

REPÚBLICA DOMINICANA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CIBAO ORIENTAL (UTECO)

“Sembrando Oro para Forjar el Futuro”



Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales

Escuela de Ingeniería en Geología

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero en Geología

TÍTULO:

**Caracterización Hidrogeológica En Los Acuíferos De La Región De Cotuí Y Su
Relación Con La Cuenca De La Presa De Hatillo.**

Sustentantes:

Gianibel Abreu Henríquez

Rowen Rafael Reyes Pérez

Erica Fransheyra De La Cruz

Eduard Ynmanol Martínez Vásquez

Asesor:

Ing. Pedro José Luis Aquino

Cotuí, Prov. Sánchez Ramírez,

Año Académico 2026

TÍTULO:

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LOS ACUÍFEROS DE LA
REGIÓN DE COTUÍ Y SU RELACIÓN CON LA CUENCA DE LA PRESA DE
HATILLO.**

HOJA DE EVALUACIÓN

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LOS ACUÍFEROS DE LA REGIÓN DE COTUÍ Y SU RELACIÓN CON LA CUENCA DE LA PRESA DE HATILLO.

Sustentado por:

Gianibel Abreu Henríquez

Eduard Ynmanol Martínez Vásquez

Erica Fransheyra De La Cruz

Rowen Rafael Reyes Pérez.

Trabajo de Grado sometido a la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO).
Como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero en Geología.

Ing. Pedro José Luis Aquino

Asesor

Miembro de Comité
Evaluador

Miembro de Comité Evaluador

Miembro de Comité
Evaluador

Director de Escuela de Ingeniería en Geología

Ing. Juan Antonio Graciano Domínguez
Decano de Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales

Calificación: _____

Cotuí prov. Sánchez Ramírez República Dominicana

Año, 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Los conceptos plasmados en el presente Trabajo de Grado con el título **“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LOS ACUÍFEROS DE LA REGIÓN DE COTUÍ Y SU RELACIÓN CON LA CUENCA DE LA PRESA DE HATILLO”**, es responsabilidad de los sustentantes de la investigación. De igual modo todas las citas y consultas se han realizado respetando el derecho de autor; por tanto, se libera a la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO)

Sustentantes:

Gianibel Abreu Henríquez

Rowen Rafael Reyes Pérez

Erica Fransheyra De La Cruz

Eduard Ynmanol Martínez Vásquez

ÍNDICE DE CONTENIDO

HOJA DE EVALUACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURA.....	ivi
AGRADECIMIENTOS	vii
DEDICATORIAS	viii
RESUMEN	xiii
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO	1
1.1 Descripción del contexto del proyecto.....	1
1.2 Diagnóstico del estado actual.....	3
1.2.1. Objetivos del diagnóstico.....	3
1.2.2. Metodología	4
1.2.3 Presentación y análisis de los resultados	8
1.3 Descripción del problema específico a solucionar con el proyecto	9
1.4 Análisis del problema	11
1.5 Análisis de objetivos	¡Error! Marcador no definido.
1.6 Justificación del proyecto	14
1.7 Análisis de involucrados	15
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1. Antecedentes	16
2.2. Marco teórico	18
2.3. Marco conceptual.....	29
CAPÍTULO III.....	31
PROPUESTA DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO	31
3.1 Descripción de la propuesta	31
3.2 Matriz FODA	31
3.3 Alcances y límite:	32
3.4 Objetivos de la propuesta.....	32
3.5 Plan de Acción	33
3.6 Cronograma de elaboración de la propuesta	34
3.7 Presupuesto	35
3.8 Análisis de factibilidad	36

3.9 Sostenibilidad.....	36
CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	39
4.2 La propuesta.....	40
CAPÍTULO V: CONSIDERACIONES FINALES	46
5.1 Conclusiones	46
5.2 Recomendaciones	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURA

No.	Descripción	Pág.
Figura 1	Localización Geográfica de la Presa de Hatillo	3
Figura 2	Imagen satelital de la presa de hatillo.	28
Figura 3	Imagen satelital embalse presa de hatillo.	29
Figura 4	Hidrograma.	44
Figura 5	Leyenda satelital de los puntos de ubicación de los distintos pozos, 2025.	44

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concedernos la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar con éxito este proceso académico. Su guía ha sido nuestra luz en cada reto y su gracia nos permitió avanzar con firmeza hasta alcanzar esta meta. Reconocemos que ha sido su voluntad la que nos permitió que este sueño pudiera concretarse.

A nuestra Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO), por abrirnos las puertas del conocimiento y brindarnos un espacio formativo que ha contribuido a nuestro crecimiento personal y profesional. Gracias por ser el escenario donde se sembraron las bases de nuestro desarrollo académico.

A nuestros maestros, quienes con dedicación, entrega y compromiso nos acompañaron durante este recorrido. Su paciencia, conocimientos y motivación han sido pilares fundamentales en nuestra formación. Cada enseñanza impartida ha dejado una huella significativa en nuestro aprendizaje.

A nuestro asesor **Ing. Pedro José Luis Aquino**, por su apoyo constante, su orientación oportuna y su disposición para guiarnos durante la elaboración de esta investigación. Sus aportes, experiencia y sugerencias fueron esenciales para la calidad y culminación de este proyecto.

Al **Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDHRI)**, por su colaboración, apertura y por facilitarnos acceso a información valiosa que hizo posible el desarrollo de este proyecto. Su apoyo fue determinante para el cumplimiento de los objetivos planteados.

A cada persona que, de alguna manera, contribuyó a este logro, les expresamos nuestro más sincero agradecimiento. Este resultado es también de ustedes.

Gianibel Abreu Henríquez
Rowen Rafael Reyes Pérez
Erica Fransheyra De La Cruz
Eduard Ynmanol Martínez Vásquez

DEDICATORIAS

Dedico este logro, en primer lugar, a **Dios**, por ser mi luz, mi guía y mi fortaleza en cada paso de este camino. Gracias por concederme la sabiduría, la paciencia y la oportunidad de alcanzar esta meta.

A mis padres, en especial a mi madre **Giana Henríquez** por su amor incondicional, sus sacrificios y por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

A mis hijos, **Geismibel**, **Greyson** y **Gianella** la razón más grande de mi vida y mi mayor inspiración. Ustedes son mi fuerza y mi motivo para seguir avanzando cada día. Este logro está hecho con amor para ustedes.

A mis hermanos, por su apoyo constante y por caminar a mi lado en cada etapa de mi vida. Su compañía y comprensión han sido fundamentales.

A mi familia en general, por sus palabras de aliento, su cariño y su presencia en cada momento importante. Gracias por creer en mí.

A mis tíos, por su apoyo, por sus consejos y por demostrarme que la familia siempre es un pilar de fuerza.

A mis abuelos, por su amor, sus enseñanzas y su legado. A pesar de que ya no están, los llevo en mi corazón, gracias por su dulzura y apoyo incondicional.

A mis amigos en especial a **Ledwin Javier Landron**, por su amistad sincera, su apoyo desinteresado y por estar presente en momentos claves durante todo este proceso. Tu compañía ha significado más de lo que imaginas.

Y finalmente, **a mí misma**, por no rendirme, por levantarme cada vez que fue necesario, por confiar en mis capacidades y por esforzarme aun cuando el camino parecía difícil. Me dedico este logro porque también soy parte fundamental de este triunfo.

Gianibel Abreu Henríquez

DEDICATORIA

A Dios: Por haberme guiado en este largo camino, por darme su bendición cada día, por haberme permitido culminar esta etapa tan importante en mi vida y ser mi guía siempre.

A mis padres Ivelisse Vizcaíno y Francisco De La Cruz: A quienes le debo todo, muchas gracias por su apoyo incondicional, por su paciencia, por cada sacrificio y por impulsarme a seguir adelante aun cuando las cosas se volvían difíciles. Su amor ha sido el motor que me ha permitido llegar hasta aquí. Esto es de ustedes.

A mis hermanos Iveth De La Cruz y Franyeuris De La Cruz: Por acompañarme con cariño, por sus palabras de ánimo y por estar presentes en cada etapa. Gracias por ser parte de mi fuerza y mi motivación.

A mi abuela Nidian Mora: Por creer en mí y darme ánimos en los momentos difíciles, por apoyarme y guiarme en el transcurso de los años.

A mis amigos, en especial a **Fenely, Alvin, Nelfy, Yoel y Eddy,** gracias por su amistad, por los momentos compartidos y por estar presentes a lo largo de este proceso.

A Yenfry De Jesús, gracias por todo lo que haces por mí, por aportarme, por escucharme cuando me sentía desmotivada, por tu apoyo constante, tu paciencia y tu forma de estar.

A mi amigo Ronny Miguel Torres, gracias por ser mi mejor amigo desde la escuela y seguir a mi lado ahora en la universidad. Gracias por nunca soltarme, por estar siempre dispuesto y por acompañarme en cada etapa de este camino.

Erica Fransheyra De La Cruz Vizcaino.

DEDICATORIA

Dedico este logro, antes que todo, a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi luz en cada paso de este camino académico. Su presencia me dio claridad en los momentos difíciles y esperanza cuando las fuerzas parecían agotarse.

Con profundo amor y gratitud, dedico este proyecto a mis padres, **María Virgen Vásquez Manzueta**, una mujer luchadora, valiente y llena de sabiduría, cuyo apoyo incondicional ha sido el pilar más firme que he tenido. Gracias por tus sacrificios, por tus oraciones y por nunca soltarme de la mano incluso cuando yo dudaba y **Eduard Antonio Martínez**, quien con su ejemplo, disciplina y trabajo constante me ha enseñado el valor del esfuerzo y la responsabilidad. Su confianza ha sido una motivación inmensa para seguir adelante.

A mis hermanos, **Yuenny, Yuniór, Cintia, Naurika y Alba Iris**, quienes han sido un refugio emocional, alegría cotidiana y motivación silenciosa. Sus palabras de aliento, sus sonrisas y compañía, me llenan de fuerzas diariamente y me han recordado que nunca camino solo.

A mis familias dedico también este triunfo a mis seres queridos **Magali, Carmen y Argentina**, y a los demás miembros de mi familia que han estado presentes en mi vida con amor, afecto y respaldo. Gracias por cada gesto de apoyo, por cada palabra que me motivó y por estar conmigo en los momentos importantes. Su presencia ha sido una bendición y una inspiración constante.

A mis compañeros de clase y de proyecto como **José Baudilio, Axel Almonte y demás** quienes compartieron conmigo desvelos, trabajos en equipo, risas, estrés y aprendizajes inolvidables. Juntos superamos obstáculos, debatimos ideas, celebramos avances y construimos recuerdos que quedarán para siempre. Este logro también les pertenece, porque cada conversación, tarea compartida o gesto de apoyo aportó al resultado final. Gracias por el compañerismo, la paciencia y la unión que nos mantuvo firmes hasta el final.

Dedico también este trabajo con agradecimiento **a mis profesores**, en especial al profesor **Eripidio Moronta, Juana Elizabeth**, cuya orientación, enseñanza y dedicación dejaron una huella significativa en mi formación. A él y a **todos los demás docentes** que aportaron conocimientos, consejos y motivación durante mi carrera, les expreso mi admiración y mi más sincera gratitud.

Y finalmente, **a mí mismo**, por resistir, por perseverar, por mantenerme firme incluso en los momentos más retadores. Por confiar en mis capacidades y por no renunciar a este sueño. Hoy culmino una etapa que siempre recordaré con orgullo.

Eduard Ynmanol Martínez Vásquez

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, quien me concedió la vida, la salud y la fortaleza necesarias para avanzar con determinación hacia mis metas.

A mis abuelos, **Rafael Pérez y Flora Altagracia**, por su amor incondicional, por su apoyo firme, sus orientaciones y por la educación que me brindaron durante todos estos años.

A mis padres y madrastra, **Wenelgia Pérez, Robert Reyes y Saily Rosso**, gracias por su sacrificio, paciencia, comprensión y confianza, ya que sin su ayuda este logro no habría sido posible.

Para mis hermanos, **Jasneyri, Josué y Joshua**, quienes con su presencia, cariño y palabras de aliento me impulsaron a seguir adelante.

A mis queridos tíos, por siempre creer en mi incluso en momentos en los que yo dudé.

A mis amigos, **Ámbar Acosta, Luisaura Belén, Darlisis Matos, Jessica Ramos, Lussandrys De la Cruz, Yoendi Martínez, Wilson Santana, Ledwin Landron, Axel Almonte y Anderson Gálvez**, los estimo grandemente, gracias por caminar a mi lado y por demostrarme que la verdadera amistad no se mide en tiempo, sino en la calidad de esos maravillosos momentos que compartimos juntos, este logro también es de ustedes.

A mis profesores, les agradezco por compartir conmigo sus conocimientos, pero sobre todo por guiarme con disciplina, paciencia y vocación para formarme como un profesional íntegro.

Rowen Rafael Reyes Pérez

República Dominicana
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CIBAO ORIENTAL
“Sembrando Oro para Forjar el Futuro”



Título: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LOS ACUÍFEROS DE LA REGIÓN DE COTUÍ Y SU RELACIÓN CON LA CUENCA DE LA PRESA DE HATILLO.

Asesor: Ing. Pedro José Luis Aquino.

Sustentado por: Gianibel Abreu Henríquez, Erica Fransheyra De La Cruz, Edward Ynmanol Martínez Vásquez y Rowen Rafael Reyes Pérez.

RESUMEN

La presente propuesta tuvo como objetivo principal desarrollar un plan de gestión integral y sostenible para los acuíferos de la región de Cotuí, que contribuya a disminuir su vulnerabilidad ante riesgos ambientales, especialmente los derivados de actividades extractivas, expansión urbana y falta de monitoreo. La propuesta responde a los resultados del diagnóstico realizado previamente y a la necesidad urgente de implementar medidas de protección y uso racional de los recursos hídricos subterráneos en la zona. El enfoque adoptado combina la investigación hidrogeológica, la educación ambiental, la participación comunitaria y el fortalecimiento institucional. Se plantea implementar una red de monitoreo de los acuíferos, promover acciones de conservación en las zonas de recarga y fomentar la corresponsabilidad de todos los actores involucrados, incluyendo la empresa minera, las autoridades locales y la población. Después de una investigación exhaustiva sobre evaluar las características hidrológicas en los acuíferos en la región de Cotuí y determinar su relación hidrogeológica con el embalse de la Presa de Hatillo, con el propósito de generar información técnica que contribuya a la planificación hídrica sostenible”, se llegó a las siguientes conclusiones. Se discutieron las propiedades físicas e hidráulicas de los acuíferos primarios en Cotuí basándose en cambios en la captación de agua, puntos de posición y capacidad de almacenamiento.

Se evaluaron las condiciones de recarga y descarga de los acuíferos, su infiltración efectiva, flujos subterráneos y áreas de conexión potencial con el embalse de Hatillo. Se evaluaron los efectos hidrodinámicos que el embalse de Hatillo tiene sobre los acuíferos circundantes a través de análisis piezométricos, estudios comparativos y la generación de un modelo hidrogeológico conceptual.

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

1.1 Descripción del contexto del proyecto

El presente proyecto será implementado en la provincia Sánchez Ramírez. Esta provincia es una de las 32 provincias que ocupan en la actualidad toda la República Dominicana, ubicándose en el centro del país, dentro de la subregión Cibao que recibe la denominación de Cibao Central o Meridional, que se ubica dentro del Valle del Yuna, siendo su cabecera municipal el municipio de Cotuí. Esta provincia data de 1952, ya que antes de su creación era un municipio de la provincia Duarte a partir del 18 de junio de 1945, y había sido municipio de la provincia de La Vega desde que se fundó la República. (Rincón, 2010).

El que hoy es la provincia de Sánchez Ramírez está vinculada a la creación de Cotuí, su municipio cabecero, de acuerdo a la obra "La Mejorada Villa del Cotuy", cuyo autor es Francisco A. Rincón, este asentamiento fue la décima de 17 villas que mandó a poblar el Comendador de Lares Frey Nicolás de Ovando mientras era gobernador de la colonia entre 1502 y 1515. En este sentido, Ovando le ordenó a su Lugarteniente Rodrigo Trillo de Mexía fundar un poblado o asentamiento por los alrededores de la mina de oro, en el mismo lugar donde se encontraba anterior a la llegada de Ovando el Cotoy Nitaíno. Luego de su fundación la Villeta del Cotuy pertenecía a la Villa de Buenaventura, razón por la cual Cotoy no fue favorecido con el escudo de arma otorgado por la corona y llegado a la isla en 1508. (Ibíb, 2010).

La presa de Hatillo se halla en la comunidad del mismo nombre, a 6 km al suroeste del municipio de Cotuí capital de la provincia Sánchez Ramírez – República Dominicana y a 113 km al noroeste de la ciudad de Santo Domingo.



Fuente: Imagen del embalse presa de Hatillo, 2025.

Las obras de la presa Hatillo fueron iniciadas en el año 1977 y finalizadas en el año 1984, lo que exigió un alto sacrificio económico y social, porque se desplazaron varias comunidades de la zona. La capacidad de almacenamiento de la presa Hatillo es de 710 millones de metros cúbicos y tiene una superficie de 22 km² y una longitud de 15 km lo que la convierte en el lago de agua dulce más grande del Caribe y es también una importante fuente de ingresos para los pescadores de la región pues allí habitan diversas especies de peces como el Bakú, el gato pez o el pez sapo. La presa de Hatillo es el resultado de la acumulación de las aguas procedentes de ríos y arroyos para convertirla en electricidad e irrigar las áreas agrícolas de la región. El embalse es una importante fuente de ingresos para los pescadores de la población pues allí se pescan diferentes especies de peces como carpa, tilapia, trucha y camarones.

Objetivos específicos

- 1) Analizar los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos de Cotuí.
- 2) Evaluar la clasificación de los acuíferos de la zona de Cotuí.
- 3) Identificar los factores naturales que inciden en la vulnerabilidad de los acuíferos y de la región de Cotuí.
- 4) Determinar el grado de vulnerabilidad de los acuíferos y proponer estrategias de mitigación.

1.2.2. Metodología

Enfoque metodológico

Este proyecto se enmarca dentro de un enfoque mixto, integrando métodos cuantitativos y cualitativos, dado que busca tanto la caracterización objetiva de las condiciones actuales de la presa de Hatillo, ya que fueron evaluadas con análisis a la toma de agua. Este enfoque responde al paradigma pragmático, que permite la combinación de técnicas para abordar el problema de manera integral y contextualizada (Creswell, 2014).

Diseño y tipo de estudio

El diseño metodológico adoptado es un estudio de caso descriptivo con componente exploratorio, centrado en la característica hidrogeológica en la vulnerabilidad de los acuíferos en la región de Cotuí, como unidad de análisis específica. Este tipo de estudio permite describir en profundidad la situación actual del embalse de la presa de Hatillo, identificar sus características, problemáticas y oportunidades, y explorar su vulnerabilidad. Para la recolección de información se utilizarán las siguientes técnicas:

- **Observación** directa de las característica hidrogeológica y vulnerabilidad de los acuíferos en la región.
- **Entrevistas semiestructuradas** a personal técnico, docentes y encargados de la presa de Hatillo y de medio ambiente.
- **Encuestas** aplicadas a estudiantes y colaboradores para conocer conocimientos, actitudes y percepciones sobre el embalse de la presa de Hatillo.
- **Revisión documental** de registros internos sobre característica hidrogeológica.

Informantes claves

Dado el enfoque mixto del estudio, la población se organiza en dos niveles:

- **Enfoque cuantitativo:** La población objetivo está compuesta por los estudiantes de carreras de ingeniería en Geología, personal técnico del INDRHÍ y personal administrativo de la presa de Hatillo. Se trabajó con un muestreo no probabilístico intencional, seleccionando a los individuos más directamente relacionados con las prácticas de hidrológica y la vulnerabilidad de los acuíferos.
- **Enfoque cualitativo:** Se identificaron como informantes clave, a docentes, coordinadores de áreas agropecuarias, encargados de proyectos ambientales, así como autoridades académicas que puedan aportar información relevante sobre políticas institucionales, experiencias anteriores en sostenibilidad y decisiones estratégicas.

Esta combinación de técnicas cuantitativas y cualitativas permite integrar y triangular datos, lo que fortalece la validez del estudio y facilita una comprensión más integral del fenómeno investigado (Creswell & Plano Clark, 2018; Hernández-Sampieri *et al.*, 2014).

Métodos y técnicas de recolección de datos

Con el propósito de reunir información cuantitativa de interés, se aplicó una encuesta estructurada para los estudiantes y trabajadores de la presa de Hatillo. Esto nos permitió obtener datos fidedignos sobre los aprendizajes a partir de los embalses hidrológicos, las prácticas que se están realizando hasta el momento, así como la disposición de los encuestados para que esta tecnología social sostenible se implemente y se refuerce. La encuesta semiestructurada, elaborada con anterioridad, compuesta por preguntas cerradas contribuirá a la construcción de los datos y su análisis posterior bajo la lógica estadística de la sistematización, asegurando la comparabilidad de las respuestas de los grupos encuestados (Hernández-Sampieri *et al.*, 2014).

Para realizar el análisis de uso del agua, la filosofía y el embalse del pan de agua de la presa de Hatillo se recabará información mediante entrevistas semiestructuradas y la observación participativa. Las entrevistas semiestructuradas permiten que los

investigadores cuenten con una guía a tener en cuenta, pero también permiten la flexibilidad del análisis de los ejes que pueden emerger de las respuestas de las personas que responden la encuesta, lo que colabora a enriquecer la comprensión. (Mind the Graph, 2023).

Por otro lado, la observación participante posibilita la inmersión del investigador en el entorno social del grupo estudiado, favoreciendo la interpretación de prácticas, comportamientos y significados desde una perspectiva interna (QuestionPro, 2021).

La combinación de ambas técnicas no solo enriquece la recopilación de datos, sino que fortalece la validez del análisis mediante la triangulación de fuentes y métodos.

Se utilizó la triangulación metodológica, cruzando la información obtenida a través de encuestas, entrevistas y observaciones con documentación institucional (planes operativos, informes de gestión, diagnósticos ambientales previos), para asegurar la validez y consistencia de los hallazgos. Según Jiménez Chaves (2021), la triangulación metodológica implica la combinación de métodos cualitativos y cuantitativos para enriquecer la investigación y aumentar la validez de los resultados.

Instrumentos y validación

La encuesta estructurada fue validada mediante juicio de expertos, tomando como referencia modelos aplicados en proyectos similares. Las entrevistas semiestructuradas fueron diseñadas con base en guías temáticas revisadas por profesionales del área ambiental y pedagógica. La técnica del juicio de expertos permite asegurar que el instrumento mida adecuadamente las variables de interés y que se ajuste al contexto del estudio, reduciendo posibles sesgos y mejorando la calidad de los datos recolectados (Escobar-Pérez & Cuervo-Martínez, 2008; Hernández-Sampieri *et al.*, 2014).

La observación directa se realizó mediante listas de cotejo y notas de campo. Esta combinación asegura que los instrumentos respondan tanto a la naturaleza cuantificable de algunas variables como a la necesidad de comprender contextos e interpretaciones subjetivas. El uso combinado de estos instrumentos favorece la recolección rigurosa y

estructurada de datos, al mismo tiempo que mantiene la flexibilidad interpretativa característica de los métodos cualitativos (Angulo Rasco, 2012; Sandoval, 2002).

Procedimientos

El desarrollo del proyecto seguirá los siguientes pasos:

- Revisión bibliográfica y documental sobre la característica hidrogeológica y evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos en la región de Cotuí, prácticas institucionales y contexto local.
- Diseño de instrumentos de recolección de datos (encuestas, guías de entrevistas, listas de observación).
- Validación de instrumentos mediante revisión de expertos y prueba piloto.
- Recolección de datos en campo, combinando visitas a la finca, entrevistas y aplicación de encuestas.
- Organización de datos cualitativos y cuantitativos.
- Análisis de resultados, elaboración de tablas, gráficos, codificación de respuestas cualitativas y triangulación.
- Formulación de propuesta técnica y económica de la característica hidrogeológica y evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos en la región de Cotuí con base en los hallazgos.
- Redacción del informe final, integrando resultados, conclusiones y recomendaciones.

1.2.3 Presentación de los resultados

Los resultados del diagnóstico serán presentados conforme a la metodología mixta adoptada, organizados en dos bloques principales: los obtenidos mediante el análisis cuantitativo y aquellos derivados del análisis cualitativo. Esta estructura permitirá una comprensión integral del problema relacionado con la gestión y vulnerabilidad de los acuíferos en la región de Cotuí (Hernández-Sampieri et al., 2014).

Los datos recolectados mediante encuestas, mediciones de campo y registros hidrogeológicos serán procesados mediante estadística descriptiva, utilizando los programas Microsoft Excel e InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). Se emplearán frecuencias absolutas y relativas, porcentajes, tablas y gráficos para representar de manera clara las principales tendencias y patrones identificados. Se prevé que los resultados cuantitativos permitirán identificar:

- La distribución espacial y características hidrogeológicas de los acuíferos.
- El nivel de explotación y uso actual de los recursos hídricos subterráneos.
- Las áreas de mayor vulnerabilidad frente a contaminación o sobreexplotación.

Los datos cualitativos, obtenidos mediante entrevistas semiestructuradas con expertos locales, observación de prácticas de uso del agua y revisión documental, fueron organizados mediante un análisis de contenido. Se establecerán categorías emergentes a partir de la codificación temática de las respuestas, lo que facilitará la interpretación de percepciones, políticas y prácticas de los actores involucrados. Los resultados cualitativos proporcionarán información clave sobre (Di Rienzo et al., 2020):

- Las percepciones institucionales y comunitarias respecto al manejo y protección de los acuíferos.
- Las barreras técnicas, logísticas y normativas para la gestión sostenible del recurso hídrico.
- Las oportunidades de integración de medidas de conservación y protección en la planificación territorial y agrícola.

El análisis de los datos se llevó a cabo integrando tanto el componente cuantitativo como el cualitativo, lo cual permitió una visión más completa del problema. Se aplicará una triangulación metodológica para comparar y contrastar los hallazgos obtenidos a través de diferentes técnicas y fuentes, enriqueciendo así la interpretación final (Flick, 2004).

A partir de la triangulación de los resultados, se buscó validar los hallazgos mediante la convergencia de evidencia cuantitativa y cualitativa. Esta estrategia permitió contrastar y complementar la información obtenida a través de encuestas, entrevistas, mediciones de campo y registros documentales, fortaleciendo así la credibilidad y consistencia del estudio. La integración de múltiples fuentes y enfoques metodológicos facilitó la identificación de patrones comunes, áreas críticas de vulnerabilidad y condiciones necesarias para la gestión sostenible de los acuíferos. La triangulación, en este sentido, no sólo mejora la validez interna del estudio, sino que también amplía su capacidad explicativa (Flick, 2004).

Con base en este análisis, se formulará una propuesta técnica y de gestión sostenible que responda a las necesidades identificadas, considerando la capacidad de recarga de los acuíferos, la disponibilidad de recursos y la capacidad operativa de los actores locales. Posteriormente, se procederá a la redacción del informe final, que integrará los resultados del diagnóstico, las conclusiones derivadas del análisis y un conjunto de recomendaciones estratégicas para la protección, uso racional y manejo sostenible de los acuíferos en la región de Cotuí.

1.3 Descripción del problema específico a solucionar con el proyecto

En el ámbito de la gestión de los recursos hídricos, el tema de la vulnerabilidad frente a la contaminación de los acuíferos es un asunto actual y crítico, cuya finalidad es la protección y el mantenimiento de la calidad del agua subterránea. El concepto de vulnerabilidad intrínseca hace referencia a las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas propias de una determinada zona. Autores como Kang et al. (2017) o Rukmana et al. (2025) afirman que la evaluación de la vulnerabilidad es la fase inicial para

evaluar la susceptibilidad de los acuíferos a las amenazas provocadas por la actividad humana, incluyendo para su evaluación de propiedades físicas, químicas y biológicas.

La caracterización hidrogeológica, que supone el estudio de la distribución y el movimiento en la región de la geología del agua subterránea, es clave para llevar a cabo esta evaluación. Aunque la problemática de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas se presenta en la región de Cotuí, la provincia de Sánchez Ramírez, en la República Dominicana, es rica en agua subterránea, sobresaliendo el lago de Hatillo, el embalse más grande del país, que cumple las funciones estratégicas de generación de energía, control de las inundaciones y sistemas de riego o consumo humano. Existe una relación directa entre las aguas superficiales del embalse y los acuíferos subterráneos de la región de Cotuí; sin embargo, la dinámica hidrogeológica presenta serias preocupaciones en torno a la vulnerabilidad de estos acuíferos frente a diversos factores de presión antrópica.

La vulnerabilidad aumentada de los acuíferos en Cotuí surge a partir de Múltiples causas manifestadas que originan desajustes en la recarga natural y aumentan la posibilidad de contaminación: Deforestación y cambio de uso de tierras: Disminución de la condición de recarga natural de los acuíferos, Agricultura intensiva no planificada porque promueven el uso de agroquímicos en exceso, contaminación proveniente de actividades mineras e industriales que introducen cargas contaminantes en la superficie, urbanización no controlada: Generan desajustes en el ciclo hidrológico local, debilidad institucional que queda evidenciada por la falta del monitoreo frecuente de los acuíferos y de los planos de manejo integrado que agravan la situación. Estas causas dan lugar a efectos negativos en la sostenibilidad del recurso y en el bienestar de la población en la que se encuentran: una reducción de la calidad del agua, disminuciones del nivel de agua para el consumo humano y para el asentamiento humano y agrícola, afectación a la salud pública, afectación a la producción agrícola y a la seguridad alimentaria y sobre todo amenazan a la biodiversidad relacionada con los ecosistemas acuáticos.

Pese a la importante demanda de estos recursos y a la existencia de trabajos hidrogeológicos en otras regiones del país, en Cotuí persisten importantes vacíos en cuanto

a la consideración de la vulnerabilidad de los acuíferos, en especial en relación al embalse de la presa de Hatillo, que limitan la posibilidad de hacer política pública y aplicar prácticas de manejo sostenible en el tiempo.

En este marco, se hace evidente la necesidad de realizar un trabajo que permita explicar las características hidrogeológicas de la región de Cotuí en los acuíferos en relación al embalse de la presa de Hatillo, que permita generar información científica que sirva para la toma de decisiones, que fomente hacer los planos de manejo sostenible y que propenda la protección del principal recurso para el desarrollo de la región y del país.

1.4 Análisis del problema

En el siguiente apartado se presenta el análisis del problema, ya que la zona de Cotuí, de la provincia Sánchez Ramírez, se encuentra situada en un lugar estratégico en términos hidrogeológicos por la interrelación de los acuíferos subterráneos y el embalse de la presa de Hatillo, el cual es muy importante para el abastecimiento de agua, la producción agrícola, el consumo humano, así como también para las actividades productivas. Sin embargo, este recurso se encuentra en momentos bajo una serie de presiones antrópicas y naturales que aumentan su vulnerabilidad. Entre los problemas que hemos identificado como más relevantes podemos enumerar:

1. Deforestación y cambios de uso de suelo, debido a la eliminación de cobertura vegetal afecta la capacidad de infiltración y la recarga natural de los acuíferos, como consecuencia de la sedimentación desde la presa hasta la parte más bajas en la cuenca.

2. Expansión agrícola desorganizada: Debido a la falta de planificación en prácticas agrícolas favorece el uso excesivo de agroquímicos, que representan una amenaza directa para la calidad de las aguas subterráneas.

3. Actividades mineras e industriales: Debido a la empresa minera Barrick Pueblo Viejo la cual genera riesgos de contaminación por metales pesados y residuos tóxicos que pueden infiltrarse en los sistemas subterráneos.

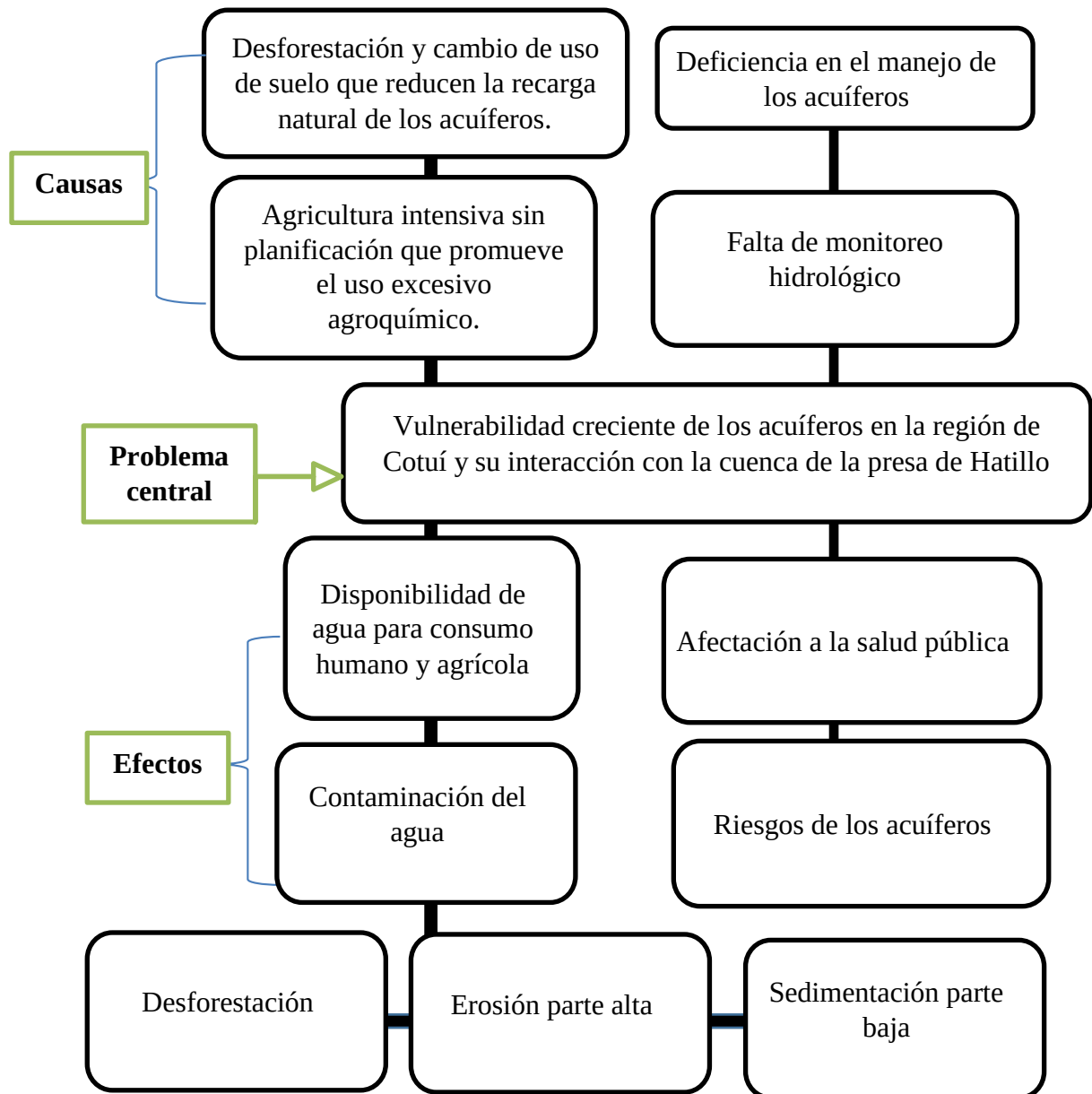
4. Urbanización sin control: Debido a la expansión urbana y crecimiento no planificada incrementa la impermeabilización del suelo, reduce la recarga hídrica y aumenta los vertidos contaminantes.

5. Debilidad institucional: La carencia de monitoreo sistemático y de planes integrales de manejo limita la capacidad de respuesta y prevención ante riesgos de contaminación y sobreexplotación.

Las consecuencias de esta problemática se reflejan en:

- ✓ Deterioro de la calidad del agua, afectando la salud pública.
- ✓ Disminución de la disponibilidad hídrica, con impactos directos en el abastecimiento humano y agrícola.
- ✓ Amenazas a la biodiversidad acuática vinculada al embalse y ecosistemas dependientes.
- ✓ Riesgos para la seguridad alimentaria y la estabilidad socioeconómica de la región

1.5 Análisis de objetivos



1.5 Justificación del proyecto

Un acuífero se describe como una formación geológica cuyas características pueden ser definidas como aquellas que están constituidas por materiales de permeabilidad significativa, como arenas, gravas, calizas kársticas o rocas fracturadas que son capaces de almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades importantes para los diferentes usos a que se destinan. Estos ajustes son de gran importancia porque constituyen uno de los grandes reservorios de agua dulce de nuestro planeta y son la base de abastecimiento de los seres humanos, la producción agrícola y el desarrollo económico de las comunidades.

En la región de Cotuí, los acuíferos tienen una importancia estratégica por lo que representan en la alimentación directa que aportan localmente y por su conexión con el embalse de Hatillo, el mayor del Caribe. La falta de sistemas de estudio de las características hidrogeológicas, su clasificación, y los niveles de vulnerabilidad a los que están expuestos, han dejado gravísimos vacíos en el conocimiento de los mismos. Esta carencia limita la capacidad de planificación y gestión sostenible del recurso, aumentando el riesgo de contaminación, sobreexplotación y deterioro ambiental.

Desde un enfoque científico, la investigación responde a la necesidad de generar información actualizada que permita caracterizar los acuíferos de Cotuí, entender la dinámica del agua subterránea y generar diagnósticos que sirvan como insumo para la gestión territorial. De este modo, se espera generar evidencias para la academia, los tomadores de decisiones y las instituciones encargadas de la protección ambiental. A nivel socioeconómico, el agua subterránea es un recurso básico y fundamental para brindar atención de la salud pública, desarrollar la producción agrícola y dotar de sostenibilidad a las actividades económicas esenciales para la región. La calidad y la disponibilidad de su recurso hídrico confluyen directamente en el bienestar de su población, así como en la seguridad de producir y alimentar a Cotuí y sus comunidades adyacentes.

De este modo, la investigación también da cumplimiento a un compromiso ambiental, en cuanto que fomenta la conservación del recurso agua (de los recursos hídricos), la prevención de riesgos por la contaminación y la escasez, y la elaboración de estrategias de mitigación que han de garantizar el recurso, para uso de las generaciones presentes y futuras. En este sentido, el estudio da cabida al cumplimiento de los Objetivos

de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y ODS 15), del de agricultura ODS-2, ODS-6, ODS-7, ODS-12 y ODS-15), con el final de promover el acceso universal al agua limpia y con la gestión responsable de los ecosistemas, haciendo que tenga viabilidad en los contextos científico, social y ambiental.

1.6 Análisis de involucrados

Involucrado	Interés principal	Alternativas de solución	Factibilidad	Impacto esperado
Comunidad local (Cotuí y los alrededores)	Acceso a agua limpia, reducción de enfermedades	Lograr la calidad el agua con la participar de la comunidad en programas de reforestación y conservación de zonas de recarga.	Disponibilidad de la comunidad y las autoridades.	Mejora en la salud pública, reducción de enfermedades hídricas y fortalecimiento de la organización comunitaria
Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRhI)	Manejo eficiente de recurso hidráulico	Implementar monitoreo constante con metodología.	Limitaciones presupuestarias y burocráticas	Alianzas técnicas y coordinación en monitoreo
Ministerio de Medio Ambiente	Cumplimiento de normativas ambientales	Normativas, acceso a datos oficiales	Débil capacidad de fiscalización	Fortalecer articulación institucional y rendición de cuentas
Universidad (UTECO)	Formación académica e investigación aplicada	Recursos humanos, análisis técnico, divulgación científica	Recursos limitados dependencia de fondos externos	Integrar estudiantes y docentes al proyecto

Fuente: Elaboración Propia, 2025.

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Un trabajo que también está llevado a cabo por López y Del Salto (2016), en el contexto del análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la unidad hidrogeológica Huaquillas, plantea que el análisis de la vulnerabilidad de contaminación en un acuífero es el cálculo de la intensidad de la eventual contaminación de un manto de agua subterránea (independientemente de la contaminación que se pueda tener) en función de las características intrínsecas del sustrato de suelo. La vulnerabilidad de contaminación de la Unidad Hidrogeológica Huaquillas queda determinada por la aplicación de dos métodos cualitativos: el método DIOS y el método DRASTIC. Los mapas de vulnerabilidad generados han permitido clasificar la llanura costera como la zona donde menos se acomoda la posibilidad de dispersión contaminante.

Dentro de la publicación de Ramos , (2019), titulado Caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle de Achuapa, Nicaragua, mediante el uso del método DRASTIC (artículo que trata sobre la vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle de Achuapa, la cual fue caracterizada por el método DRASTIC , siendo este un método empírico desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA , por sus siglas en inglés), que sistematiza la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada, recibiendo su nombre por los siete parámetros que se superponen para caracterizar geográficamente la vulnerabilidad hidrogeológica).

Además , está la utilizada por Lambis (2020), en la investigación Evaluación de la vulnerabilidad del sistema acuífero de Sabanalarga-Atlántico a través de la aplicación de la metodología DRASTIC, cuyo objetivo consistió precisamente en hacer el diagnóstico de la vulnerabilidad del sistema acuífero de Sabanalarga, la metodología DRASTIC se encuentra consolidada como una de las más usadas pues permite la evaluación del mayor número de los parámetros que intervienen en el estudio de la vulnerabilidad. intrínseca a partir de las características del sistema acuífero.

Los parámetros que más afectan el comportamiento del modelo son la profundidad del nivel freático y la naturaleza de la zona no saturada, mientras que los que menos afectan el comportamiento del modelo son la pendiente y el tipo de suelo, se considera la existencia de dos pozos semis urgentes dentro del sistema de Sabanalarga como indicios de los acuíferos multicapa que describen ingeominas 1985 e igualmente para el acuífero que estará situado dentro del sinclinal de Sabanalarga. El parámetro de la recarga neta del acuífero es el más problemático de determinar, ya que no sólo lo es un parámetro sensible, sino que presenta una muy alta variabilidad entre las distintas épocas del año y escasa información confiable de la que se puede obtener, no posee suficiente información para poder evaluarlo o determinarlo.

Aguilera (2021), realizó una investigación titulada Metodología para Determinar Calidad Natural en Acuíferos, dicha investigación surge por la necesidad de regular la emisión de residuos a diferentes ambientes hídricos ha motivado el desarrollo de diversas normativas entre las que se destacan las desarrolladas para aguas subterráneas. Para desarrollar la metodología fue necesario conocer el contexto bajo el cual se debe determinar en relación a esto se definió el concepto de vulnerabilidad, así como también se estudió la metodología aplicada en Chile para su determinación, comprendiendo así el contexto general bajo el cual se debe definir la calidad natural de un determinado lugar.

De León (2022), realizó una investigación de grado en la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña titulada: “Caracterización y Análisis del manejo de los Residuos Sólidos en la Cuenca Baja del Río Yuna para mitigar los impactos de los Vertederos Municipales”, Este trabajo de investigación plantea un análisis detallado de los principales impactos ambientales causados por la gestión inadecuada de los residuos sólidos en todas sus etapas, desde la generación, la recolección, el transporte y la disposición final, enfocándose en el impacto causado por el emplazamiento de los vertederos en la zona baja de la cuenca del Río Yuna. Finalmente, este proyecto de investigación propone implementar un Plan de Gestión Integral del Manejo de Residuos Sólidos Municipales, que incluya el cierre técnico y/o adecuación de los vertederos existentes, tomando como línea base, la aplicación de la nueva Ley 225-20 de Gestión Integral de Residuos Sólidos y Coprocesamiento de la República Dominicana.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Contexto hidrogeológico regional

Las aguas subterráneas y los acuíferos son componentes críticos del ciclo hidrológico y del suministro hídrico. Un acuífero es una formación geológica capaz de almacenar y transmitir cantidades explotables de agua; su comportamiento depende de propiedades físicas y geométricas (porosidad, permeabilidad, espesor, continuidad) y de las condiciones de recarga y descarga.

El Valle del Cibao, en la región norte de la República Dominicana, constituye una unidad hidrogeológica compleja que integra sistemas de aguas superficiales (ríos Yaque del Norte, Yuna y afluentes) y una significativa red de aguas subterráneas contenidas en depósitos aluviales, coluviales y formaciones carbonatadas periféricas. Los estudios hidrogeológicos del país han identificado al Valle del Cibao como una unidad prioritaria por su importancia para el abastecimiento urbano, riego agrícola e impacto socioeconómico regional.

La región de Cotuí (provincia Sánchez Ramírez), forma parte de la cuenca Yuna Camú, uno de los sistemas hídricos mayores del país. Hidrológicamente, la cuenca del Yuna se extiende por el oriente del Valle del Cibao; es el río más caudaloso de la República Dominicana y alberga la presa de Hatillo sobre el río Yuna, infraestructura multipropósito en operación desde 1984.

Desde el punto de vista geológico hidrogeológico, las hojas geológicas “Cotuí” y “Hatillo” del Servicio Geológico Nacional (SGN), describen un mosaico de unidades: predominio de litologías volcánicas e ígneas de baja permeabilidad con intercalaciones sedimentarias, y depósitos aluviales de los ríos Yuna, Camú, Jima, etc., que constituyen los principales acuíferos porosos locales (libres a semiconfinados). Estas unidades controlan la recarga, el almacenamiento y la descarga subterránea hacia el Yuna y, por ende, hacia el embalse de Hatillo (SGN,2024).

Según el estudio hidrológico nacional de la República Dominicana (2024), la presa de Hatillo (tierra con respaldos aluviales, ~50 m de altura; corona ~1,800 m) regula caudales, riego, agua potable y energía; su operación reciente confirma el papel de

amortiguación de crecidas en el Bajo Yuna. La gestión del embalse, niveles y vertimientos condiciona el acoplamiento aguas subterráneas-superficiales aguas arriba y abajo.

En términos de presiones antrópicas, la zona de Cotuí alberga históricamente explotaciones auríferas (Pueblo Viejo); múltiples estudios han documentado aporte de lixiviados y drenaje ácido de mina a tributarios del Yuna (p. ej., Margajita) y la acumulación de metales en sedimentos del embalse de Hatillo, aspecto crucial para el entendimiento de rutas de contaminación y la interfaz subterránea-superficial.

El estudio hidrológico nacional de la República Dominicana (2024), establece que, en cuanto al funcionamiento hidrogeológico el comportamiento del sistema depende de tres procesos clave:

Recarga: Ocurre por infiltración directa de precipitación sobre las llanuras aluviales y por aporte de infiltración desde zonas montañosas y ríos; la heterogeneidad espacial de la precipitación y la cubierta superficial condicionan la magnitud de la recarga.

Almacenamiento y flujo: Los acuíferos aluviales actúan como reservorios con flujo principalmente laminar en medios porosos; en acuíferos carbonatados el flujo puede incluir descargas preferenciales por fracturas y conductos karsticos, con respuestas rápidas a eventos hidrológicos.

Descarga: Se produce hacia ríos (descarga base), manantiales y extracciones antrópicas (pozos), afectando balances hídricos locales y regionales. Estudios de balance hídrico para la unidad del Valle del Cibao han cuantificado estas relaciones y propuesto zonas de recarga prioritaria.

2.2.2. Presiones y problemas ambientales

A escala nacional, evaluaciones del potencial hidrogeológico resaltan la importancia del agua subterránea para la oferta hídrica y la necesidad de su protección, fundamento para adoptar metodologías estandarizadas de cartografía de vulnerabilidad.

Rodríguez (2023), establece que, entre las principales presiones sobre las aguas subterráneas del Cibao destacan:

Sobreexplotación: La demanda agrícola y poblacional puede inducir descenso de niveles freáticos, reducción del caudal base de ríos y compactación de depósitos en zonas de extracción intensiva.

Contaminación difusa y puntual: Descargas de aguas residuales sin tratamiento, uso intensivo de fertilizantes y actividades industriales han sido señaladas como fuentes que elevan cargas de materia orgánica, nitratos y metales en zonas urbanas y periurbanas (p. ej. área de Santiago y alrededores). Esto incrementa la vulnerabilidad sanitaria y limita usos del recurso sin tratamiento.

Cambio y variabilidad climáticos: Alteraciones en los patrones de precipitación y eventos extremos (sequías e inundaciones) afectan recarga y demanda, con implicaciones sobre la sostenibilidad de la explotación subterránea.

2.2.3. Principales características hidrogeológicas

Según el Instituto Geológico y Minero de España (2022), las principales características hidrológicas son las siguientes:

- **Porosidad y poros conectados:** Determinan la cantidad de agua almacenada.
- **Permeabilidad y conductividad hidráulica (K):** Controlan la facilidad con que el agua se mueve dentro del acuífero; son esenciales para estimar flujos y tiempos de tránsito.
- **Transmisividad y almacenamiento específico (storativity):** Relacionan la respuesta del acuífero ante extracciones (caudal y descenso piezométrico).
- **Tipo de acuífero:** Acuíferos porosos (sedimentos), fracturados (roca competente) y kársticos (calizas disueltas) presentan comportamientos hidráulicos y de vulnerabilidad muy distintos p. ej., los kársticos suelen tener conductos preferenciales que aumentan la velocidad de transporte de contaminantes.
- **Geometría y confinamiento:** Acuíferos libres, semiconfinados y confinados presentan distinta protección natural frente a contaminación superficial.

Estas características condicionan tanto la disponibilidad como la susceptibilidad frente a contaminantes y son la base de cualquier evaluación hidrogeológica.

2.2.4. Vulnerabilidad de acuíferos enfoques, definiciones y métodos

La vulnerabilidad de un acuífero depende de la combinación entre tipo de acuífero, espesor de la zona no saturada, uso del suelo y fuentes de contaminación. Los acuíferos aluviales poco protegidos por cobertura impermeable y con alta tasa de infiltración son más susceptibles a contaminación por nitratos y patógenos. La zonificación hidrogeológica y la delimitación de áreas de recarga son instrumentos técnicos indispensables para planificación (INDHRI, 2024).

Vulnerabilidad se define como la susceptibilidad del agua subterránea a ser afectada por contaminantes dadas las condiciones intrínsecas geológicas e hidrogeológicas (vulnerabilidad intrínseca) y/o frente a cargas específicas (vulnerabilidad específica). La evaluación mediante índices multicriterio es ampliamente aceptada por su aplicabilidad a escala de cuenca.

Vásquez (2023), establece que entre las metodologías más usadas en Iberoamérica y Europa se encuentran para la evaluación de la vulnerabilidad se pueden citar los siguientes:

DRASTIC, adaptaciones regionales: Índice sumatorio que pondera factores hidrogeológicos Depth to water, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, Conductivity que permiten generar mapas de vulnerabilidad relativa. Muy empleado por su sencillez y aptitud para SIG, aunque requiere calibración local.

GOD: Método multiplicativo (Groundwater confinement, Overlying strata, Depth to water) útil para zonificación rápida.

SINTACS / AVI / LU-IV / RISK: Variantes y métodos híbridos que introducen diferentes factores y/o procedimientos de ponderación para adaptar la evaluación a condiciones locales o a tipos de acuíferos (p. ej. kársticos). Algunos métodos están diseñados para valorar contaminación por nitratos o para integrar criterios de riesgo y uso del suelo.

Modelación numérica y tiempos de tránsito: Además de índices, la modelación hidráulica (modos estacionarios/transitorios) y el cálculo de tiempos de recorrido y rutas de flujo aportan evaluaciones cuantitativas de vulnerabilidad y riesgo (útil para acuíferos complejos).

Con relación a las variables clave y su interpretación en mapas de vulnerabilidad según Ortega (2021) son:

- Profundidad al nivel freático: Menor profundidad → mayor vulnerabilidad.
- Carácter del material no saturado (zona vadosa): Arenas gruesas y fracturas permiten percolación rápida → mayor vulnerabilidad; arcillas actúan como barrera.
- Recarga: Recarga alta aumenta la posibilidad de transportar contaminantes al acuífero (aunque también diluye).
- Permeabilidad/transmisividad: Controla dispersión y velocidad de transporte.
- Topografía y uso del suelo: Pendientes y actividades (agricultura intensiva, vertederos) condicionan entrada y carga de contaminantes.

Estas relaciones se usan para construir índices y ponderaciones en SIG y para interpretar mapas.

Los mapas de vulnerabilidad se emplean para definir Zonas de Protección de Abastecimiento, orientar ordenanzas y prácticas agrarias, priorizar controles de calidad y muestreos, y diseñar medidas de mitigación (barreras, tratamiento, control de fuentes). La utilidad práctica depende de la calidad de datos hidrogeológicos y de la idoneidad del método aplicado localmente (Vásquez, 2023).

2.2.5. Presiones y rutas de contaminación relevantes

Las presiones sobre los ambientes terrestres, acuáticos y atmosféricos provienen de actividades humanas (agricultura, industria, urbanización, minería, generación de residuos, etc.) y de procesos naturales intensificados por el cambio climático. Estas presiones generan contaminantes nutrientes, metales pesados, compuestos orgánicos persistentes, micro contaminantes farmacéuticos y per- y polifluoro alquilados (PFAS), patógenos que se trasladan por distintas rutas (escorrentía superficial, lixiviación a aguas subterráneas,

deposición atmosférica, descargas puntuales, transporte por sedimentos) hasta afectar ecosistemas, cadenas tróficas y la salud humana (UNEP, 2023).

Las principales presiones y rutas contaminantes de los acuíferos se destacan las siguientes según Navarro, (2024):

Descargas urbanas y aguas residuales (incluyendo fármacos y productos de cuidado personal). Las aguas residuales urbanas son fuente importante de nutrientes, materia orgánica, patógenos y micro contaminantes (fármacos, cosméticos, biocidas). Muchos de estos compuestos no son totalmente eliminados por tratamientos convencionales, por lo que llegan a ríos y costeros, afectando fauna y la calidad del agua. Además, recientes políticas y estudios resaltan la necesidad de tratamientos avanzados para eliminar micro contaminantes.

Las actividades industriales y mineras liberan metales (Pb, Cd, Hg, As), hidrocarburos y otros compuestos tóxicos que contaminan suelos, sedimentos y aguas. La emisión puntual (vertidos, relaves) y difusa (escorrentía de depósitos) explican su persistencia y dispersión en cuencas. Informes nacionales y regionales recogen inventarios de emisiones y transferencias por sectores. El drenaje ácido de mina (AMD) y metales asociados (p. ej., Fe, Al, As, Hg) constituyen la principal carga puntual y difusa de interés regional; su transferencia a sedimentos y aguas del Yuna Hatillo ha sido documentada, lo que justifica integrar fuentes puntuales y zonas de flujo base en el análisis.

Agricultura intensiva (fertilizantes y plaguicidas). El uso masivo de fertilizantes nitrogenados y fosfatados y de plaguicidas es una de las presiones más persistentes. El exceso de nutrientes causa eutrofización de cuerpos de agua y blooms de algas; los plaguicidas y sus metabolitos actúan como micro contaminantes y pueden bioacumularse. La literatura reciente documenta altas concentraciones de nitratos y fosfatos en cuencas agrícolas y la transferencia hacia aguas superficiales y subterráneas. Agricultura y expansión urbana en la planicie aluvial aportan nutrientes (N, P) y patógenos, exacerbando riesgos en acuíferos someros y áreas de recarga preferente. (Marco nacional y planes sectoriales de agua).

Contaminantes emergentes: PFAS y micro contaminantes orgánicos. Las PFAS y otros compuestos emergentes (metabolitos de fármacos, disyuntores endocrinos), son preocupantes por su persistencia, movilidad y efectos sobre la salud. Gobiernos y agencias ambientales han desarrollado hojas de ruta y estrategias para su gestión dada su resistencia al tratamiento tradicional.

La operación del embalse (niveles, vertimientos), condiciona gradientes locales e intercambios GW SW, con implicaciones para vulnerabilidad específica (exposición real a cargas y conectividad hidrológica), especialmente en eventos de crecida.

Presiones atmosféricas y clima. La contaminación atmosférica (aerosoles, deposición seca y húmeda) redistribuye contaminantes hacia suelos y aguas; además, el cambio climático altera patrones de precipitación e hidrología, potenciando eventos de escorrentía, erosión y transporte de contaminantes.

Según la UNEP (2023), existen diversas rutas (vías) de transporte de contaminantes mecanismos y ejemplos tales como:

Escorrentía superficial. Cuando llueve, el agua arrastra fertilizantes, plaguicidas, sedimentos y residuos urbanos desde la superficie hacia arroyos y ríos. Es la vía principal por la que la actividad agrícola y urbana afecta cuerpos receptores cercanos, especialmente en eventos intensos de precipitación.

Infiltración y lixiviación a aguas subterráneas. Sustancias solubles (nitratos, algunos plaguicidas, sales industriales), pueden percolar a través del perfil de suelo hasta acuíferos. Esto contamina fuentes de agua potable y puede persistir décadas. La vulnerabilidad depende de uso del suelo, tipo de suelo y profundidad del acuífero.

Descarga puntual directa (vertidos, emisarios). Vertidos industriales o municipales, relaves mineros y descargas no controladas representan rutas puntuales donde grandes cargas de contaminantes ingresan directamente a un receptor, causando impactos agudos y crónicos. Inventarios de emisiones ayudan a identificar estas fuentes.

Transporte atmosférico y deposición. Contaminantes en forma gaseosa o particulada (metales, compuestos orgánicos semivolátiles) pueden viajar largas distancias

y depositarse por lluvias o sedimentación, conectando fuentes lejanas con ecosistemas remotos.

Adsorción a sedimentos y transporte en materia particulada. Muchos contaminantes hidrofóbicos (p. ej., algunos pesticidas, HAPs, metales ligados a materia orgánica) se adsorben a partículas y son transportados por sedimentos hacia cuencas, estuarios y océanos, acumulándose en fondos y biota.

Vía alimentaria y bioacumulación. Contaminantes que entran en agua y suelos pueden incorporarse a plantas y animales, ascendiendo por la cadena trófica y afectando la seguridad alimentaria y la salud humana (p. ej. metales pesados, algunos organoclorados).

2.2.6. Relación conceptual Cotuí Acuíferos Hatillo

Según el mapa geológico de la República Dominicana (2010), un acuífero es una unidad geológica con porosidad y permeabilidad suficientes para almacenar y transmitir agua subterránea. Su comportamiento (recarga, descarga, almacenamiento) depende de la litología (roca o sedimento), estructura (fracturas, fallas) y el régimen de recarga (precipitación, infiltración desde ríos o embalses). Las interacciones entre agua superficial (ríos, embalses) y agua subterránea pueden ser de recarga (la superficie alimenta al acuífero) o de descarga (el acuífero alimenta la superficie), según gradientes hidráulicos y conectividad geológica

El modelo conceptual integra: (i) recarga sobre lomeríos volcánicos/ígneos y planicies aluviales; (ii) flujo subterráneo preferente hacia los valles del Yuna-Camú; (iii) descarga al río Yuna y almacenamiento/retención en el embalse de Hatillo; (iv) acumulación y movilización de contaminantes en sedimentos del embalse; (v) retroalimentación de niveles del embalse sobre gradientes hidráulicos cercanos a orillas y terrazas aluviales. Este marco sustenta la hipótesis de que la vulnerabilidad intrínseca más alta se ubica en acuíferos aluviales adyacentes al Yuna y, específicamente, en zonas aguas arriba con presiones mineras y agrícolas.

La hoja geológica y estudios regionales indican que el área de Cotuí presenta una compleja asociación de litologías: rocas volcánicas (Formación Los Ranchos), calizas de

la Formación Hatillo en sectores, y depósitos aluviales en los valles (ríos Yuna y Camú). Esta heterogeneidad genera acuíferos de dos tipos dominantes en la zona:

Acuíferos carbonatados (karstificados) en las calizas (alta porosidad secundaria, conductividad anizótropa, redes de drenaje subterráneo).

Acuíferos sedimentarios/granulares en los valles aluviales (porosidad primaria, buen reservorio, pero más vulnerables a contaminación difusa).

La memoria geológica de la hoja Cotuí describe estas unidades y su distribución, siendo esencial para modelar la conectividad entre superficie y subsuperficie.

Según el estudio hidrológico nacional del 2004, la Presa de Hatillo, sobre el río Yuna, forma el mayor embalse del país en volumen y superficie del sector y regula caudales para riego, control de inundaciones y generación. El embalse actúa como gran reservorio superficial que puede modificar los gradientes hidráulicos locales lo cual influye directamente en la dirección e intensidad de las corrientes de agua subterránea en áreas adyacentes y también sirve como potencial fuente de recarga artificial local si existe conectividad permeable entre fondo del embalse y acuíferos próximos.

Aplicando los principios generales a Cotuí, pueden identificarse vías e impactos principales:

Recarga desde el embalse hacia acuíferos aluviales: Si el fondo y márgenes son permeables, parte del agua almacenada puede infiltrarse y elevar niveles piezométricos en acuíferos aluviales cercanos, aumentando disponibilidad subterránea local.

Modificación de niveles y gradientes hidráulicos: Regulación estacional del embalse (llenado/vaciado) cambia gradientes locales y puede invertir flujo (de subterráneo a superficial o viceversa) según épocas.

Transferencia de calidad: Agua del embalse (y actividades en su cuenca minería, vertederos, agricultura) puede afectar la calidad de la recarga (nutrientes, sólidos, contaminantes, bacterias), especialmente en acuíferos someros y aluviales sin perímetro de protección. Estudios nacionales señalan presiones sobre la calidad del recurso subterráneo por contaminación difusa y puntuales en varias zonas del país.

Efectos estructurales y geomecánicas: Cambios de nivel repetidos a escala grande pueden influir en procesos de subsidencia local o en comportamiento de fallas/fracturas en rocas fracturadas, lo cual afectaría circulación subterránea en sectores fracturados/volcánicos.

Actividades mineras (áreas auríferas cercanas al eje Cotuí Pueblo Viejo/Cerro Maimón), disposición de residuos sólidos y prácticas agrícolas intensivas en la cuenca del Yuna aumentan el riesgo de contaminación de acuíferos y de degradación de la calidad del agua (bacteriológica y químicamente). Estas presiones hacen crítica la vigilancia integrada superficie-subterránea (calidad, niveles piezométricos, caudales) (Morillo 2023).



Figura No. 2: Imagen satelital de la presa de Hatillo.

2.6.1 Embalse

Según Montaña, (2019), lo define como un lugar de captación de agua, que puede ser natural, como en el caso de los lagos, o artificial si hay una presa que interrumpe el curso del río. La forma y el tamaño están determinados por las características geológicas, mientras que la ramificación de la red hidrográfica también depende de las precipitaciones, el tipo de suelo, la vegetación y la actividad humana.

De igual modo, en un embalse artificial suele haber una presa que, además de crear una reserva de agua, también ayuda a aumentar la diferencia de altura para el salto de agua. Dependiendo de la distancia respecto a la central, el agua se puede transportar directamente a través de una tubería forzada, o pasar primero por otro tipo de componentes hidráulicos como canales o túneles.

Cabe destacar, que cada presa está vinculada a unas medidas para regular el nivel del embalse, como los rebosaderos, unos canales que permiten derivar el agua, facilitando que ésta fluya en caso de que el nivel de llenado supere el límite máximo.

El mismo autor expresa que la función del embalse es actuar como un depósito de energía renovable para su futura conversión mediante la liberación de agua de manera controlada, según sea necesario. La creación de un embalse también permite que el agua repose y, durante el tiempo que pasa dentro del embalse, la mayoría de las impurezas y residuos presentes en el río se depositan en el fondo, lejos de la zona de entrada. Aun así, la limpieza final del agua está garantizada gracias a los sistemas de filtración en la entrada, que permiten que la central hidroeléctrica funcione con seguridad.



Figura No. 3: Imagen satelital embalse presa de Hatillo.

2.3. Marco conceptual

En términos hidrogeológicos, un acuífero se define como un cuerpo de roca o sedimento que puede almacenar y transmitir agua subterránea de forma explotable. En el Cibao coexisten principalmente:

Acuíferos detríticos aluviales (valle fluvial): Depósitos recientes con alta porosidad efectiva y conductividad hidráulica variable, responsables de la mayor parte de la explotación para riego y consumo local.

Acuíferos carbonatados o de calizas periféricas: En sectores donde afloran rocas carbonatadas (ej. bordes de la cordillera), presentan conductividad heterogénea asociada a fracturación y karstificación.

La caracterización litológica y la geometría de estos cuerpos determinan la vulnerabilidad a la contaminación, el régimen de recarga y la respuesta frente a extracciones.

Acuíferos porosos aluviales: Depósitos de gravas-arenas del Yuna y afluentes con alta conductividad hidráulica (K) y transmisividad (T), recarga difusa por infiltración de precipitación y recarga inducida fluvial. Son los cuerpos de mayor vulnerabilidad intrínseca por su escasa atenuación y profundidades freáticas someras.

Medios de baja permeabilidad (ígneo-volcánicos fracturados): Almacenamiento en fracturas/discontinuidades, porosidad efectiva baja, recarga preferencial por fisuras; vulnerabilidad más heterogénea dependiente del grado de fracturamiento.

Conectividad GW SW (groundwater surface water): El flujo base hacia el Yuna y la retención en Hatillo condicionan el transporte de solutos; los procesos de sorción/precipitación en sedimentos del embalse modulan la señal química aguas abajo.

Porosidad y poros conectados: Determinan la cantidad de agua almacenada.

Permeabilidad y conductividad hidráulica (K): Controlan la facilidad con que el agua se mueve dentro del acuífero; son esenciales para estimar flujos y tiempos de tránsito.

Transmisividad y almacenamiento específico (storativity): relacionan la respuesta del acuífero ante extracciones (caudal y descenso piezométrico).

Tipo de acuífero: Acuíferos porosos (sedimentos), fracturados (roca competente) y kársticos (calizas disueltas) presentan comportamientos hidráulicos y de vulnerabilidad muy distintos p. ej., los kársticos suelen tener conductos preferenciales que aumentan la velocidad de transporte de contaminantes.

Geometría y confinamiento: Acuíferos libres, semiconfinados y confinados presentan distinta protección natural frente a contaminación superficial.

Estas características condicionan tanto la disponibilidad como la susceptibilidad frente a contaminantes y son la base de cualquier evaluación hidrogeológica.

CAPÍTULO III

PROPUESTA DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO

3.1 Descripción de la propuesta

El objetivo de esta propuesta consiste en elaborar una planificación de gestión posible, integral y sostenible de los acuíferos de la comarca de Cotuí con el deseo de disminuir los riesgos de vulnerabilidad medioambiental producidos sobre todo por la acción extractiva, la dinámica de crecimiento urbano y ético, la falta de un sistema de vigilancia. La propuesta se refiere a los resultados del diagnóstico anterior ya la necesidad de apremiante de plantear estrategias sobre las características de protección y uso racional de los recursos hídricos subterráneos de la zona.

La propuesta tiene una base que combina investigación hidrogeológica, educación ambiental, implicación de la sociedad civil e implicación institucional. Para el sistema de vigilancia se levantará a una sentencia de vigilancia para los acuíferos, actividades de conservación en el área de recargas y se generará el compromiso socialmente compartido por todas las partes interesadas, con las mineras, con las personas y con la población.

3.2 Matriz FODA

Fortalezas	Debilidades
Abundancia de recursos hídricos subterráneos.	Ausencia de un sistema permanente de monitoreo hidrogeológico.
Apoyo de instituciones académicas y técnicas como UTECO e INDRHI.	Falta de cultura ambiental en algunos sectores de la población.
Existencia de normativas ambientales vigentes.	Recursos económicos limitados para inversión ambiental.
Oportunidades	Amenazas
Disponibilidad de cooperación internacional en temas ambientales.	Contaminación potencial por la actividad minera y vertidos urbanos.
Interés creciente de la sociedad por el cambio climático y la protección del agua.	Sobreexplotación de los acuíferos por consumo desregulado.
Marco legal favorable con la Ley 64-00 y la Ley de Aguas.	Expansión urbana desordenada sin planificación hídrica.

3.3 Alcances y límite:

- ✓ **Alcance geográfico:** La propuesta se focaliza en el municipio de Cotuí y su área de influencia directa dentro del embalse de la presa de Hatillo.
- ✓ **Alcance temático:** Evaluación de los acuíferos, diseño e implementación de estrategias de monitoreo, educación ambiental y fortalecimiento institucional.
- ✓ **Límites:** El proyecto no contempla una remediación inmediata de zonas ya contaminadas, ni inversiones a gran escala en infraestructura hídrica; se enfoca en prevención, monitoreo y gestión comunitaria.

3.4 Objetivos de la propuesta

Objetivo general:

Evaluar las características hidrológicas en los acuíferos en la región de Cotuí y determinar su relación hidrogeológica con el embalse de la Presa de Hatillo, con el propósito de generar información técnica que contribuya a la planificación hídrica sostenible.

Objetivos específicos:

- a) Discutir las propiedades físicas e hidráulicas de los acuíferos primarios en Cotuí basándose en cambios en la captación de agua, puntos de posición y capacidad de almacenamiento.
- b) Evaluar las condiciones de recarga y descarga de los acuíferos, su infiltración efectiva, flujos subterráneos y áreas de conexión potencial con el embalse de Hatillo.
- c) Evaluar los efectos hidrodinámicos que el embalse de Hatillo tiene sobre los acuíferos circundantes a través de análisis piezométricos, estudios comparativos y la generación de un modelo hidrogeológico conceptual.

3.5 Plan de acción

Objetivo	Actividad Principal	Responsables	Duración Estimada	Recursos Necesarios
a) Analizar parámetros hidrogeológicos	▪ Recolección de datos de campo (pozos, niveles freáticos, caudales).	INDRHI + UTECO	3 meses	Equipos de medición, personal técnico.
	▪ Análisis fisicoquímico y microbiológico de muestras de agua.	Laboratorio + UTECO	2 meses	40 muestras de agua, kits de análisis.
b) Evaluar la clasificación de acuíferos	▪ Elaboración de mapas hidrogeológicos y perfiles estratigráficos.	UTECO + Servicio Geológico Nacional	2 meses	Software SIG, georreferenciación, personal técnico.
	▪ Identificación de tipo de acuífero (poroso, fracturado, kárstico).	INDRHI + expertos externos	1 mes	Documentación geológica y fichas técnicas.
c) Identificar factores naturales de vulnerabilidad	▪ Observación de factores geológicos, climáticos y de uso del suelo.	UTECO + Medio Ambiente	2 meses	GPS, registros climáticos, cartografía.
	▪ Recolección de datos de precipitación y recarga hídrica.	ONAMET + INDRHI	2 meses	Datos meteorológicos, modelos hidrológicos.
d) Determinar grado de vulnerabilidad y proponer estrategias de mitigación	▪ Aplicación de metodologías (DRASTIC / GOD) y elaboración de índices.	UTECO + INDRHI	3 meses	Software SIG, analistas especializados.
	▪ Taller de validación de resultados con comunidades y actores clave.	UTECO + Comité local	1 mes	Material didáctico, facilitadores.
	▪ Redacción de propuesta de estrategias de mitigación.	UTECO + Medio Ambiente	2 meses	Equipo redactor, asesoría técnica.

Fuente: Elaboración Propia, 2025.

3.6 Cronograma de elaboración de la propuesta

No.	Partidas / Actividad	Cantidad	Unidad	P.U	Sub total \$
1	Parámetros hidrogeológicos				
1.1	Muestreo y análisis de agua	40	Uds	4000	160,000.00
1.2	Equipos de campo y medición	1	P:A		250,000.00
	(GPS, sondas, piezometros)				
					410,000.00
2	Clasificación de acuíferos				
2.1	Mapas y mdelos hidrogeológicos	1	P:A		60,000.00
2.2	Software Sig personal	1	Uds	50000	60,000.00
2.3	Identificación de tipos de acuíferos	1	P:A		80,000.00
	consultorías especializadas				
					200,000.00
3	Identificación factores naturales				
3.1	Observaciones geológicas y climáticas	1	P:A		150,000.00
3.2	Datos meteorológicos y análisis hidrológicos	1	P:A		100,000.00
					250,000.00
4	Determinación de vulnerabilidad y estrategias de mitigación				
4.1	Aplicación de métodos GOD	1	P:A		200,000.00
4.2	Talleres de validaciones comunitarias	3	Sesiones	30000	90,000.00
4.3	Elaboración de propuestas y redacción final	1	Uds	120000	120,000.00
					410,000.00
5	Gestión y logística del proyecto				
5.1	Coordinación y transporte	1	P:A		1,000,000.00
5.2	Viáticos	1	P:A		200,000.00
5.3	Papelería y material gastable	1	P:A		100,000.00
					1,300,000.00
	Sub total general				2,570,000.00
6	Imprevistos	5	%		128,500.00
	Total general				2,698,500.00

Fuente: Elaboración Propia, 2025.

3.7 Presupuesto.

Objetivo	Actividad / recurso	Inversion \$RD
a) Analizar parámetros hidrogeológicos	Muestreo y análisis de agua (40 muestras x RD\$ 4,000)	160,000.00
	Equipos de campo y medición (GPS, sondas, piezómetros)	250,000.00
Subtotal A		410,000.00
b) Evaluar clasificación de acuíferos	Mapas y modelos hidrogeológicos (software SIG, personal)	120,000.00
	Identificación de tipos de acuíferos (consultorías especializadas)	80,000.00
Subtotal B		200,000.00
c) Identificar factores naturales	Observaciones geológicas y climáticas	150,000.00
	Datos meteorológicos y análisis hidrológicos	100,000.00
Subtotal C		250,000.00
d) Determinar vulnerabilidad y estrategias de mitigación	Aplicación de métodos GOD	200,000.00
	Taller de validación comunitaria (3 sesiones)	90,000.00
	Elaboración de propuesta y redacción final	120,000.00
Subtotal D		410,000.00
Gestión y logística del proyecto	Coordinación, transporte, viáticos, papelería	1,200,000.00
	Equipos de campo, piezómetro Transporte, logística Imprevisto	265,000.00
Subtotal Gestión		1,200,000.00
Imprevisto	5 %	250,000.00
Total del Proyecto		RD\$ 2,670,000.00

Fuente: Elaboración Propia, 2025.

3.8 Análisis de factibilidad

Factibilidad técnica: La tecnología necesaria para la implementación del sistema de monitoreo está disponible a nivel nacional. Se cuenta con el respaldo técnico del INDRHI, UTECO y otras instituciones académicas.

Factibilidad económica: El proyecto es de bajo costo relativo y puede ser financiado a través de fondos públicos (Presupuesto Nacional, Ministerio de Medio Ambiente), cooperación internacional, además, el proyecto aportará grandes beneficios a la salud.

Factibilidad institucional: Existe una base legal sólida y voluntad institucional para mejorar la gestión de los recursos hídricos. El proyecto puede articularse con las estrategias nacionales de cambio climático y sostenibilidad ambiental.

3.9 Sostenibilidad

La sostenibilidad del proyecto se implementa en un alcance integral que considera las dimensiones técnicas, sociales, institucionales y económicas. En primer lugar, el desarrollo de una red de monitoreo hidrológico proporcionará información actualizada y accesible sobre la calidad y disponibilidad del agua subterránea, apoyando así el diagnóstico continuo y la toma de decisiones científicas. De manera similar, la capacitación técnica de los organismos locales como UTECO, INDRHI y El Ministerio de Medio Ambiente, fortalece las capacidades técnicas para asegurar que las acciones planificadas no se basen en apoyo externo, sino que se integren en la gestión pública y comunitaria de manera perpetua.

Por otro lado, la sostenibilidad social y económica se garantiza mediante la participación de las comunidades locales y la cooperación de los actores clave, como la empresa minera, las organizaciones sociales y productivas. El establecimiento de mecanismos de corresponsabilidad crea oportunidades para la apropiación y perpetuidad del proyecto a largo plazo. La financiación a largo plazo en programas de cooperación internacional y los marcos regulatorios, incluyendo la Ley Ambiental y la Ley de Aguas, se reflejan en esta declaración en vista de la demanda no solo de resultados inmediatos,

sino de un modelo de gestión que no se detenga solo en esta cuenca, sino que pueda replicarse en otras cuencas hidrográficas del país.

3.10 Monitoreo y seguimiento

Para garantizar la efectividad del proyecto, el monitoreo y seguimiento del proyecto constituyen un componente esencial para garantizar la efectividad de las actividades planteadas y la coherencia entre los objetivos específicos, los resultados esperados y las estrategias de mitigación propuestas. Este proceso permitirá identificar avances, limitaciones y oportunidades de mejora en cada fase de la investigación, asegurando así la sostenibilidad de las acciones implementadas.

1. Enfoque del monitoreo

El sistema de monitoreo se fundamenta en indicadores técnicos, sociales e institucionales que reflejan el progreso del proyecto en relación con los objetivos propuestos:

- **Técnicos:** Calidad del agua, niveles freáticos, mapas de vulnerabilidad.
- **Sociales:** Nivel de participación comunitaria y grado de sensibilización ambiental.
- **Institucionales:** Cumplimiento de compromisos de las entidades involucradas y efectividad de la cooperación interinstitucional.

2. Estrategia de seguimiento

Se plantea un esquema de seguimiento en tres niveles:

a) Monitoreo técnico-científico

Revisión periódica de las bases de datos hidrogeológicas obtenidas en campo.

Análisis de los resultados de laboratorio y contrastación con estándares nacionales e internacionales de calidad de agua.

Evaluación del funcionamiento de los pozos de monitoreo y sensores instalados.

b) Monitoreo comunitario y social

Encuestas y entrevistas aplicadas a la población beneficiaria antes y después de las intervenciones.

Registro de asistencia y participación en talleres comunitarios y validación de estrategias de mitigación.

Retroalimentación a través de comités locales para ajustar acciones en tiempo real.

c) Monitoreo institucional y administrativo

Informes trimestrales de avances dirigidos al comité técnico local y a las entidades colaboradoras como UTECO, INDRHI, Ministerio de Medio Ambiente.

Reuniones de coordinación interinstitucional cada seis meses para validar avances y tomar decisiones estratégicas.

Auditoría técnica y administrativa anual para evaluar la eficiencia en el uso de recursos.

CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Propuesta de Estudio Hidrológico de los Acuíferos en la Región de Cotuí y su Relación con el Embalse de la Presa de Hatillo

4.1 Introducción

La región de Cotuí presenta un sistema hidrogeológico de alta relevancia para el abastecimiento de agua y el equilibrio ecológico local. La presencia de acuíferos interconectados y su proximidad al embalse de la Presa de Hatillo conforman un escenario hidrológico complejo que requiere de estudios actualizados para su adecuada gestión. Sin embargo, la información existente sobre la interacción entre los acuíferos y el embalse es limitada, lo que genera incertidumbre en la planificación hídrica y ambiental del territorio.

La presente propuesta tiene como finalidad plantear un estudio integral que permita caracterizar las propiedades hidrológicas de los acuíferos de Cotuí, analizar sus mecanismos de recarga y descarga, y evaluar la influencia hidrodinámica del embalse de Hatillo sobre el comportamiento del agua subterránea. Este estudio se fundamenta en un enfoque metodológico hidrogeológico, orientado a producir resultados precisos que sirvan como base para la gestión sostenible del recurso hídrico.

4.2 Objetivos

4.2.1 Objetivo general

Evaluar las características hidrológicas de los acuíferos en la región de Cotuí y determinar su relación hidrogeológica con el embalse de la Presa de Hatillo, con el propósito de generar información técnica que contribuya a la planificación hídrica sostenible.

4.2.2 Objetivos específicos

Discutir las propiedades físicas e hidráulicas de los acuíferos primarios en Cotuí basándose en cambios en la captación de agua, puntos de posición y capacidad de almacenamiento.

Evaluar las condiciones de recarga y descarga de los acuíferos, su infiltración efectiva, flujos subterráneos y áreas de conexión potencial con el embalse de Hatillo.

Evaluar los efectos hidrodinámicos que el embalse de Hatillo tiene sobre los acuíferos circundantes a través de análisis piezométricos, estudios comparativos y la generación de un modelo hidrogeológico conceptual.

4.3 Desarrollo de la propuesta

Concepto de presa

Una presa es una estructura construida en el agua para interceptar y/o desviar agua para uso futuro o para proteger un lugar de los efectos del agua.

4.3.1 Caracterización física e hidráulica de los acuíferos

En esto, se anticipa una amplia caracterización de los acuíferos, de acuerdo con nuestro primer propósito a través de investigaciones hidrogeológicas y geofísicas. El mapeo geológico, el mapeo de unidades litológicas, la caracterización de entidades que controlan el agua subterránea a través de pruebas hidráulicas (permeabilidad, bombeo) verificando la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento son parte de este esfuerzo. Además, de manera geofísica, podríamos

determinar espesores saturados, zonas de fractura, profundidades del nivel freático y diferencias texturales subterráneas. Todos estos análisis proporcionarán una sólida base científica sobre la cual estructurar los tipos de acuíferos ubicados en la región (no confinados, semi-confinados o confinados) y la susceptibilidad que sufren por presiones del entorno.

La evaluación de la calidad del agua se realizó utilizando varios puntos de muestreo de agua.



Fuente propia: Muestreo de agua en los diferentes pozos realizado por los investigadores, 2025.

Calidad del agua

La capacidad del sistema para sostener la vida en el límite entre el agua y el sedimento también debe mantenerse bien. La calidad del agua de los sedimentos está

parcialmente ligada a las características de la cuenca y la naturaleza tanto del ambiente acuático como de los procesos, ya sean naturales o humanos, que tienen lugar en el suelo. La calidad del agua y la calidad de los sedimentos se tratan en combinación, y se discuten las interrelaciones entre estos diversos aspectos del ambiente acuático y la cuenca.

Estudio de las características hidrológicas

La mayoría de estas especificaciones están preparadas para un sitio definido por un arroyo o río. Los hidrogramas anuales son gráficos que muestran patrones de flujo a lo largo de un año en un lugar específico. Puedes mostrar la variabilidad del flujo y los períodos de altos y bajos flujos a través de hidrogramas. Los datos hidrométricos son el conjunto de datos que informa sobre los flujos.

Los factores comunes y las condiciones extremas de flujo se clasifican mediante varias razones hidrológicas. Estos son algunos de los indicadores comunes que se utilizan con mayor frecuencia:

Flujo, el flujo a través de una sección transversal designada del lecho del río en m^3/s .

Flujo máximo, el flujo más alto reportado para un día dado de todos los años de flujos registrados.

Flujo mínimo, el flujo más bajo registrado para un día dado de todos los años de registros de flujo.

Flujo mediano, el valor de flujo registrado donde el 50% de los flujos registrados para un día dado son mayores y el 50% de los flujos registrados son menores.

Cuartil superior, donde el 25% de los flujos registrados para un día especificado son mayores y el 75% de los flujos registrados son menores.

Cuartil inferior, donde el 75% de los flujos registrados para cualquier día dado son mayores mientras que solo el 25% de los flujos registrados son menores.

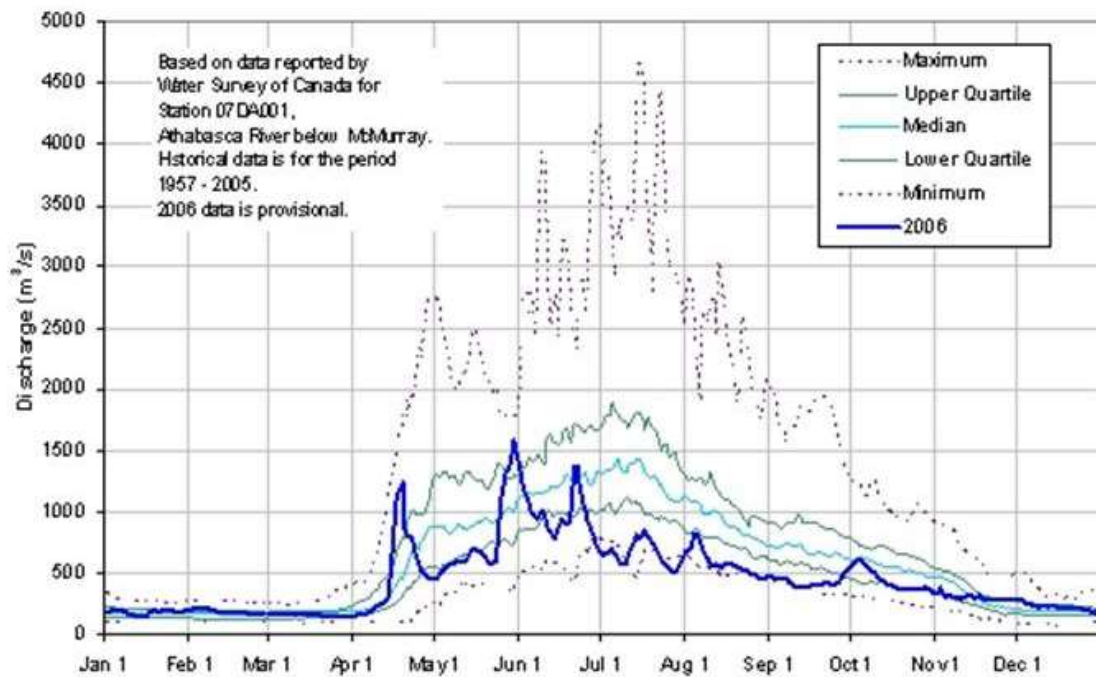


Figura No. 4: Hidrograma.

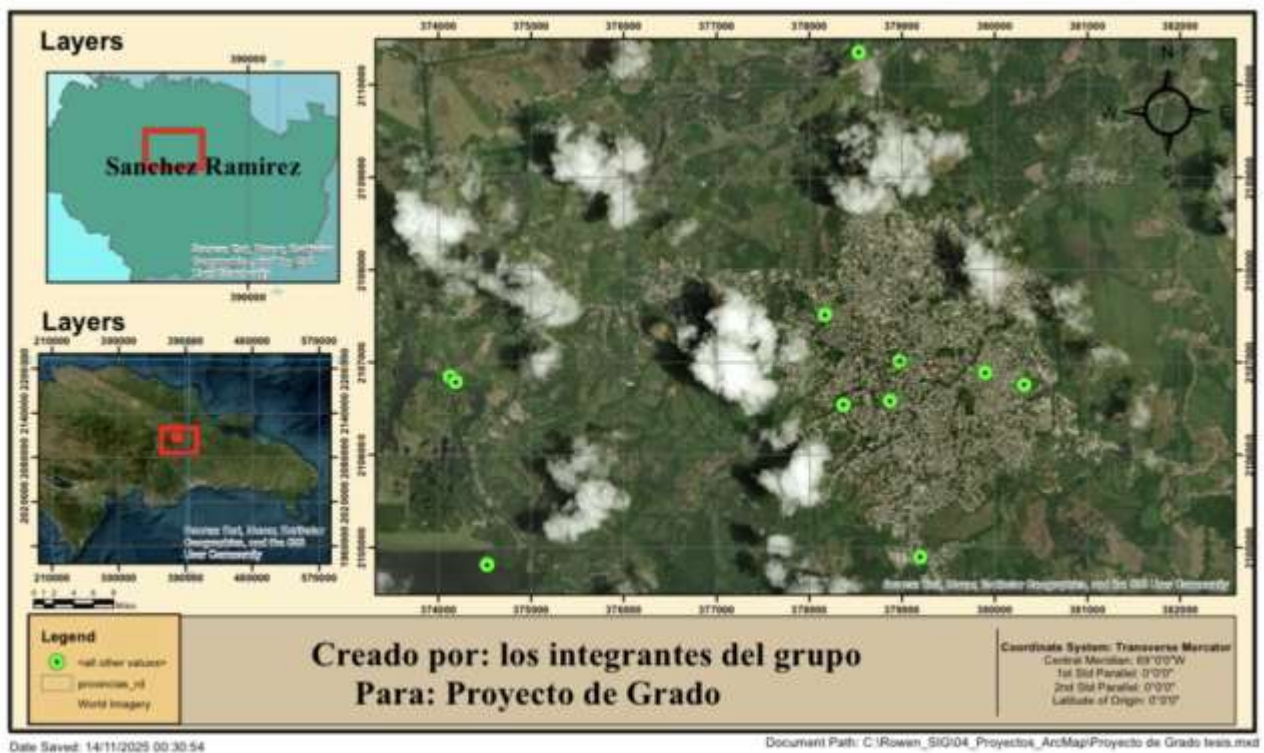


Figura No. 5: Leyenda satelital de los puntos de ubicación de los distintos pozos, 2025.

Coordenadas de Pozos

Pozos	Coordenada E	Coordenada N	Altitud
Pozo de la Finca de UTECO, Quita Sueño, Cotuí	0374129 E	2106854 N	68 m
Pozo del Puente Yuna, Cotuí-La mata	0378538 E	2110356 N	50 m
El Tanque, Los Mineros, Cotuí	378402 E	2106549 N	201 m
El Medidor, Presa de Hatillo	374532 E	2104818 N	97 m
Llave, Pueblo Nuevo, Cotuí	378174 E	2107523 N	79 m
Llave, El Paraíso, Cotuí	378876 E	2106590 N	67 m
Rio de la Finca de UTECO	376188 E	2106795 N	63 m
Pozo, Los Cocos, Cotuí	378978 E	2107022 N	78 m
Pozo, La Altagracia, Cotuí	379904 E	2106896 N	88 m
Pozo, Urbanización los Maestros, Cotui	380319 E	2106765 N	57 m
Pozo, Nuevo Milenio, Cotuí	379198 E	2104903 N	121 m

Fuente propia: Coordenada de los distintos pozos, 2025.

4.3.2 Análisis de la recarga y descarga de los acuíferos

Nos estamos enfocando en estudiar la recarga y descarga natural de los acuíferos. Esto se llevará a cabo desarrollando un balance hídrico basado en datos de precipitación, evapotranspiración e infiltración efectiva. Las áreas de recarga se determinarán en función de datos geomorfológicos, de suelo y de cobertura vegetal. En puntos estratégicamente ubicados, se instalarán piezómetros para observar las variaciones en el nivel freático y la variación estacional, al mismo tiempo que se estima los gradientes hidráulicos más comunes que dominarán.

Además, se llevarán a cabo análisis físico-químicos e isotópicos (si es técnicamente factible) para encontrar la fuente de agua subterránea y determinar la influencia del embalse como fuente de recarga inducida. Además, también generaremos un inventario de manantiales y descargas base de los ríos locales para determinar la dinámica de la circulación del agua subterránea en el sistema hidrogeológico regional.

4.3.3 Evaluación de la influencia del embalse de Hatillo

El tercer objetivo es analizar la participación del embalse de Hatillo y los acuíferos circundantes. Con esto en mente, se sugiere observar sistemáticamente los niveles piezométricos en comparación con los cambios en el nivel del embalse durante los períodos húmedos y secos. Este análisis permitirá identificar si hay una respuesta hidráulica directa o indirecta en los acuíferos debido a la operación del embalse. Se monitorearán los gradientes hidráulicos para determinar la dirección del flujo de agua subterránea, así como para probar si el embalse sirve como fuente de recarga, zona de descarga o si la interacción es mínima. Se crea un modelo del flujo del sistema hidrogeológico que describe la dinámica del flujo y los posibles vínculos entre los acuíferos y el embalse. Este será un modelo fundamental para la gestión de recursos; permitiendo un análisis del grado en que el embalse está impactando la explotación de aguas subterráneas y la calidad del recurso en áreas en riesgo.

4.4 Cronograma de implementación

El estudio se desarrollará en un periodo estimado de seis a ocho meses, distribuidos en las siguientes fases:

Fase	Actividades principales	Duración estimada
Diagnóstico preliminar	Revisión documental y cartografía geológica y análisis de agua.	1 mes
Trabajo de campo	Pruebas hidráulicas, geofísica e instalaciones de piezómetros	2 meses
Monitoreo hidrológico	Medición de niveles, muestro y registro de variaciones del embalse	2-3 meses
Análisis e interpretación	Procesamiento de datos y elaboración del modelo conceptual	1 mes
Redacción del informa	Integración de resultados y recomendaciones	1 mes

CAPÍTULO V: CONSIDERACIONES FINALES

5.1 Conclusiones

Después de una investigación exhaustiva sobre Evaluar las características hidrológicas en los acuíferos en la región de Cotuí y determinar su relación hidrogeológica con el embalse de la Presa de Hatillo, con el propósito de generar información técnica que contribuya a la planificación hídrica sostenible”, se llegó a las siguientes conclusiones:

Se describen las propiedades físicas e hidráulicas de los acuíferos primarios en Cotuí basándose en cambios en la captación de agua, puntos de posición y capacidad de almacenamiento.

Se evaluaron las condiciones de recarga y descarga de los acuíferos, su infiltración efectiva, flujos subterráneos y áreas de conexión potencial con el embalse de Hatillo.

Se evaluaron los efectos hidrodinámicos que el embalse de Hatillo tiene sobre los acuíferos circundantes a través de análisis piezométricos, estudios comparativos y la generación de un modelo hidrogeológico conceptual.

5.2 Recomendaciones

Mantener un seguimiento continuo del comportamiento del agua subterránea, dado que los acuíferos de Cotuí muestran dinámicas particulares en cuanto a niveles, calidad y almacenamiento, es importante establecer un monitoreo permanente.

Gestionar el agua de forma integrada y coordinada, como el estudio confirmó que existe una relación directa entre los acuíferos y el embalse de Hatillo, se recomienda que las instituciones responsables trabajen de manera conjunta para manejar tanto las aguas superficiales como las subterráneas.

Cuidar y proteger las zonas donde el agua logra infiltrarse, debido a la importancia que tienen los procesos de recarga para mantener los acuíferos, es fundamental proteger las áreas donde el agua de lluvia puede filtrarse al subsuelo.

Profundizar en el estudio del comportamiento del embalse sobre los acuíferos, la influencia del embalse sobre los niveles del agua subterránea quedó demostrada en la evaluación, por lo que se recomienda continuar desarrollando modelos hidrogeológicos más completos.

Educar y sensibilizar a la población sobre la importancia del agua subterránea, para proteger estos recursos, es esencial que las comunidades, productores y actores locales comprendan cómo funcionan los acuíferos y cómo sus acciones pueden impactarlos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo Rasco, F. (2012). Metodología de la investigación cualitativa. Editorial Síntesis.
- Aguilera, M. (2021) Metodología para Determinar Calidad Natural en Acuíferos. Publicado en RCGD, pag. 26-51.
- Creswell, J. W. (2014). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4th ed.). SAGE Publications.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). Designing and conducting mixed methods research (3rd ed.). SAGE Publications.
- De León, P. (2022), “Caracterización y Análisis del manejo de los Residuos Sólidos en la Cuenca Baja del Río Yuna para mitigar los impactos de los Vertederos Municipales”. Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña Pag. 126-132.
- Escobar-Pérez, J., & Cuervo-Martínez, Á. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. Avances en Medición, 6(1), 27–36.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- IGN (2024). Recursos hidrográficos superficiales de la República Dominicana.
- INDRHI (Comunicado / Proyecto, 2024) Presentación de avances del proyecto “Mejora de la gestión de las aguas subterráneas en la República Dominicana” y seminarios técnicos sobre la cuenca del Yaque; documentación de iniciativas de gestión y fortalecimiento institucional.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2024). Conceptos básicos de hidrogeología (material divulgativo/educativo).
- Operación reciente Hatillo–Rincón (boletín oficial, 13-may-2024).
- Jiménez Chaves, F. (2021). Triangulación metodológica: Fundamentos y aplicaciones en investigación. Universidad Nacional de Asunción.
- Mind the Graph. (2023). Cómo realizar entrevistas semiestructuradas. <https://mindthegraph.com/blog/es/entrevista-semi-estructurada>.
- Memoria Geológica Hoja Cotuí (2018). Instituto Geológico / Servicio Geológico Nacional memoria geológica de la hoja Cotuí; descripción de litologías (Formación Hatillo, Formación Los Ranchos) y unidades relevantes para hidrogeología.

- Morillo, H.R. (2023). “Potencial hidrogeológico de la República Dominicana” (revisión y análisis del potencial y problemas de aguas subterráneas en el país; importancia de la recarga y presiones sobre acuíferos). Documento técnico / artículo de referencia para el contexto nacional.
- Navarro-Frómeta, A. E., et al. (2024). Presencia de micro contaminantes orgánicos en aguas y suelos agrícolas artículo en Tierra Latinoamericana/Scielo (2024). Documento que revisa detección y rutas de micro contaminantes (fármacos, plaguicidas).
- Lambis, A. T. (2020) Evaluación de la vulnerabilidad del sistema acuífero de Sabanalarga-Atlántico a partir de la aplicación de la metodología DRASTIC.
- Ortega, R. M. V. (2021). Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en cuencas (Cuba) — periódico científico (UNESP / repositorio).
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2023). Informe anual 2023. UNEP.
- Question-Pro. (2021). Guía de observación participante. <https://www.questionpro.com>
- Sandoval, C. (2002). Investigación cualitativa. Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior (ICFES).
- SGN. Hoja “Cotuí” (2019) (Memoria geológica). Santo Domingo: Servicio Geológico Nacional.
- Ramos, A. (2019). Caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica y propuesta de plan de protección en función de la contaminación del agua subterránea, en el acuífero del valle de Achuapa, Nicaragua.
- Rodríguez Núñez, V.A. (2023). Carga contaminante de la ciudad de Santiago de los Caballeros — estudio que aborda presiones por aguas residuales y su incidencia en cuerpos de agua (artículo/informe). (Repositorio BVE/ARMb).
- Servicio Geológico Nacional (2019). Memoria institucional 2024. Información y trabajos recientes sobre hidrogeología en República Dominicana (incluye referencias a inventarios y proyectos actuales).
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Hoja de ruta estratégica de la EPA en relación con las PFAS (versión en español). Documento que resume la estrategia sobre PFAS y medidas para su control y remediación.
- Vázquez-Guevara, L. G. (2023). Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Victoria (México) aplicando DRASTIC — artículo en SciELO México.

Vázquez Gainza, B., Farfán González, H., Díaz Guanche, C. (2021). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero kárstico Vento (La Habana, Cuba). (ResearchGate / artículo en español).

Varela Sánchez, M. (2012) Vulnerabilidad y protección de acuíferos en España: visión desde la administración. (Conferencia / documento IGME / Ministerio).

ANEXOS

Foto No. 2



Foto No. 3



Foto No. 4



Foto No. 5



Foto No. 6



Foto No. 7



Foto No. 8



Foto No. 9

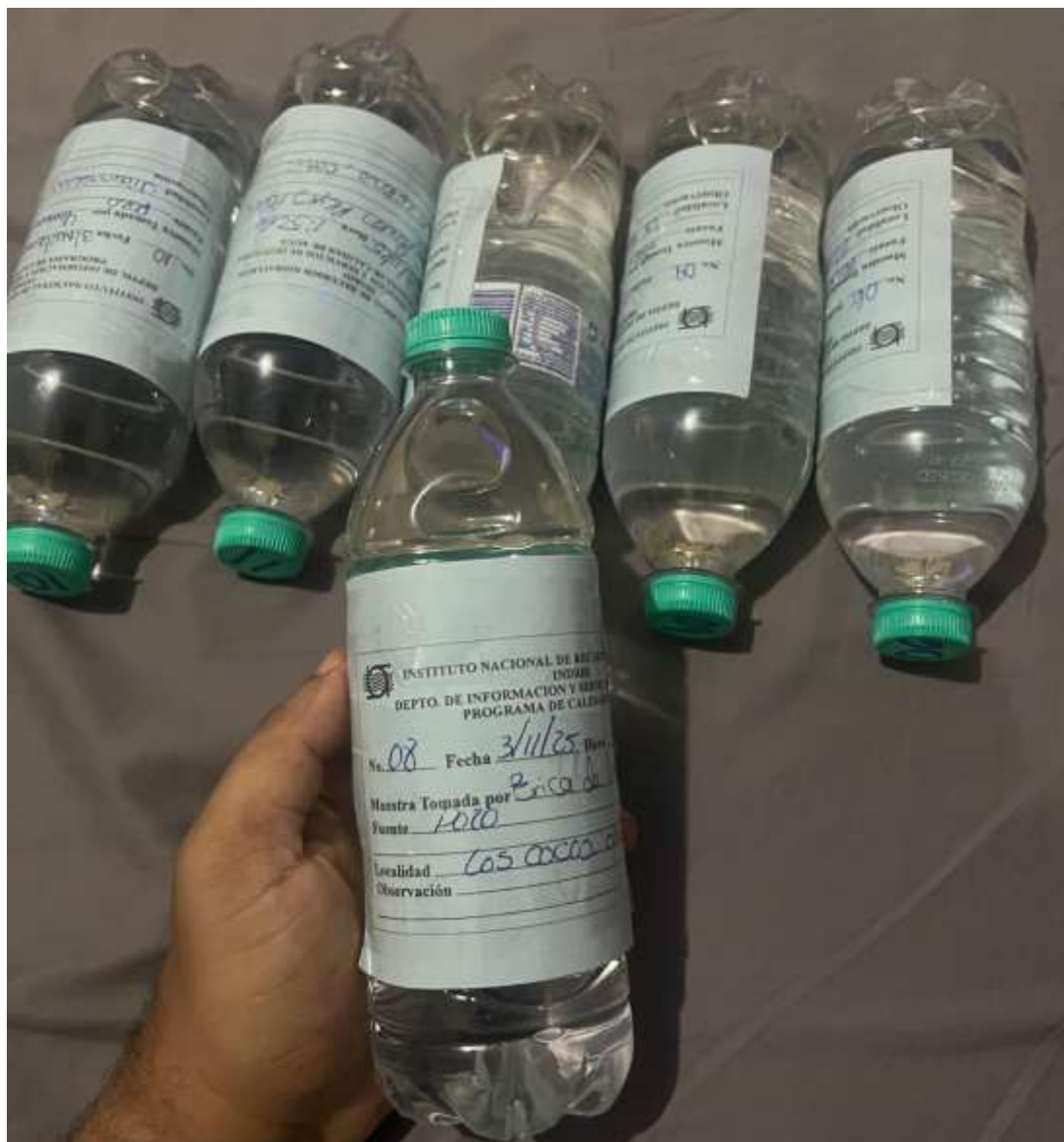


Foto No. 10



Foto No 11



Foto No. 12





INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS-INDRHI
CENTRO PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LOS ESTADOS INSULARES DEL CARIBE
ÁREA DE CALIDAD DE AGUA Y GESTIÓN AMBIENTAL
LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS



INDRHI

FORMULARIO DE REPORTE DE SALIDA DE DATOS

Solicitante	Eduard Ymmanuel Martínez (Estudiante)		Lugar	Distrito Nacional
Clasificación			Fecha	5 de noviembre de 2025
Operador				

FORMULARIO DE REPORTE DE SALIDA DE DATOS

Fecha de Muestreo	pH	CE (µS/cm)	Ca+2 (mg/l)	Mg (mg/l)	Na+ (mg/l)	CO3 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	D.T. (mg/l)	Alc. (mg/l)	STD (mg/l)	RAS	Clase	Lugar y Puntaje
15/10/2025	8.62	396.00	18.43	5.58	64.31	2.20	122.00	77.53	58.20	104.00	108.00	3.87	C2S1	Llave El Parrón, Puntos Nuevos, Caba
3/11/2025	7.96	291.00	29.10	10.04	25.04	0.00	170.80	3.69	94.58	140.00	149.00	1.12	C2S1	El Parrón, Caba
3/11/2025	8.05	259.00	11.64	7.81	38.38	0.00	122.00	11.08	46.08	100.00	120.00	2.40	C2S1	Rio Foca UTECO
3/11/2025	7.64	287.00	16.49	4.46	42.53	0.00	109.80	31.38	50.93	90.00	143.00	2.59	C2S1	Pozo Los Cocos, Caba
3/11/2025	7.40	292.00	60.14	12.27	55.42	0.00	183.00	109.28	177.03	150.00	297.00	1.81	C2S1	Pozo La Alagracia
3/11/2025	6.95	418.00	25.22	20.08	47.06	0.00	109.80	70.15	106.70	90.00	209.00	1.98	C2S1	Pozo Urbanización los Naranjos
3/11/2025	8.52	986.00	81.48	40.16	92.92	1.20	109.80	232.60	291.00	95.0	475.00	2.37	C2S1	Pozo Nuevo Molino, Caba
Valores Límites	6.5-8.5							250.00			1,000.00			

Aprobado Por

Enc. Area de Calidad de Agua y Gestión Ambiental

Sometido Por

Verificado Por

Laboratorio Calidad de Agua

Realizado Por

Enc. Area de Ficusquintico



FORMULARIO DE REPORTE DE SALIDA DE DATOS

Solicitante		Eduard Ynmanuel Martinez (Estudiante)		Lugar		Distrito Nacional	
Clasificación		Agua Superficiales		Fecha		9 de octubre de 2025	
Operador							

FORMULARIO DE REPORTE DE SALIDA DE DATOS

Fecha de Muestreo	pH	CE (µS/cm)	Ca+2 (mg/l)	Mg (mg/l)	Na+ (mg/l)	CO3 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	D.T. (mg/l)	Alc. (mg/l)	STD		Clase	Lugar y Puntaje
											(mg/l)	(mg/l)		
25/9/2025	7.50	550.00	0.00	26.77	99.73	0.00	122.00	110.76	58.20	100.00	275.00	275.00	C2S1	Puerto Yuma La Mayor
25/9/2025	8.10	900.00	0.00	46.85	68.15	0.00	170.80	88.61	101.85	140.00	250.00	250.00	C2S1	Los Miraflores de Tancos, Camu
25/9/2025	7.40	360.00	0.00	20.08	62.72	0.00	122.00	55.38	43.65	100.00	180.00	180.00	C2S1	Medio Pasa de Hualillo
25/9/2025	8.20	600.00	0.00	23.43	114.57	0.00	109.80	132.91	50.93	90.00	300.00	300.00	C2S1	Pirca de UTECO, Junta Santa Cruz
Valores Límites	6.5-8.5							250.00				1,000.00		

NORMA AMBIENTAL SOBRE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIALES Y COSTERAS

Aprubado Por	 Ene Area de Calidad de Agua y Gestión Ambiental	Sumando Por	 Coordinador de INDRHI
Verificado Por	 Laboratorio Calidad de Agua	Realizado Por	 Ene Area de Fisicoquimico

