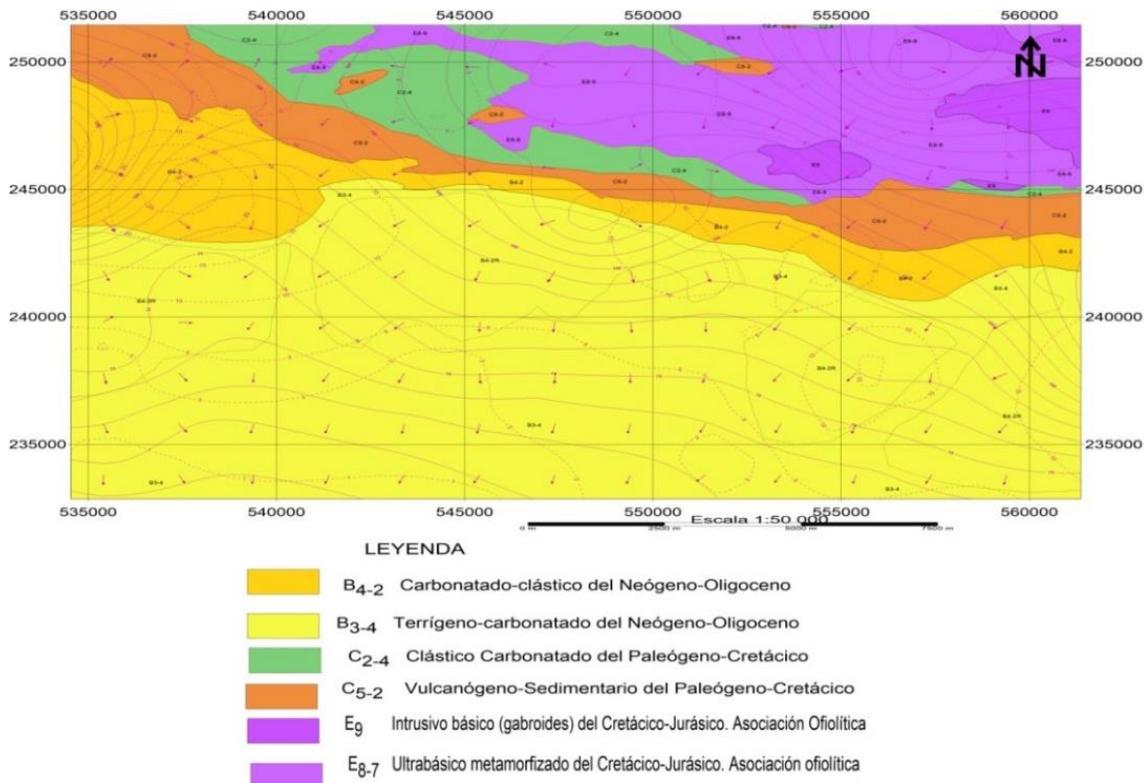


Figura 17. Mapa hidrogeológico del área de estudio, escala 1: 50 000.

Las cotas con menores valores se encuentran hacia la parte sureste del área. Mientras que los gradientes hidráulicos calculados en la porción centro-norte del área perspectiva son de 0.016 en el oeste, la zona sur y hacia el arroyo La Ceiba. Hacia la zona de la falla Los Arroyos-Certenejas–Tacajó (F-II) es de 0.04, mientras que, al norte, donde ocurre la alimentación en la zona de los conglomerados, el gradiente es de 0.0124.

3.5 Análisis de las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas de las aguas subterráneas.

Seguidamente se caracterizan las aguas subterráneas a partir de la Norma Cubana del 2017, referenciadas como NC 827: 2017 : Agua potable- Requisitos sanitarios. Para la clasificación de estas aguas se utilizan las propuestas por Aliokin y E. B. Pasovox.

3.5.1 Mineralización (mg/L)

En el área, los valores de las mineralizaciones oscilan entre los 0,6 mg/L y 3,8 mg/L, encontrándose los valores más bajos hacia la zona oeste del área y

clasificándose como aguas dulces y pocas salinizadas, mientras que en la zona sureste se observan los valores más altos que se clasifican como aguas poco salinizadas y en menor grado saladas según Aliokin (ver Figura 18).

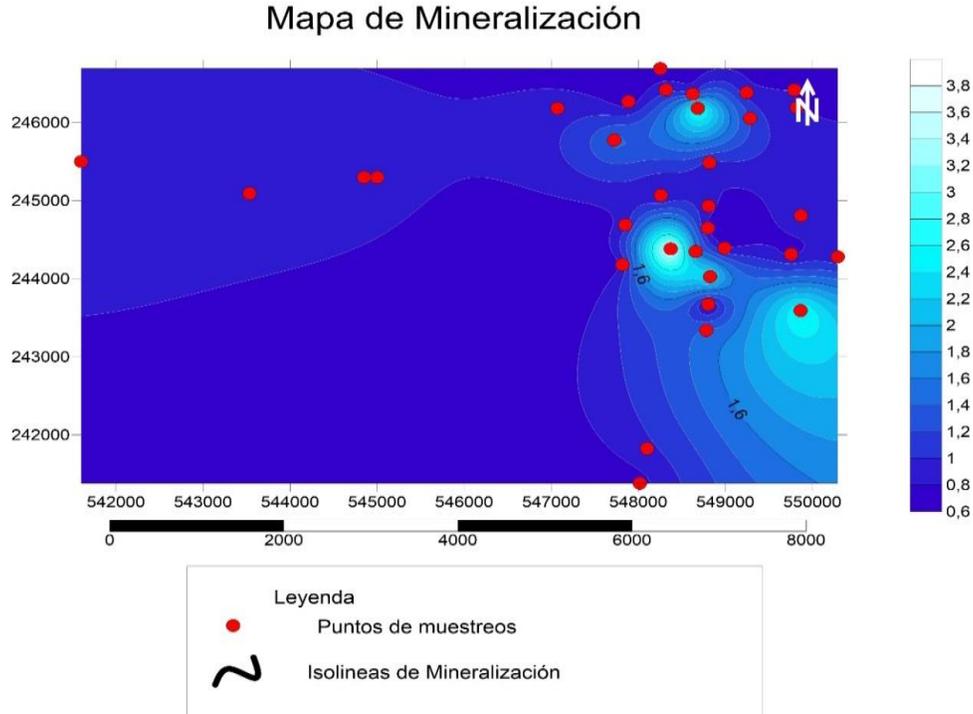


Figura 18. Mapa de mineralizaciones del área perspectiva, escala 1:50 000.

3.5.2 Conductividad eléctrica (µs/cm)

La conductividad es la capacidad del agua para conducir la electricidad, depende del grado de mineralización de las aguas, con el aumento de la mineralización también aumenta la conductividad eléctrica. Sus valores oscilan entre los 500 µs/cm y 8500 µs/cm, correspondientes a su mínimo y máximo respectivamente. Se encuentran valores más bajos hacia la zona oeste del área, mientras que en la zona sureste se observan los valores más altos (ver Figura 19).

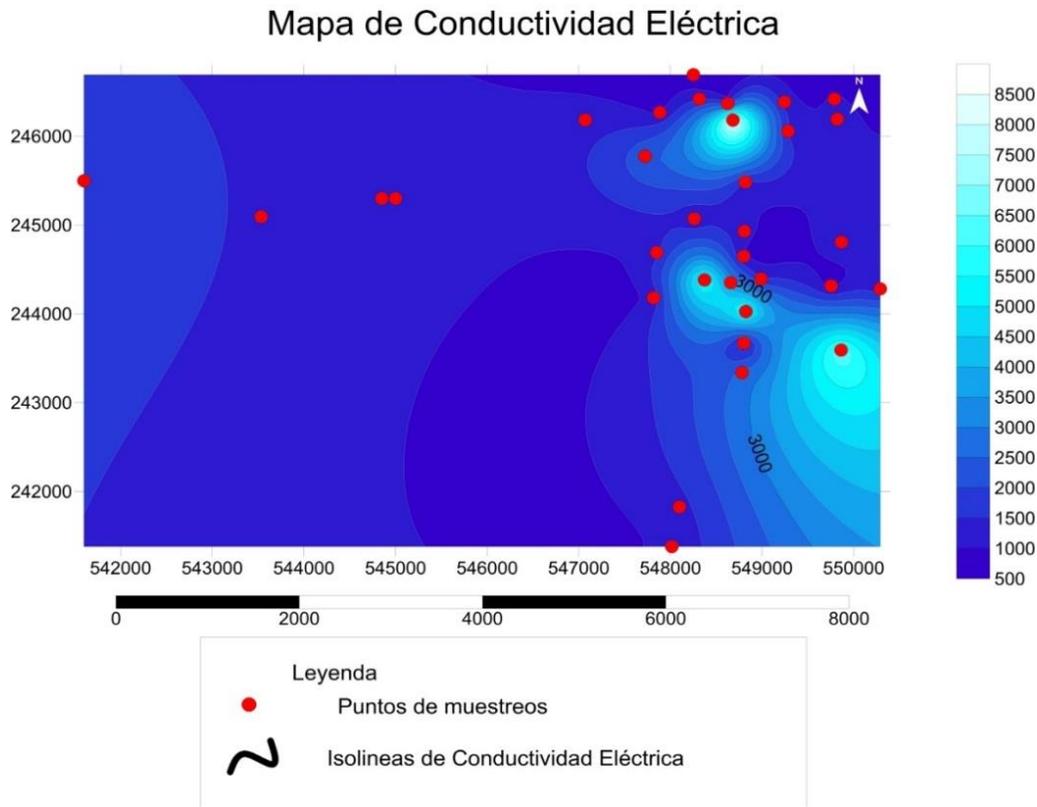


Figura 19. Mapa de conductividad eléctrica del área perspectiva, escala 1:50 000.

3.5.3 Dureza Total (mg.eqv/L)

Está representada por el contenido total de sales de calcio y magnesio, presentes en las aguas subterráneas y expresadas en mg.eqv/L. El área presenta valores entre 1,35 mg.eqv/L y 32 mg.eqv/L, (ver Figura 20), según se clasifican en aguas duras pues la mayoría de las muestras presentan valores entre los 3,0 mg.eqv/L y 6,0 mg.eqv/L.

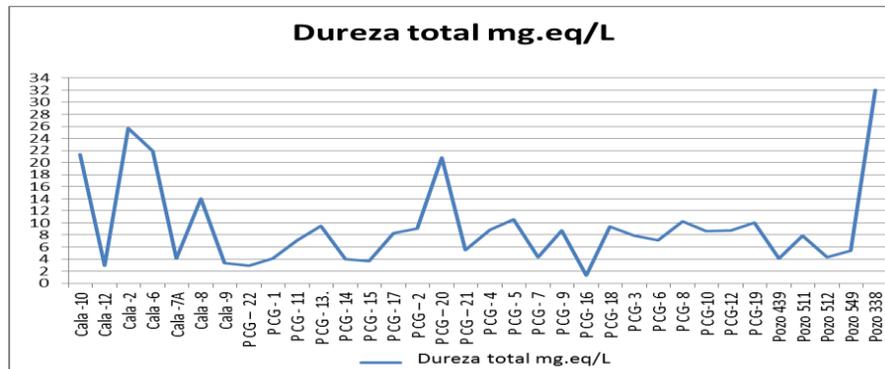


Figura 20. Gráfico de contenido de dureza (mg.eqv/L).

3.5.4 Nitrito (NO_2^-) mg/L

El nitrito es un ion de origen natural que forma parte del ciclo del nitrógeno, las concentraciones de este suelen ser baja en aguas subterráneas y superficiales. Los valores oscilan desde menores que cero hasta los 0,4 mg/L, las concentraciones superiores se localizan en la porción noreste del área mientras que los valores de menor rango se señalizan con el color azul fuerte con mayores manifestaciones en la porción noroeste y sureste. En correspondencia con la norma cubana NC 827: 2017 se determinó que no son admisibles pues existen muestras con concentraciones por encima de las permisibles (0,01 mg/L), los mismos fueron alterados por un exceso de abonos de los suelos agrícolas, pues en la zona se desarrolla la principalmente la agricultura (ver Figura 21).

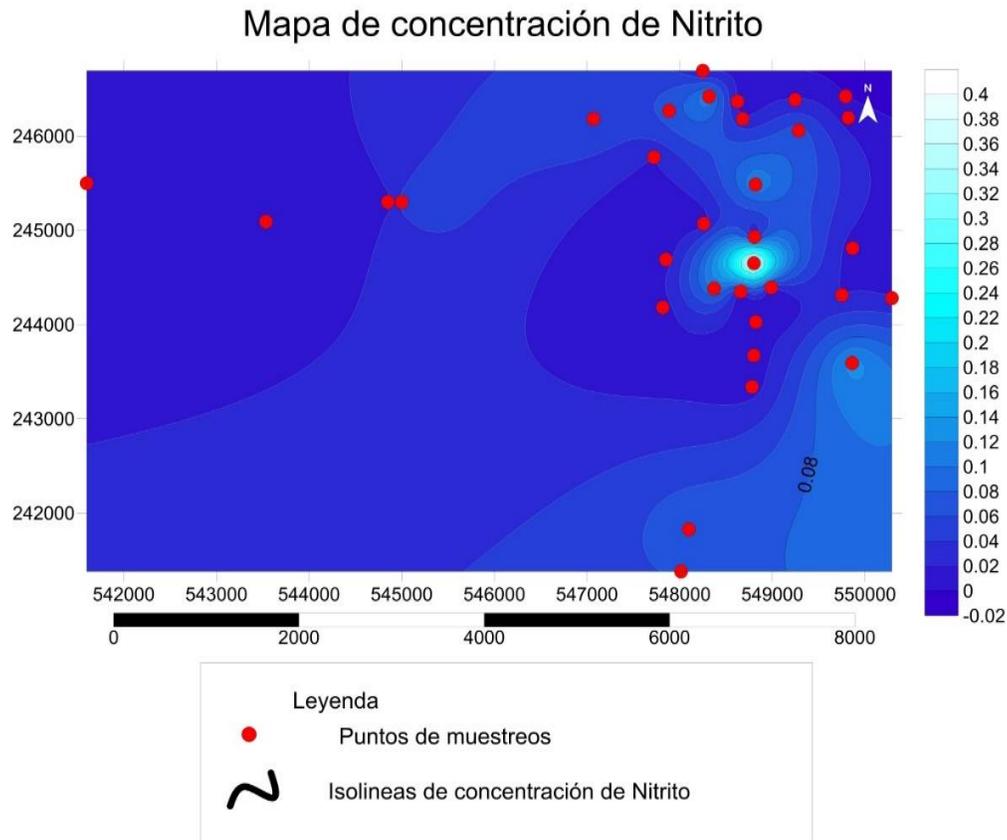


Figura 21. Mapa de contenido de nitrito expresado en mg/L, escala 1:50 000.

3.5.5 Nitrato (NO_3^-) mg/L

Al igual que los nitritos, es un ion de origen natural que forma parte del ciclo del nitrógeno. Varían desde los 0 mg/L hasta los 85 mg/L, y los mayores valores se localizan en la porción noreste que lo representa el color azul claro. Al evaluar los resultados químicos de las muestras analizadas por la norma cubana NC 827: 2017 denota que las muestras de las calas 2, 6, 8, 9, 10, 12, los pozos 439, 511, 512, 549 y los PCG-3, 6, 7, 11, 15, 16, 19, 20, 21 y 22 cumplen con la norma (45 mg/L) y las muestras PCG-1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 14, 17 y 18 están por encima del límite de la norma (ver Figura 22). Esto lo propician los abonos que emplean en la agricultura que se desarrolla en el área.

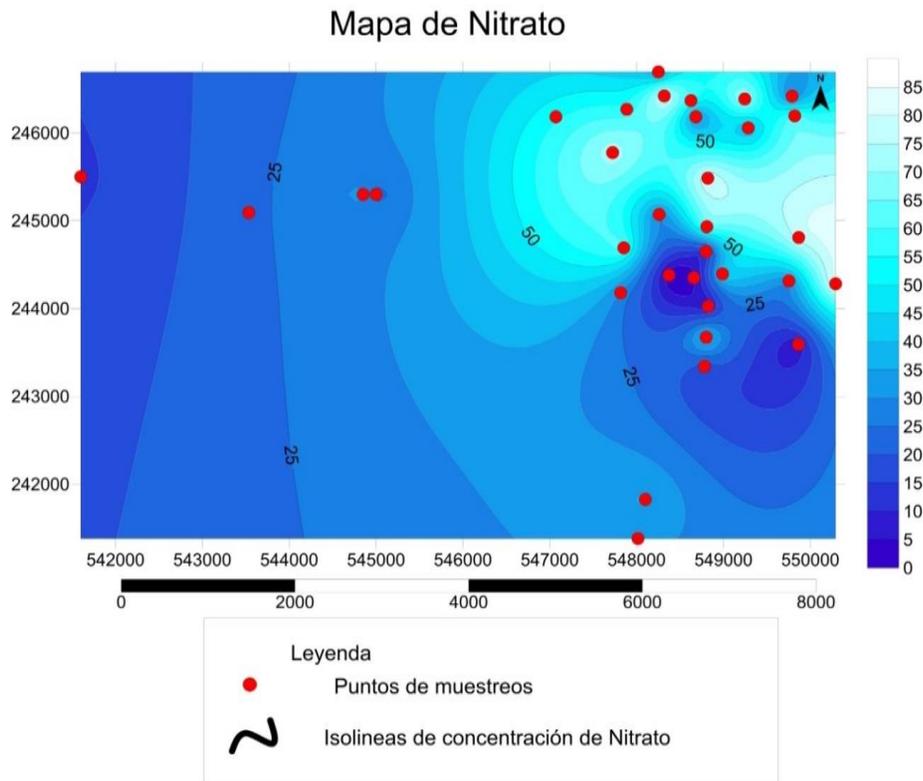


Figura 22. Mapa de contenido de nitrato expresado en mg/L, escala 1:50 000.

3.5.6 pH

Se debe al equilibrio carbónico y a la actividad vital de los microorganismos acuáticos. Los datos de pH obtenidos evidencian que existe una variación en los valores desde 6,9 a 7,9 correspondientes a los valores mínimos y máximos respectivamente. En correspondencia con la norma cubana NC 827: 2017 las

muestras analizadas se encuentran en los parámetros permisibles de la misma (6,5 - 8,5) con excepción de la cala 7A que sobrepasa los límites con valor de 8,67. De acuerdo a la clasificación de Pasovox, se clasifican en aguas neutras por presentar valores entre los 6,5 hasta 8,5 (ver Figura 23) con un color azul fuerte, con mayor representación en la porción noreste y sureste del área.

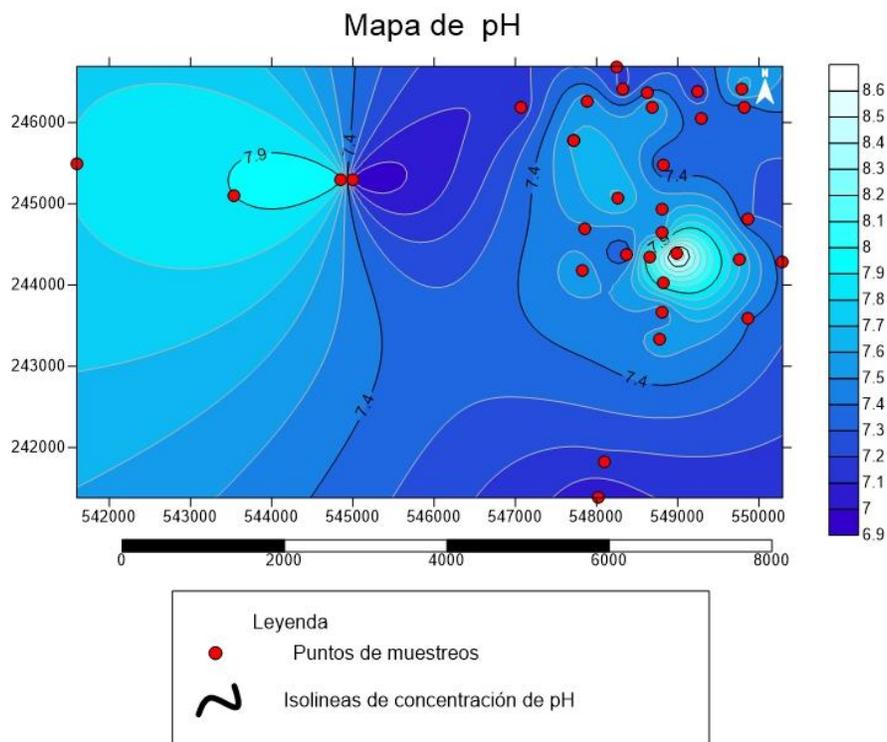


Figura 23. Mapa de pH, escala 1:50 000.

3.5.7 Sulfato (SO_4^{2-}) (mg/L)

Los sulfatos son sales solubles en agua, por lo cual es notable su presencia en las aguas naturales con un amplio intervalo de concentraciones. Los contenidos de sulfatos en todas las muestras se encuentran por debajo del límite admisible (400,00 mg/L) que establece la norma cubana NC 827: 2017. Los valores oscilan entre 15 mg/L y 145 mg/L correspondiente al mínimo y máximo respectivamente (ver Figura 24).

Mapa de concentración de Sulfatos

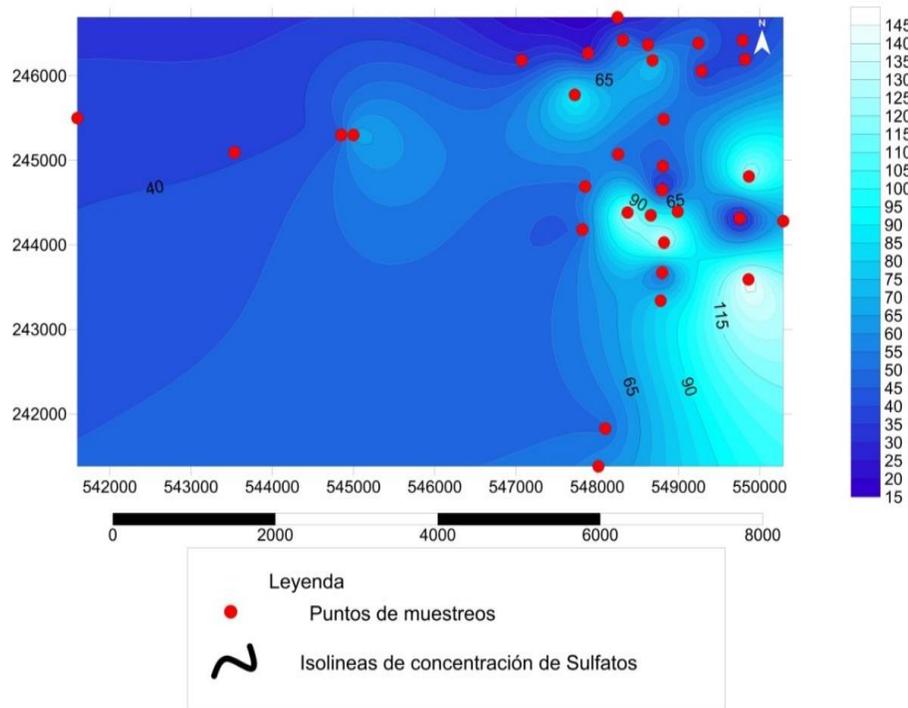


Figura 24. Mapa de contenido de sulfatos expresado en mg/L, escala 1:50 000.

3.5.8 Turbidez (NTU)

La turbidez es la medida que determina la claridad del agua, es decir que permite conocer el grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Las muestras analizadas se encuentran por debajo del límite máximo admisible de la norma cubana NC 827: 2017 con un valor de 5 NTU. Los valores de turbidez oscilan entre 1,00 NTU y 4,00 NTU correspondiente a un mínimo y a un máximo respectivamente (ver Figura 25).

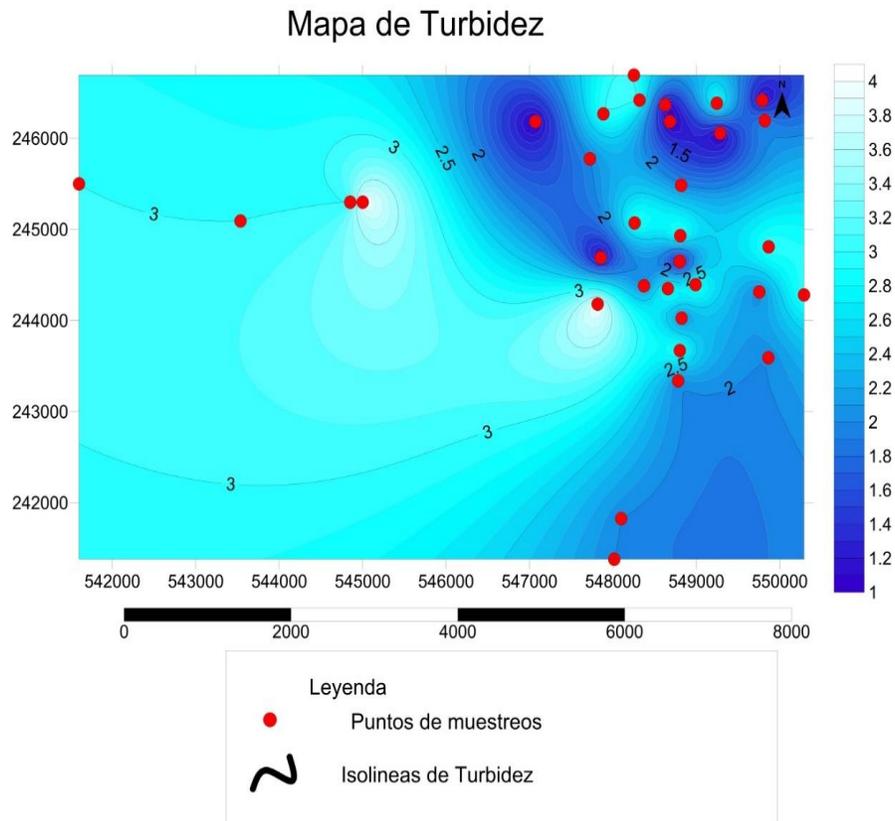


Figura 25. Mapa de turbidez expresado en (NTU), escala 1:50 000.

3.5.9 Carbonatos (CO_3^{2-}) e Hidrocarbonatos (HCO_3^-) (mg/L)

Los hidrocarbonatos no se consideran perjudiciales para la salud. Los resultados obtenidos para los hidrocarbonatos oscilan entre 7,3 mg/L y 518 mg/L y los valores de carbonatos presentan valores de 0 mg/L con excepción de la cala 7A que tiene un valor de 54 mg/L por presentar un pH de 8,67 lo que favorece la estabilidad del CO_3^{2-} (ver Figura 26).

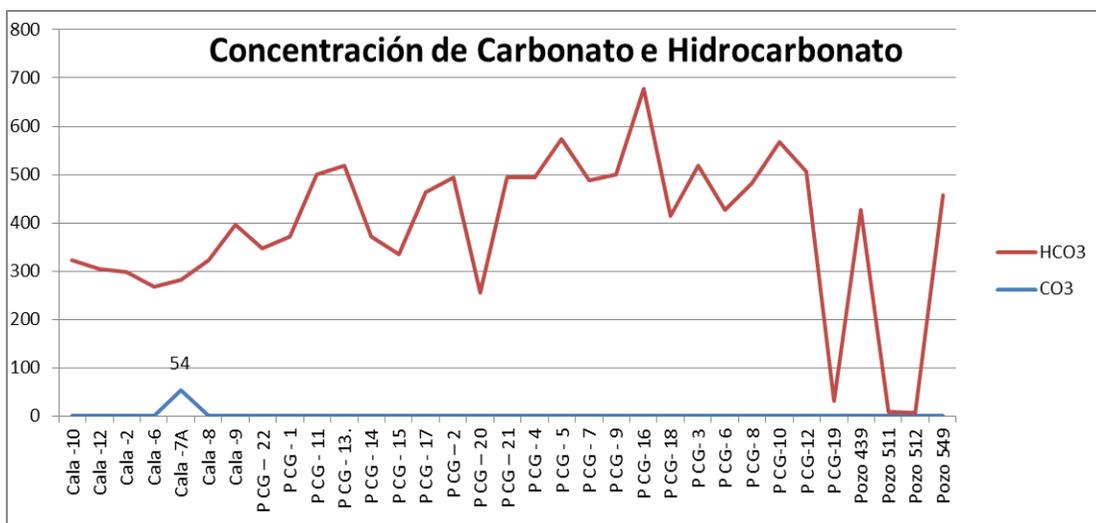


Figura 26. Gráfico de contenido de carbonato e hidrocarbonato.

3.5.10 Concentración de Calcio (Ca²⁺) y Magnesio (Mg²⁺), (mg/L)

Los valores de calcio (Ca²⁺) analizados en las muestras oscilan entre 4 (mg/L) y 230 (mg/L) encontrándose estos valores por debajo de los límites permisibles establecidos en la norma cubana NC 827: 2017(200,00 mg/L), por lo que se consideran aguas con buena calidad.

En el magnesio (Mg²⁺) sus valores oscilan desde 2 mg/L a 244 mg/L, según la norma cubana NC 827: 2017, presenta valores por encima del límite máximo admisible (150,00 mg/L) que establece dicha norma (ver Figura 27).

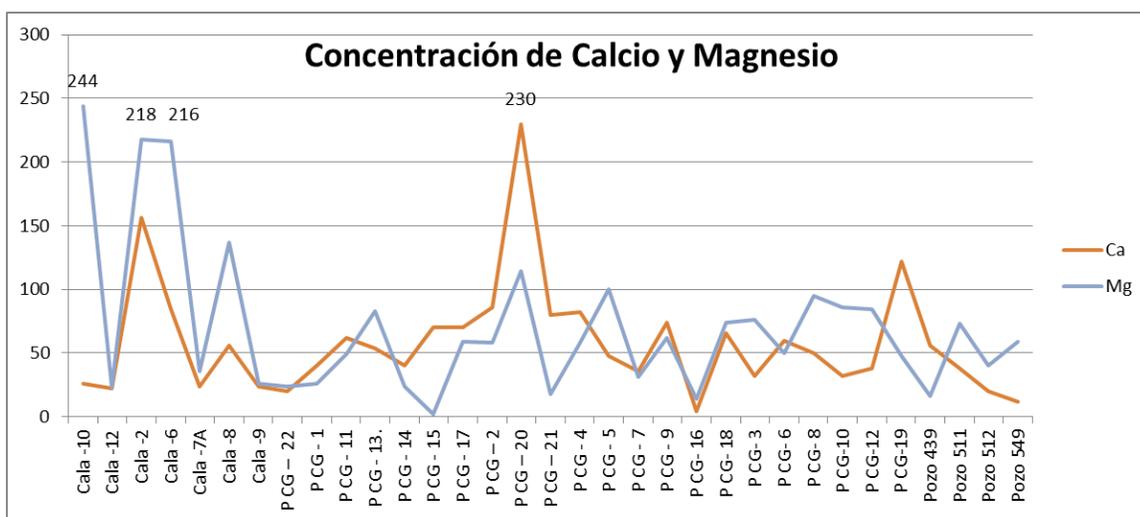


Figura 27. Gráfico de contenido de calcio y magnesio.

3.5.11 Concentración de Sodio (Na^{2+} , mg/L) y Cloruros (Cl^- , mg/L)

El sodio (Na^{2+}) es un elemento abundante que se encuentra en la litosfera en forma de sales diversas. Las muestras de las calas 2, 6, 8, además del PCG-13, 16, 19 y 20 se encuentran por encima del límite permisible que establece la norma cubana NC 827: 2017(200,00 mg/L). Los valores varían entre 41 mg/L y 593 mg/L correspondientes a su mínimo y máximo respectivamente.

El ión cloruro es uno de los iones inorgánicos que se encuentran en mayor cantidad en aguas tanto naturales como residuales. En correspondencia con el límite permisible que establece la norma cubana NC 827: 2017 (250,00 mg/L) las muestras de la cala 2, 6, 8, PCG-13, PCG-19 y PCG-20 sobrepasan este límite (ver Figura 28).

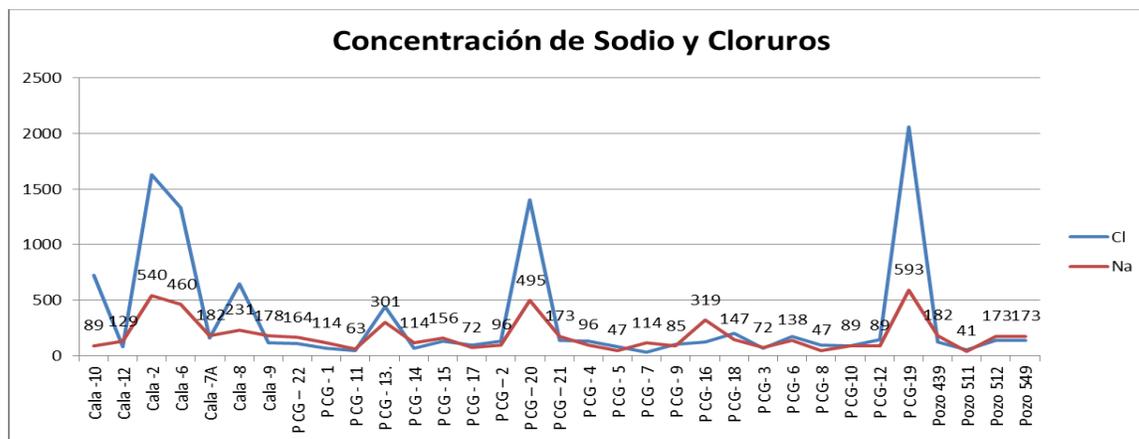


Figura 28. Gráfico de contenido de sodio y cloruros.

3.5.12 Coliformes totales y coliformes termotolerantes

Los coliformes totales son un grupo de microorganismos que se encuentran comúnmente en el suelo, aguas en la superficie y en las plantas, también están presentes en los intestinos de animales y humanos.

Los valores de coliformes totales en las 34 muestras estudiadas oscilan entre 2,00 NMP/100 mL y 70,00 NMP/100 mL correspondiente a un mínimo y a un máximo respectivamente. Según la norma cubana NC 827: 2017 (< 2 NMP/100 mL), los coliformes totales se encuentran por encima de los rangos permitidos en las 34 muestras analizadas.

Los coliformes termotolerantes en las muestras analizadas varían de 2,00 NMP/100 mL a 50,00 NMP/100 mL es decir que en correspondencia con la norma cubana NC 827: 2017 (< 2 NMP/100 mL) se encuentran por encima de los rangos permitidos. Estas altas concentraciones de coliformes es producto de la cercanía de la mayoría de las muestras a corrales de animales (ver Figura 29).

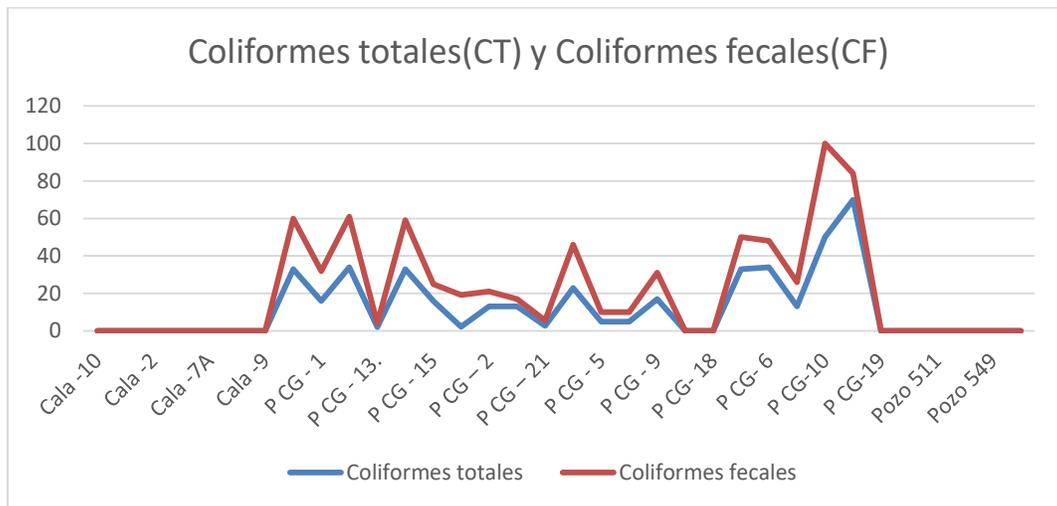


Figura 29. Gráfico de contenido de coliformes totales y termotolerantes.

3.5.13 Métodos para el tratamiento de las aguas

A continuación se exponen los principales métodos que se utilizan para la purificación de las aguas que presentan contenidos de nitrato, nitrito, cloruro, sodio, coliformes totales, coliformes fecales y dureza total, los cuales se encuentran por encima de los límites máximos admisibles de la Norma 827:2017.

Lo recomendable ante presencias de estas aguas con alto contenido de nitratos, nitritos, cloruro y sodio es utilizar la ósmosis inversa, la cual es una tecnología que se destaca por la mejora en el sabor del agua. En la ósmosis inversa, utiliza alta presión para forzar el agua a través de una membrana mientras que las impurezas se quedan retenidas. En otras palabras, la alta presión hace que las impurezas sean retenidas de un lado de la membrana. Solo el agua pura es capaz de atravesar la membrana; incluso las impurezas disueltas (sales y minerales) que no se pueden eliminar por filtración convencional son capturadas y eliminadas por el sistema de purificación de ósmosis inversa.

La dureza en el agua se genera como consecuencia de la presencia de ciertas sales en el agua. Los iones presentes en un agua dura son Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}) y bicarbonatos (HCO_3^-). Estos iones o minerales son los causantes de la formación de depósitos en las tuberías y demás equipos utilizados en los sistemas de agua potable y de agua de proceso, estas altas concentraciones en las aguas de la dureza se pueden contrarrestar a través de uso de los ablandadores son intercambiadores de iones específicos los cuales están diseñados para eliminar los iones con múltiples cargas positivas. Se utiliza un tanque que se llena con una resina de intercambio iónico, cargado negativamente. Cuando el agua pasa a través de la resina de intercambio iónico, los iones de dureza, que llevan una carga positiva fuerte, desplazan a los iones de sodio más débilmente cargadas. Los iones de dureza (calcio y magnesio) son así atrapados a través de la atracción electromagnética de las partículas de resina. Los lechos de intercambio iónico son entonces limpiados y regenerados, a intervalos determinados en función del volumen de agua de forma automática. El proceso de regeneración implica inundar la cama con una solución salina (sodio) sobresaturada que barre de manera efectiva los iones de dureza dejando a la resina lista para el siguiente ciclo de suavización del agua. La dureza no es un problema que afecte a la salud humana, pero causa problemas de incrustaciones en tuberías, membranas de ultrafiltración / ósmosis inversa y depósitos.

Debido a que los contenidos de Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF) sobrepasan los límites máximos admisibles de la Norma 827:2017, se recomienda emplear la cloración de estas aguas, ya que es un medio sencillo y eficaz para desinfectar el agua y hacerla potable. Consiste en introducir productos clorados (pastillas de cloro, lejía, etc.) en el agua para matar los microorganismos en ella contenidos. Tras un tiempo de actuación de unos 30 minutos, el agua pasa a ser potable. Gracias al efecto remanente del cloro, continúa siéndolo algunos días (en función de las condiciones de almacenamiento).

3.6 Evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas del área La Ceiba-Certeneja de Güirabo, Holguín.

Para realizar una buena evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas en un área determinada, es necesario tener presente que estas aguas, están en combinación con un conjunto de elementos que forman parte del ciclo hidrogeológico y que, a su vez, no todos se encuentran representados en determinadas condiciones. Se encuentra en dependencia de la existencia o no de red hidrográfica, entre otros factores. Es por ello que el cálculo que se realice de las reservas de explotación debe estar bien fundamentado.

3.6.1 Fundamentación del cálculo de reservas de aguas subterráneas

Una vez establecidas las fronteras hidrogeológicas se realizó el cálculo de las reservas dentro del sector de estudio, fue seleccionada el área más perspectiva, correspondiente a las calizas de la Formación Camazán, afloran en la parte sur del sector con un área de 3,4 km², donde se contemplan la zona de alimentación y la zona de acumulación, no estimándose la zona de descarga, ya que existe muy poca salida de las aguas subterráneas hacia el sur.

Para el cálculo de las reservas de aguas subterráneas, se utilizó el método Hidrodinámico con la finalidad de definir el abatimiento permisible en la zona de acumulación de las aguas subterráneas, en este caso calizas organógenas agrietadas y carsificadas, con el cual se satisface la extracción de un volumen determinado del líquido. Mientras que con la implementación del método de Balance se evalúan las reservas de explotación fundamentadas con la utilización de ecuaciones de balance, que relacionan las reservas de explotación (parte del caudal de balance) con todas las fuentes que forman estas reservas (parte de entrada del balance).

Los datos con los que se realizaron los cálculos pertinentes fueron los arrojados en el aforo al pozo 388A, fue el que se escogió como el gran pozo.

3.6.2 Cálculo de reservas de aguas subterráneas por el método hidrodinámico

El esquema que se eligió para realizar el cálculo está en correspondencia con las fronteras hidrogeológicas establecidas, así como el límite impermeable determinado (ver Figura 30).

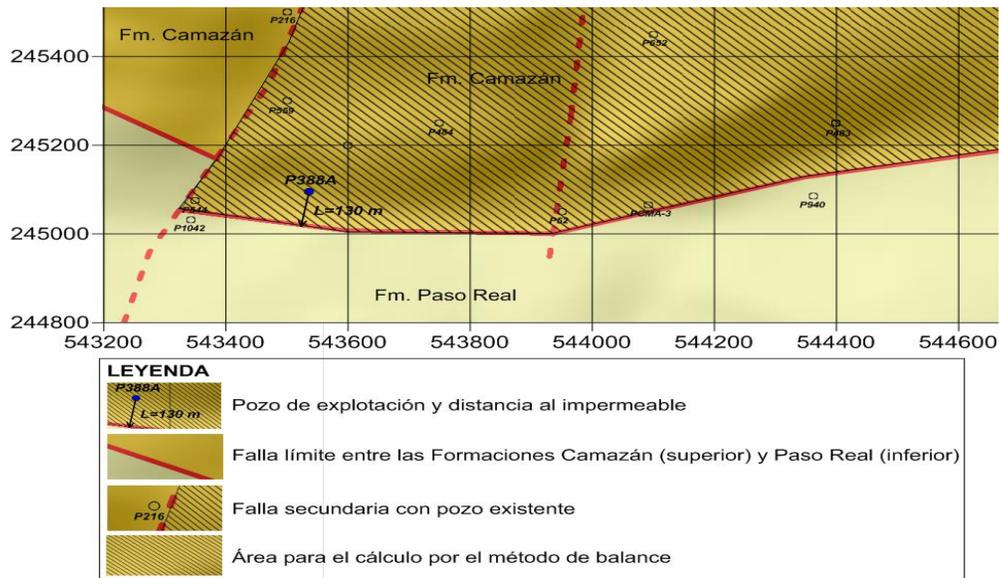


Figura 30. Esquema del cálculo de reservas por el método hidrodinámico, escala 1: 50 000.

La formulación que se empleó está en función del abatimiento, pero como el objetivo de dicho cálculo es determinar el caudal de explotación del sistema de pozos, entonces despejamos el caudal (Q) de la fórmula escogida. Por conversión para acuíferos freáticos, el contenido de la expresión en el nominador será constante y solo variará el denominador en correspondencia con las magnitudes que se sitúan bajo el signo de logaritmo.

El caso escogido corresponde a un acuífero con un límite que puede ser considerado impermeable que plantea que:

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}} \quad (\text{De Miguel Fernández, 2008})$$

Dónde:

S= Descenso admisible de explotación (25,00 m) $S = 0,5 H$ (es considerado $\frac{1}{2}$ de la potencia acuifera)

H= Potencia acuifera (50,00 m)

K= Coeficiente de filtración (7,00 m/día)

a= conductividad de nivel (m^2/dia)

t= tiempo asumido para la explotación (27,4 años = 10 000 días)

L= Distancia del pozo 388^a al impermeable (130 m)

r= radio del gran pozo (m)

Se despeja el caudal (Q) de la ecuación principal:

$$1. \quad S - H = -\sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}}$$

$$2. \quad H - S = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}}$$

$$3. \quad (H - S)^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}$$

$$4. \quad (H - S)^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}$$

$$5. \quad (H - S)^2 - H^2 = -\frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}$$

$$6. \quad -2HS + S^2 = -\frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}$$

$$7. \quad 2HS - S^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{1,13at}{rL}$$

$$8. \quad Q = \frac{(2HS - S^2)\pi k}{\ln \frac{1,13at}{rL}}$$

Sustituyendo los valores en el despeje resultante

$$9. \quad Q = \frac{(2*50,00*25,00 - 25,00^2)3,14*7,00}{\ln \frac{1,13*1158,94*10000}{0,25*130,00}}$$

$$10. \quad Q = 1821,14 \text{ m/d}$$

11. $Q = 20,51 \text{ L/s}$

Para calcular la conductividad de nivel en acuíferos freáticos, se realizó por la fórmula siguiente:

12. $a = K \cdot H_m / \mu$ (De Miguel Fernández,2008)

13. $a = 7,00 \text{ m/día} \cdot 25,00 \text{ m} / 0,151$

14. $a = 1158,94 \text{ m}^2/\text{dia}$

Dónde:

K= Coeficiente de filtración (7,00 m/día)

Hm= Potencia acuífera media (25,00 m)

μ = coeficiente de almacenamiento (0,151)

3.6.3 Cálculo de reservas de aguas subterráneas por el método de balance

Para aplicar el método de balance se utilizó las informaciones registradas en el pozo de sistemática 95 (es el pozo al cual se le realizan las mediciones de los niveles) y del pluviómetro 827 cercano, para determinar la cuantía y los recursos de las aguas subterráneas por el método de balance en el área de estudio. Con este cálculo se procuró establecer los recursos de explotación en esta zona, de modo que, se asegure su aprovechamiento más eficiente y uso racional (ver Figura 31).

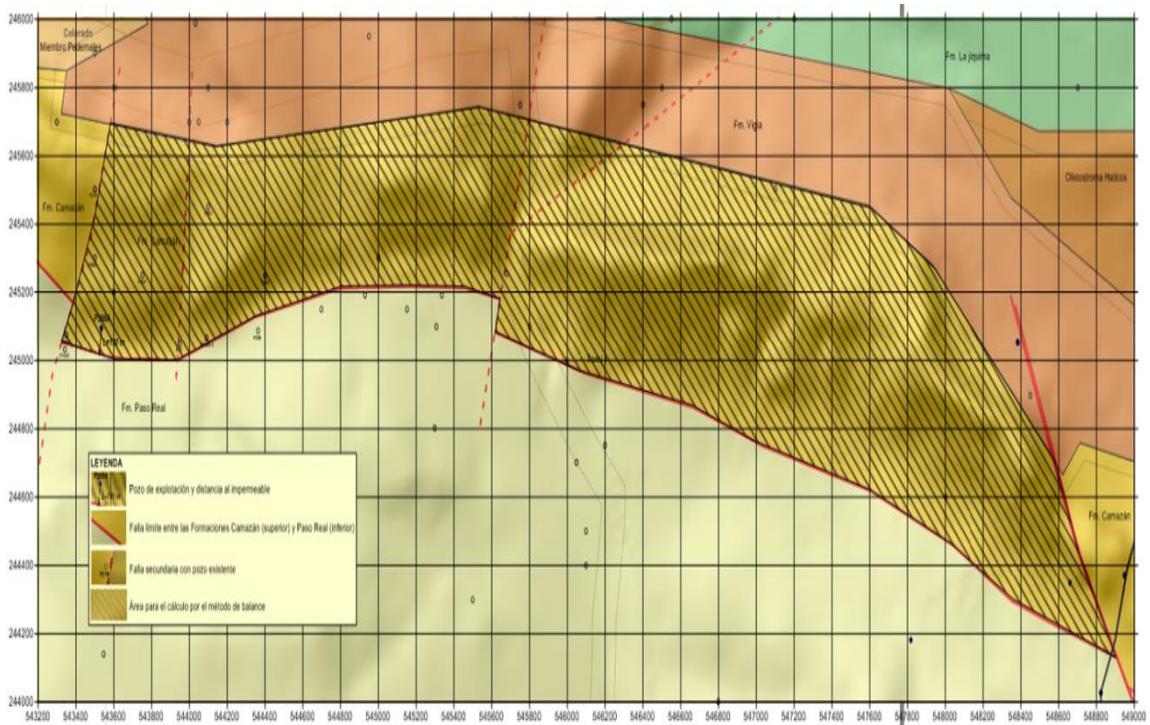


Figura 31. Esquema del cálculo de reservas de aguas subterráneas por el método de balance, escala 1: 50 000.

3.6.3.1 Variable Lluvia

Del análisis de los datos de lluvias, se obtuvo que la media anual en el período de cálculo de (2007- 2017) es de 1181,59 mm, encontrándose las lluvias anuales máximas en el año 2007 con un valor de 1980.80 mm y las mínimas con valor 925,60 mm en el año 2013. Esto evidencia el descenso de ocurrencia de las lluvias al transcurrir de los años (ver Tabla 6).

Tabla 6. Registro de las lluvias en mm del pluviómetro 817

Años	Meses												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
2007	63,30	56,60	109,20	17,00	426,50	128,20	208,00	202,60	346,40	245,90	155,00	22,10	1.980,80
2008	0,00	29,00	58,40	54,40	93,30	110,10	29,50	155,10	346,60	67,60	222,50	40,00	1.206,50
2009	9,20	0,00	4,00	31,30	291,90	237,40	0,00	84,50	181,90	116,70	16,00	20,00	992,90
2010	21,30	40,40	11,30	41,10	86,00	179,00	130,30	196,40	97,10	256,60	25,20	13,50	1.098,20
2011	34,50	0,00	18,00	30,00	134,10	250,50	136,00	22,10	181,70	97,50	61,00	56,00	1.021,40
2012	9,00	0,00	0,00	9,00	307,40	194,40	222,20	174,00	39,00	195,40	7,20	23,00	1.180,60
2013	63,00	0,00	7,00	26,00	178,70	189,00	73,00	137,00	165,40	38,00	22,50	26,00	925,60
2014	35,00	57,60	10,20	199,40	255,60	165,70	80,50	142,10	191,30	122,30	40,50	26,30	1.326,50
2015	0,00	83,70	0,00	9,00	98,50	111,90	92,20	66,00	254,00	82,00	63,30	70,00	930,60
2016	7,00	34,50	15,00	64,00	291,70	227,10	51,00	120,30	166,10	166,10	0,00	10,00	1.152,80
2017	47,00	6,00	67,00	18,00	105,30	112,10	41,30	200,00					
Promedio	26,30	27,98	27,28	45,38	206,27	173,22	96,73	136,37	196,95	138,81	61,32	30,69	1.181,59

3.6.3.2 Variable nivel

Los niveles de las aguas subterráneas se obtuvieron del pozo de observación 95 que se localiza en las cercanías del área de estudio con serie histórica de 10 años. El nivel mínimo se registró en noviembre de 2007 con valor de 3,63 m, el valor máximo de 8,89 m que se registra en el mes de junio del 2017 para una variación de carga de 5,26 m y nivel medio de 7,3 m en el año 2012. El año 2016 presentó los valores más profundos con un promedio anual de 8,47 m. Lo cual evidencia un aumento en el promedio de la profundidad en m a la que se encuentra el agua con el transcurrir de los años, la tendencia es a encontrarse cada vez más profundas (ver Tabla 7).

Tabla 7.Datos del nivel de las aguas en profundidad (m) del pozo de sistemática No.95

Años	Meses												Promedio anual
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2007	5,84	6,11	6,17	8,44	6,05	5,77	5,85	5,73	5,23	4,04	3,63	4,02	5,57
2008	4,62	5,06	5,35	5,06	5,80	5,91	6,05	6,10	5,18	5,42	5,40	5,41	5,45
2009	5,71	5,94	6,12	6,25	6,15	5,11	5,19	5,44	5,86	6,00	6,24	6,37	5,87
2010	6,52	6,53	6,68	6,76	6,86	6,80	6,81	6,45	6,43	5,60	5,85	6,12	6,45
2011	6,38	6,53	6,75	6,93	7,10	6,61	6,53	6,37	6,46	7,62	6,65	6,70	6,72
2012	6,76	6,92	7,09	7,21	7,31	7,17	7,03	7,00	7,05	6,97	6,89	7,00	7,03
2013	7,13	7,17	7,32	7,40	7,51	7,52	7,59	7,65	7,64	7,72	7,84	7,93	7,54
2014	7,96	7,97	7,95	8,20	8,13	8,02	7,95	7,81	7,79	7,69	7,43	7,41	7,86
2015	7,60	7,75	8,45	8,02	8,27	8,26	8,42	8,48	8,45	8,37	8,34	8,24	8,22
2016	8,25	8,25	8,43	8,48	8,58	8,61	8,59	8,67	8,67	8,35	8,34	8,40	8,47
2017	8,56	8,66	8,70	8,79	8,85	8,89	8,78	8,87					
Promedio	6,85	6,99	7,18	7,41	7,33	7,15	7,16	7,14	6,88	6,78	6,66	6,76	6,92

3.6.3.3 Variable explotación

Los volúmenes de extracción de la zona en el transcurso de los 10 años, se obtuvieron de la información que brindaron los volúmenes de explotación del tramo Los Arroyos (se localiza en el área de estudio). La explotación media que se registró es de 0,392 Hm³/ año, registrándose la mayor extracción en el año 2016 con 0,88 Hm³/año (ver Tabla 8)

Tabla 8.Datos de la extracción de agua subterránea en Hm³ anualmente.

Años	Meses												Anual
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2007	0,037	0,039	0,048	0,040	0,038	0,038	0,039	0,032	0,036	0,033	0,036	0,035	0,451
2008	0,024	0,031	0,033	0,036	0,035	0,027	0,038	0,034	0,037	0,033	0,031	0,033	0,392
2009	0,033	0,024	0,032	0,033	0,031	0,041	0,035	0,026	0,030	0,039	0,028	0,032	0,384
2010	0,036	0,032	0,034	0,034	0,036	0,040	0,035	0,029	0,033	0,046	0,024	0,031	0,410
2011	0,033	0,027	0,026	0,020	0,026	0,020	0,029	0,030	0,028	0,028	0,028	0,027	0,322
2012	0,037	0,039	0,048	0,040	0,038	0,038	0,039	0,032	0,036	0,033	0,036	0,035	0,451
2013	0,024	0,031	0,033	0,036	0,035	0,027	0,038	0,034	0,037	0,033	0,031	0,033	0,392
2014	0,033	0,024	0,032	0,033	0,031	0,041	0,035	0,026	0,030	0,039	0,028	0,032	0,384
2015	0,036	0,032	0,034	0,034	0,036	0,040	0,035	0,029	0,033	0,046	0,024	0,031	0,410
2016	0,033	0,027	0,026	0,020	0,026	0,020	0,029	0,030	0,028	0,028	0,028	0,027	0,322
2017	0,029	0,029	0,022	0,022	0,025	0,033	0,023	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	
Total													3,918
Promedio	0,032	0,030	0,033	0,032	0,032	0,033	0,034	0,030	0,030	0,033	0,027	0,029	0,392

3.6.3.4 Variable de explotación en los distintos períodos

Se evidencia la extracción que se produjo a lo largo de los distintos períodos de la explotación teniendo en cuenta las etapas de recarga y descarga del acuífero. Los porcentajes se obtienen a través de la suma de todas las explotaciones que existe en los distintos períodos que se analizaron. El mayor porcentaje de recarga se manifiesta en el 2014 con un 49 % y los menores porcentajes en los años 2008 y 2009 con 13 % y 15 % de recarga respectivamente. Mientras que en los porcentajes de descarga el mayor valor radica en el año 2012-2013 que es el período donde se observa un descenso en el nivel de explotación, lo cual indica que no existió recarga durante ningún momento del período. En el año 2007 se produce el menor porcentaje de descarga con un 49 % (ver Tabla 9).

Tabla 9. Datos de la extracción en Hm³ en los distintos períodos de explotación.

Calendario		Hidrológico		Periodos de Recarga y Descarga				%	
Año	Extracción	Periodo	Extracción	Periodo	Recarga	Periodo	Descarga	Recarga	Descarga
2007	0,451	Marzo2007-Agosto2008	0,599	Marzo-Nov 2007	0,304	Nov 2007-Ag 2008	0,295	51%	49%
2008	0,392	Agosto2008-Abril2009	0,257	Agosto-Sep 2008	0,034	Sep 2008-Ab 2009	0,223	13%	87%
2009	0,384	Abril2009-Mayo2010	0,431	Abril-Junio 2009	0,064	Junio 2009-Mayo 2010	0,367	15%	85%
2010	0,410	Mayo2010-Mayo2011	0,380	Mayo-Oct 2010	0,173	Oct 2010-Mayo 2011	0,207	46%	54%
2011	0,322	Mayo2011-Mayo2012	0,380	Mayo-Ag 2011	0,075	Ag 2011-Mayo 2012	0,305	20%	80%
2012	0,451	Mayo2012-Abril2014	0,768	Mayo-Nov 2012	0,216	Nov 2012-Abril 2014	0,552	28%	72%
2013	0,392								
2014	0,384	Abril2014-Agosto2015	0,542	Abril-Dic 2014	0,263	Dic 2014-Ago 2015	0,279	49%	51%
2015	0,410	Agosto2015-Agosto2016	0,344	Agosto-Dic 2015	0,132	Dic 2015-Ago 2016	0,212	38%	62%
2016	0,322	Agosto2016-Junio2017	0,300	Agosto-Nov 2016	0,086	Nov 2016-Junio 2017	0,214	29%	71%
Pro-medio	0,392		0,445		0,150		0,295	34%	66%

3.6.3.5 Magnitudes del balance interno del acuífero.

Esta variable plantea la determinación directamente del gasto o de los recursos naturales, además de la evaluación de distintas variables para obtener el recurso de explotación que es la variable a determinar. Las variables que se analizan son: el ascenso de los niveles (Δh); el ascenso de los niveles en distintos tiempos, a partir del inicio de ascenso y bajo el punto seleccionado en línea de ascenso y a partir, de la prolongación de la línea de pendiente en el punto de inicio de ascenso de los niveles (ΔH); el descenso de los niveles (ΔZ) que ocurre por el drenaje del acuífero al no existir alimentación del mismo; el descenso de los niveles que ocurren por el drenaje del acuífero al no existir alimentación del mismo durante el período húmedo (ΔZ_h); el descenso de los niveles que ocurren por el drenaje del acuífero al no existir alimentación del mismo durante el período de sequía (ΔZ_s). Todos los parámetros antes mencionados se determinan mediante el linnigrama de observación de niveles en tiempo t (días) y se expresan en (m) (ver Figura 32). Otra de las variables que se analiza es la lluvia efectiva media anual (LLe) que comprende a todas las lluvias que se produjeron durante los distintos períodos y se expresa en mm.

El período en el cual ocurrió un ascenso de los niveles en el acuífero es el que comprende del 2009 al 2010 con un valor de 1,26 m y con un valor de 0,07 m correspondiente al mínimo el período 2016-2017. En el período de 2011-2012 se registra el mayor valor de descenso de los niveles durante el período húmedo, que alcanzó el acuífero con 1,09 m y con unos 0,33 m se registró el mínimo valor en el período de 2016-2017. Los ascensos de los niveles se encuentran en los 2,30 m y 0,40 m, se localizan en los períodos 2007-2008 y 2016-2017 respectivamente. Mientras que el período 2007-2008 presenta el mayor descenso de los niveles con valor de 3,12 m. El promedio de la lluvia efectiva es de 846,01 mm (ver Tabla 10).

Tabla 10. Principales magnitudes de balance del horizonte acuífero en m.

Año	Periodo	Δh	ΔZ_h	ΔZ_s	ΔH	ΔZ	Lle
2007	2007-2008	0,87	0,70	2,42	1,57	3,12	1712,60
2008	2008-2009	1,01	0,50	0,94	1,51	1,44	501,70
2009	2009-2010	1,26	1,04	1,75	2,30	2,79	560,60
2010	2010-2011	0,28	0,90	1,33	1,18	2,23	945,40
2011	2011-2012	0,32	1,09	0,56	1,41	1,65	542,70
2012	2012-2014	0,79	0,7	1,31	1,49	2,01	1139,60
2013							
2014	2014-2015	0,17	0,82	1,01	0,99	1,83	1223,70
2015	2015-2016	0,32	0,63	0,42	0,95	1,05	535,30
2016	2016-2017	0,07	0,33		0,40	0,33	452,50
Promedio		0,57	0,75	1,22	1,31	1,83	846,01

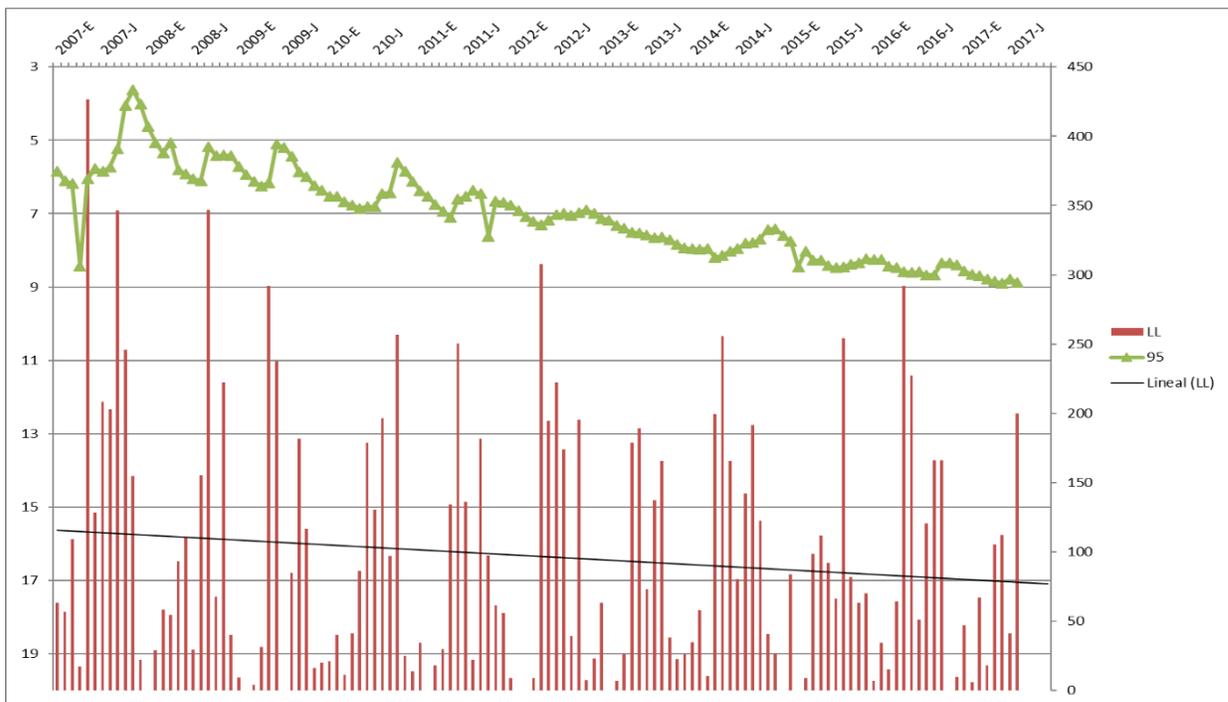


Figura 32. Linnigrama con oscilación anual de los niveles.

Se realiza el cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante tres fórmulas diferentes para determinar un coeficiente de almacenamiento medio, es decir la media de este coeficiente.

 Cálculo del coeficiente de almacenamiento o entrega de agua de las rocas por:

$$\mu = \frac{Q_{exp}}{\Delta Z * F}$$

Dónde:

μ - Entrega de agua de las rocas (adimensional, %)

F- Área de extensión del acuífero (3,38 Km²).

Q exp-recurso de explotación anual (Hm³)

ΔZ – representa el descenso de los niveles (m) que habría ocurrido por el drenaje del acuífero de no haberse producido alimentación del mismo en tiempo t (días).

Esta fórmula relaciona el recurso de explotación (extracción) con los niveles de descenso del acuífero y el área que ocupan dicho acuífero obteniéndose un coeficiente de almacenamiento de 0,071 %, el cual se admite en las rocas calizas del sector de estudio (ver

Tabla 11).

Tabla 11.Relación del coeficiente de almacenamiento en correspondencia con el descenso de los niveles

Año	Período	Extracción (Hm³)	ΔZ (m)	μ (adim.)
2007	2007-2008	0,599	3,12	0,057
2008	2008-2009	0,257	1,44	0,053
2009	2009-2010	0,431	2,79	0,046
2010	2010-2011	0,380	2,23	0,050
2011	2011-2012	0,380	1,65	0,068
2012	2012-2014	0,768	2,01	0,113
2013				
2014	2014-2015	0,542	1,83	0,088
2015	2015-2016	0,344	1,05	0,097
2016	2016-2017	0,300		
Promedio		0,445	2,02	0,071

✚ Cálculo del coeficiente de almacenamiento por la fórmula:

$$\mu = \frac{Q_{exp \text{ periodo seco}}}{\Delta Zs * F}$$

Dónde:

μ - coeficiente de almacenamiento_(adimensional).

Q exp- Caudal de explotación del período seco (Hm³).

F- Área de extensión del acuífero (3,38 Km²).

Δz_s - Descenso de los niveles (m) en el período seco que habría ocurrido por el drenaje del acuífero de no haberse producido alimentación del mismo en tiempo t (días).

Se determinó el coeficiente de almacenamiento a través de la relación de la explotación en el período seco con respecto al descenso de los niveles en ese mismo período por el área, lo cual emite un coeficiente de almacenamiento promedio de 0,070 %. Los coeficientes que se obtienen durante el período de 2011-2012 y de 2015-2016, se consideran no confiables, pues los valores de Δz_s están por debajo de 1 m (ver Tabla 12).

Tabla 12. Relación del coeficiente de almacenamiento con el descenso de los niveles y la explotación en el período seco.

Año	Periodo	Extracción (Hm³)	Δz_s (m)	μ (adim.)
2007	2007-2008	0,295	2,42	0,036
2008	2008-2009	0,223	0,94	0,070
2009	2009-2010	0,367	1,75	0,062
2010	2010-2011	0,207	1,33	0,046
2011	2011-2012	0,305	0,56	0,161
2012	2012-2014	0,552	1,31	0,125
2013				
2014	2014-2015	0,279	1,01	0,082
2015	2015-2016	0,212	0,42	0,149
2016	2016-2017	0,214		
Promedio		0,29	1,22	0,070

✚ Cálculo del coeficiente de almacenamiento por la fórmula siguiente:

$$\mu = \frac{W}{\Delta H} \quad (1)$$

Se asume que la recarga media (W) es igual a la extracción media (V exp)

$$W = \frac{Vexp}{F} \quad (2)$$

$$W = \frac{0,445 \text{ Hm}^3}{3,38 \text{ Km}^2}$$

$$W = 0,132$$

Dónde:

W- recarga media (0,132 mm).

V exp- extracción media (0,445 Hm³).

ΔH - el ascenso de los niveles por la alimentación del acuífero en tiempo t (días)
(1,31 m).

F- Área de extensión del acuífero (3,38 Km²).

El valor de la recarga media (W) que se obtuvo representa la cantidad de agua que entra a la zona saturada (acuífero) formando parte de la reserva natural. Una vez que se obtiene este valor de la recarga media (W) procedemos a sustituir en la fórmula (1) y se obtiene un coeficiente de filtración de 0,101. Finalmente se obtiene un coeficiente medio de 0,081 el cual se utiliza en los cálculos de recursos y reservas naturales.

3.4.4 Cálculo de la recarga y descarga anuales en Hm³

El cálculo se realizó a través de las fórmulas $Q = \mu \cdot A \cdot F$ donde $A = \Delta H$ o $A = \Delta Z$ donde se relaciona el coeficiente de almacenamiento promedio en conjunto con las recargas y descargas del nivel que ocurre en los diferentes períodos y además del área.

Existe una recarga promedio de 0,39 Hm³ y una descarga de 0,55 Hm³, lo cual indica que, a menos recarga del acuífero y mayor carga de este, se producirá una sobreexplotación del mismo.

Tabla 13. Promedio de las recargas y descargas ocurridas por año en Hm³

Año	Periodo	ΔH (m)	Recarga (Hm³)	ΔZ (m)	Descarga (Hm³)
2007	2007-2008	1,57	0,43	3,12	0,85
2008	2008-2009	1,51	0,41	1,44	0,39
2009	2009-2010	2,30	0,63	2,79	0,76
2010	2010-2011	1,18	0,32	2,23	0,61
2011	2011-2012	1,41	0,38	1,65	0,45
2012	2012-2014	1,49	0,41	2,01	0,55
2013					
2014	2014-2015	0,99	0,27	1,83	0,50
2015	2015-2016	0,95	0,26	1,05	0,29
2016	2016-2017				
Promedio		1,43	0,39	2,02	0,55

3.6.4 Cálculo de las reservas naturales:

Se toma la recarga media que se obtuvo a partir de los elementos de balance para obtener una reserva natural (Q_N) de 0,93 Hm³/año, lo cual equivale a 1068 m³/ día y 12 L/s.

3.6.5 Cálculo de los recursos naturales por la fórmula:

$$Q_n = \alpha \frac{\mu * H * F}{t}$$

$$Q_n = 1 \frac{0,081 * 50,00 * 3,40}{27,40}$$

$$Q_n = 688 \text{ m}^3/\text{día}$$

Dónde:

H- Potencia acuífera (50,00 m).

F- Área de extensión del acuífero (3,40 Km²).

t- Tiempo previsto de explotación (27,40 años).

μ - coeficiente de almacenamiento (0,081)

Se obtuvo una reserva natural de 688 m³/día lo cual equivale a 8,0 L/s.

3.6.6 Cálculo de las reservas de explotación

Las distintas reservas y recursos que forman las reservas de explotación de las aguas subterráneas se reflejan en la ecuación de balance siguiente:

$$Q_e = \alpha_1 Q_n + \alpha_2 Q_N + \alpha_3 Q_a + \alpha_4 Q_A + Q_{at}$$

$$Q_e = 12 \text{ L/s} + 20 \text{ L/s}$$

$$Q_e = 20 \text{ L/s}$$

Dónde:

Q_n - recursos naturales (8 L/s).

Q_N – reservas naturales (12 L/s).

Q_a –recursos artificiales.

Q_A –reservas artificiales.

Q_{at} – recursos atraíbles.

α – coeficiente que caracteriza el grado de extraibilidad de las aguas subterráneas ($\alpha = 1$).

En el cálculo de reservas de explotación, las reservas y recursos artificiales se consideran despreciables puesto que los valores que se obtienen en los períodos de recarga son bajos y no varían. Además, se excluyen los recursos atraíbles producto de que en el área no se realiza recargas artificiales. Finalmente, al establecer la sumatoria de los recursos y reservas naturales se obtiene una reserva de explotación de 20 L/s para un período de 27,4 años.

CONCLUSIONES

1. Las profundidades de las aguas subterráneas en el sector varían entre 5 y 20 metros, se mueven tendencialmente hacia las zonas afectadas por las fallas, en la zona norte, de donde proviene la alimentación. El movimiento predominante de las aguas subterráneas es de noreste a suroeste en el miembro Pedernales, y en la formación Camazán es predominantemente de norte a sur, existe una correspondencia entre el relieve y las cotas de nivel de las aguas.
2. Las aguas subterráneas del sector de estudio en dependencia a sus características físicas, químicas y bacteriológicas se clasifican como hidrocarbonatadas – clóricas – sódicas – magnésicas y sus mineralizaciones varían de 0,6 mg/L a 3,8 mg/L. Atendiendo a la Norma Cubana 827:2017, estas presentan contenidos de nitrato, nitrito, cloruros, sodios, coliformes totales y fecales por encima de los límites máximos permisibles, por lo que requieren tratamientos para utilizarlas en la industria cervecera.
3. Las reservas de explotación poseen un caudal de 20 L/s, la cual satisface la demanda requerida para abastecer a la Fábrica de Cerveza Bucaneros S.A., que históricamente se encuentra entre los 20 L/s y 30 L/s.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una evaluación más detallada de la calidad de las aguas subterráneas en el área La Ceiba – Certenejas de Güirabo, Holguín

BIBLIOGRAFÍA

- (RAUDAL), E. de proyectos e investigaciones hidráulicas, 2012. Investigación hidrogeológica de los sectores Cuentas Claras y Cayo Redondo, Manzanillo. . Manzanillo:
- (RAUDAL), E. de proyectos e investigaciones hidráulicas, 2014. Evaluación hidrogeológica en el Sector Collazo , Frank País. . Frank País:
- BLANCO BLÁZQUEZ, J.L., 2016. Mapa Hidrogeológico de Holguín. . Holguín:
- CALVETE SAMPER, J., 2018. EVALUACIÓN DE LAS EXTRACCIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE BALANCES HÍDRICOS. *Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea. ITGE*, pp. 175-195.
- D'ELIA, M., PARIS, M. y PÉREZ, M., 2018. BALANCE DE AGUA EN UN ACUÍFERO COMO BASE PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE Y SEGURIDAD HÍDRICA. *Aqua-LAC*, vol. 10, no. 1688-2873, pp. 26-38.
- DE MIGUEL FERNÁNDEZ, C., 2008. *Hidrogeología Aplicada*. Moa: s.n.
- DE MIGUEL FERNÁNDEZ, C., 2012. *Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales*. Unica. Moa: s.n. ISBN 978-959-16-139-5-0.
- DEL TORO GUERRERO, F.J., HINOJOSA CORONA, A. y KRETZSCHMAR, T., 2014. Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. V, pp. 69-81.
- DEL TORO SÁNCHEZ, R., 2009. *EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA SAGUA LA GRANDE*. S.I.: UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS.
- DÍAZ DUQUE, J.A., 2018. El agua en Cuba: Un desafío a la sostenibilidad. *Revista Bimestre Cubana 1831*, vol. 48, no. 1012-9561, pp. 92-109.
- FERNÁNDEZ-MIGUEL, C. y VÁZQUEZ-TASET, Y., 2006. Origen de los nitratos y nitritos, su influencia en la potabilidad de aguas subterráneas. *Minería y*

- Geología*, vol. 22, no. 3, pp. 1-9.
- FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA S.A.S., 2018. Definiciones FYN ingeniería en agua. .
- HERNÁNDEZ VALDÉS, A.O., 2011. Recursos hidráulicos subterráneos : observaciones sobre su evaluación y gestión en Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXXII, pp. 3-12.
- HOLGUÍN, P. de, 2019. Geografía de holguín. .
- INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS (INRH), 2009. Mapa Hidrogeológico. . Holguín:
- MIJAILOV, L., 1985. *Hidrogeología*. Mir Moscu. S.I.: s.n.
- PEÑUELA ARÉVALO, L.A. y CARRILLO RIVERA, J.J., 2013. Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea. *Investigaciones geográficas*, no. 0188-4611.
- RODOLFO, I., IB, H. y MANRIQUE, O.B., 2011. Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala Proposal of a methodology for the esteem of areas of hydric. , vol. 20, no. 4, pp. 0-4.
- RODRÍGUEZ ELÍAS, F., 2012. Curso Básico de Hidrogeología. ,
- SÁNCHEZ, J., 2018. Qué son las reservas de agua natural y artificial - te lo explicamos. [en línea]. [Consulta: 23 marzo 2019]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-reservas-de-agua-natural-y-artificial-1335.html>.
- SILOT OCHOA, R., 2017. *Caracterización de las aguas subterráneas de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana para el riego*. S.I.: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- SUÁREZ PECOSO, O., 2015. *Determinación de los recursos hídricos disponibles en la cuenca subterránea VC-I*. S.I.: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

TERUEL GARCÍA, O., 2005. *Investigación hidrogeológica para abasto de agua a la Fábrica de Cerveza Bucaneros S.A.* S.l.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

VALCARCE, R.M. y RODRÍGUEZ, W., 2011. Cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos cubanos empleando la metodología Ekv modificada. *CUARTA CONVENCION CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA, GEOCIENCIAS'2011.*, no. 978-959-7117-30-8 1, pp. 1.

WEATHER SPARK, 2018. Clima promedio en Holguín, Cuba, durante todo el año.