

República Dominicana
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CIBAO ORIENTAL
(UTECO)
Universidad Patrimonio de la Comunidad



Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales

Escuela de Geología

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

TÍTULO:
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL DISTRITO MUNICIPAL
ZAMBRANA ABAJO

SUSTENTADO POR:
Wandy Miguel De La Cruz Del Rosario
Solanylly Elisa Mendoza Soto
José Baudilio Hilario Castillo
Francisco Batista

ASESOR:
Ing. Abel de Jesús Mota

Cotuí, Prov. Sánchez Ramírez, República Dominicana
Año 2025

Titulo:

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL DISTRITO MUNICIPAL
ZAMBRANA ABAJO**

Hoja de Evaluación

Título: Caracterización Hidrogeológica Del Distrito Municipal Zambrana Abajo

Sustentado por: Francisco Batista, Wandy Miguel De La Cruz Del Rosario, Solanlly Elisa Mendoza Soto, José Baudilio Hilario Castillo

Proyecto de Grado sometido a la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO) como requisito para obtener el título de Ingeniero en Geología

Ing. Abel de Jesús Mota

Profesor Asesor

Miembro del Comité Evaluador

Miembro del Comité Evaluador

Miembro del Comité Evaluador

Ana Belky Gil Torres

Coordinador de la Escuela de Geología

Juan Antonio Graciano Domínguez

Decano de la Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales

Calificación: _____

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Los conceptos emitidos en el presente trabajo de grado titulado "Caracterización hidrogeológica del Distrito Municipal Zambrana Abajo" son responsabilidad de los sustentantes de este. Las citas y consultas bibliográficas se han realizado respetando el derecho de autor; por tanto, se libera a la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO) de su responsabilidad, sin embargo, para la reproducción total o parcial se requiere de su autorización.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	i
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO	1
1.1 Descripción del contexto del proyecto	1
1.1.1 Situación geográfica.....	5
1.1.2 Marco geológico de Zambrana.....	10
1.1.3 Planteamiento Del Problema.....	33
1.2 Diagnóstico del Estado Actual	34
1.2.1 Objetivos del Diagnóstico	37
1.2.2 Metodología	38
1.2.2.1 Enfoque metodológico	39
1.2.2.2 Diseño y tipo de estudios:	40
1.2.2.3 Población:.....	43
1.2.2.4 Métodos y Técnicas de recolección de datos	46
1.2.2.5 Instrumentos de Validez:	46
1.2.2.6 Variables e indicadores:	47
1.2.2.7 Procedimientos:.....	48
1.2.2.8 Métodos y Técnicas de Análisis de Datos:.....	50
1.2.3 Presentación de los Resultados	55
1.2.4 Análisis de los Resultados.....	56
1.3 Descripción del Problema Específico a solucionar con el Proyecto	58
1.4 Análisis del Problema	60
1.5 Análisis de objetivos	63
1.6 Justificación.....	64
1.7 Análisis de Involucrados	66
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA O MARCO REFERENCIAL	69
2.1 Introducción	69
2.2 Antecedentes	70
2.3 Marco Teórico	79

2.3.1 Geología e hidrogeología	79
2.3.2 Propiedades del agua subterránea	82
2.3.3 Geología de la República Dominicana.....	88
2.3.4 Geología de la Región del Distrito Municipal Zambrana Abajo	89
2.3.5 Estructuras Geológicas Relevantes	91
2.3.6 Modelación del Relieve	94
2.4 Marco conceptual	98
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	101
3.1 Introducción	101
3.2 Descripción de la Propuesta	101
3.3 Alcance y limite	102
3.5 Plan de Acción	105
3.6 Cronograma de Implementación	106
3.7 Presupuesto	108
3.8 Análisis de factibilidad.....	109
3.9 Sostenibilidad.....	110
3.10 Monitoreo y seguimiento	111
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS	113
4.1 Introducción	113
4.2 Contexto Geológico e Hidrogeológico.....	124
4.3 Resultados Fisicoquímicos.....	124
Análisis del Nivel Freático.....	125
4.4 Interpretación Ambiental	126
4.5 Discusión General	127
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	128
5.1 Conclusiones	128
5.2 Recomendaciones.....	129
Referencias.....	131
Anexos	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Distrito Municipal Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	2
Figura 3. Marco Geográfico del Distrito Municipal Zambrana Abajo Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	7
Figura 4. Mapa de ruta para llegar al área de estudio. Fuente Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	9
Figura 5. Mapa Geológico del Área de Estudio. Fuente: Adaptado de la Hoja Geológica 6172-I Hatillo, 1:50,000. DIGECOG, 1999. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	12
Figura 6. Mapa Litológico Del Distrito Municipal Zambrana Abajo Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025, hoja Geológica 6172-1 (SGN)	19
Figura 7. Mapa de Cuencas y Subcuencas Hídricas. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025.	21
Figura 9: Mapa Isoyeta de precipitaciones. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	25
Figura 10: Gráfico de precipitaciones 2021. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	26
Figura 9 Mapa Isoyeta de precipitaciones. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	26
Figura 11: Gráfico de precipitaciones 2020. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	26
Figura 12: Gráfico de precipitaciones 2019. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	27
Figura 13: Gráfico de precipitaciones 2018. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	27
Figura14: Gráfico de precipitaciones 2018. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	28
Figura15: Gráfico de precipitaciones 2017. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	28
.....	29
Figura 16: Gráfico de precipitaciones 2016. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	29
Figura 17: Gráfico de precipitaciones 2015. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	29
.....	30

Figura 18: Gráfico de precipitaciones 2014. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	30
Figura 19: Gráfico de precipitaciones 2013. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	30
Figura 20: Gráfico de precipitaciones 2012. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	31
Figura 21: Gráfico de precipitaciones 2011. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	31
Figura 22: Gráfico de precipitaciones 2011-2021. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	32
Figura 23. Mapa de inventario de pozos de captación de aguas subterráneas en el Distrito Municipal Zambrana Abajo Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025, hoja Geológica 6172-1 (SGN)	45
Figura 24: Mapa Geológico Del Distrito Municipal Zambrana abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025.....	93
Figura 24: Mapa modelado del relieve del distrito municipal Zambrana abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025.....	95
Figura 25: Mapa de las comunidades del distrito municipal Zambrana abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025.....	97
Figura 26: Mapa de las comunidades que se trabajaron en el distrito Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025.....	104
Figura 27: Mapa geológico del distrito Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 202	115
Figura 28: Mapa de curvas isofreaticas y dirección del flujo de agua subterránea en el distrito Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025 ..	118
Figura 29: Mapa de curvas isofreaticas y dirección del flujo de agua subterránea en el distrito Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025 ...	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Listado de las estaciones, con coordenadas para la descripción de las condiciones meteorológicas	23
Tabla 2: Inventario de pozos de captación de aguas subterráneas en el distrito municipal Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025.	44
Tabla 3 : Inventario de pozos de aguas subterráneas en el distrito municipal Zambrana Abajo, con parámetros de profundidad, Elv. N. E, PH, OD.: Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025	53
Tabla 4: Resultados de los parametros realizados	120

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos 1. Cuestionario aplicado a la comunidad	135
Anexos 2: Fotografías realizadas en zona de estudio	136
Anexos 3: Fotografías en las formaciones y miembros de la zona de estudio.....	143
Anexos 4: Gráficos de resultados:	145
Anexos 5: Imagen de referencias	147
Anexos 6: Mapas realizados en el estudio:	148

DEDICATORIAS

Primero elevo una plegaria a **Dios**, por ser guía constante en cada paso de este largo camino que me motivo a seguir firme sin desmayar para poder alcanzar los objetivos y llegar a la meta, dedico este logro a quienes me sostuvieron con fe y ternura cuando más lo necesité., los que estuvieron aun en silencio acompañándome al caminar.

Agradezco a mí familia, por su amor incondicional, por creer en los momentos en que dudé, y por ser el motor que me impulsó a continuar.

A profesores, por su orientación y a todas las personas que, directa o indirectamente contribuyeron a este proceso de crecimiento académico y personal, gracias por sembrar la pasión, los conocimientos y sus enseñanzas que van más allá de lo académico, a los amigos **Rolando Muñoz Mejía, Elpidio Moronta, Ramon Esteban Marte Ferreira**, amistades y compañeros de estudios que, con su compañía, escucha y palabras de aliento hicieron más llevadero este trayecto.

A si mismo, por no rendirme y continuar aun cuando parecía no haber fuerzas, confiar en que todo esfuerzo tarde o temprano llegaran los frutos.

Isaías 41:10

“No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia.”

FRANCISCO BATISTA

Siempre agradecido, con **Dios** mi padre todopoderoso por iluminar mi camino, darme fuerza cuando flaqueaba y sostenerme cuando más lo necesité.

Este logro también a mis padres, **Wandy Adolfo y Dominga Mosquea**, por su amor incondicional, sus sacrificios y su guía constante. Gracias por enseñarme con el ejemplo, por sus palabras firmes cuando las necesitaba y por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Esta meta también les pertenece.

Mi hermosa tía, **Wanda Angélica Estévez Hernández**, por estar siempre ahí, por su apoyo inquebrantable, su confianza en mis capacidades y por recordarme que sí podía lograrlo. Gracias por ser un pilar fundamental en este proceso.

Este logro también es para **Giomercy Fermín De La Rosa**, por tu cariño sincero, tu compañía constante y la fe que siempre has tenido en mí. Gracias por estar a mi lado en los momentos importantes, por apoyarme sin condiciones y por regalarme siempre tu energía positiva, que fue un impulso fundamental para seguir adelante en este camino

Para mi profesora de primaria **Marcimina Mendoza Pérez**, con especial gratitud por sus enseñanzas tempranas. Gracias por haber sembrado en mí el amor por el estudio y los valores que hoy me sostienen.

Los verdaderos amigos, a quienes caminaron conmigo en este proceso, compartiendo alegrías, esfuerzos y silencios.

También me lo dedico a mí mismo, **Wandy Miguel de la Cruz del Rosario**, por nunca rendirme, por mantenerme firme ante los retos, y por creer que los sueños se alcanzan con esfuerzo, paciencia y corazón.

WANDY MIGUEL DE LA CRUZ DEL ROSARIO

A **Dios** que es mi Todopoderoso: Por haberme otorgado la vida, la salud y, sobre todo, la sabiduría para llegar a esta etapa. Su guía constante en cada decisión y la fortaleza para superar los desafíos fueron esenciales. Sin su apoyo, este logro, este gran paso de mi vida no habría sido posible.

Yo dedico este trabajo con profunda gratitud a mi madre, **Josefina Altagracia Castillo**, quien fue, es y será mi pilar fundamental. Su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y su increíble ejemplo de fortaleza fueron el motor que me impulsó a seguir adelante, incluso en la adversidad. Gracias por esa fe inquebrantable en mí cuando yo dudaba, por tus palabras de aliento y por enseñarme con tu vida el verdadero significado del esfuerzo y la perseverancia.

Y ustedes mis hermanos y hermanas (**Jennifer Altagracia Castillo, Aura Miguelina Fabián Castillo, Estephane Paoly Castillo, Rigoberto Fabián Castillo, Baudilio José Hilario Castillo**) por brindarme su apoyo constante, su compañía sincera y por acompañarme en cada paso de este proceso. Su confianza fue una motivación invaluable para no detenerme. A mis amigos, que fueron un soporte esencial durante este camino, por sus consejos, comprensión y por motivarme a continuar cuando las circunstancias eran difíciles. Cada gesto de amistad fue clave para alcanzar esta meta hoy.

Mis agradecimientos a mis docentes, quienes, con paciencia, compromiso y gran sabiduría, me proporcionaron las herramientas necesarias para crecer tanto académica como personalmente. Gracias a cada uno de ellos por compartir su conocimiento, por sus enseñanzas más allá del aula y por encender en mí la pasión por el aprendizaje y la superación.

JOSÉ BAUDILIO HILARIO CASTILLO.

A Dios:

Le agradezco de corazón por la vida, salud, perseverancia que me ha dado, por guiarme en cada camino que recorrí durante esta carrea y permitirme llegar hacia la etapa final. Sin él, nada de esto sería posible, GRACIAS MI DIOS.

A mis padres:

Eddy Manuel Mendoza y Sonia Soto, gracias a Dios por darme estos ejemplos de padre a ellos les agradezco su amor infinito hacia mí, por acompañarme con su apoyo incondicional a lo largo de esta carrera, por apoyarme, sacar de su tiempo para transportarme hacia la universidad sin importar la hora. Con todo mi cariño y gratitud eterna, los amo.

A mis hermanas:

Eloyssa Mendoza Soto y Rosanyeli Mendoza Soto, gracias por su apoyo siempre, por escucharme, por siempre motivarme en cada dificultad o desmotivación que tenía. Su compañía ha sido fundamental en esta etapa, y su cariño me ha dado el impulso que necesitaba para seguir adelante y culminar esta carrera.

A mí compañero de vida:

Daniler Tavera Pérez por su amor, paciencia y consejos positivos hacia mí incluso cuando yo dudaba. Gracias por tu compañía y motivación, por entender mis cansancios, y por celebrar conmigo cada pequeño adelanto. Esta tesis también lleva su esfuerzo y su amor.

A mis compañeros de tesis, gracias por su dedicación, apoyo y por compartir conmigo este desafío.

A mis amistades que conocí a lo largo de la carrera, quienes fueron un apoyo. Compartí y aprendimos juntos de esta carrera.

GRACIAS A TODO LOS AMO. **SOLANLLY ELISA MENDOZA SOTO.**

RESUMEN

El Distrito Municipal Zambrana Abajo se encuentra a una altitud de 70 a 100 metros sobre el nivel del mar y posee una superficie de 138,01 km². La geología superficial del área está dominada principalmente por la Formación Los Ranchos, aunque también se observan afloramientos de otras unidades geológicas. En este contexto, la presente investigación se orienta a la caracterización hidrogeológica del Distrito Municipal Zambrana Abajo, con el propósito de comprender las condiciones geológicas e hidrogeológicas que controlan la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos subterráneos.

La historia geológica e hidrogeológica del área refleja la complejidad de la geología de la isla y los desafíos asociados a la explotación de aguas subterráneas y su calidad. En los últimos años, el desarrollo de la República Dominicana y el avance de la hidrogeología han estado marcados por la interacción entre factores geológicos, climáticos y estructurales, los cuales han influido en la configuración y comportamiento de los sistemas acuíferos.

Los resultados evidencian la presencia de formaciones rocosas con distintos grados de permeabilidad. Los depósitos cuaternarios y algunas zonas fracturadas presentan el mayor potencial acuífero del área. Asimismo, el agua subterránea muestra variaciones significativas en sus parámetros químicos y en su calidad, permitiendo identificar tanto acuíferos con buenas condiciones como fuentes potencialmente vulnerables a procesos de contaminación, ya sea de origen natural o antrópico.

El modelo conceptual desarrollado proporciona un marco integral para comprender el comportamiento del agua subterránea en el Distrito Municipal Zambrana Abajo, lo que permite identificar áreas con potencial para nuevas perforaciones, así como zonas que requieren acciones correctivas por su función como sitios aportadores. En conjunto, la investigación constituye una base científica y técnica para fortalecer la gestión del recurso hídrico, mejorar el acceso al agua en las comunidades rurales del distrito y promover su uso racional y sostenible.

ABSTRACT

The Municipal District of Zambrana Abajo is located at an altitude between 70 and 100 meters above sea level and covers an area of 138.01 km². The surface geology of the area is mainly dominated by the Los Ranchos Formation, although outcrops of other geological units are also observed. In this context, the present research is oriented toward the hydrogeological characterization of the Municipal District of Zambrana Abajo, with the purpose of understanding the geological and hydrogeological conditions that control the availability and quality of groundwater resources.

The geological and hydrogeological history of the area reflects the complexity of the island's geology and the challenges associated with groundwater exploitation and its quality. In recent years, the development of the Dominican Republic and advances in hydrogeology have been marked by the interaction of geological, climatic, and structural factors, which have influenced the configuration and behavior of aquifer systems.

The results show the presence of rock formations with different degrees of permeability. Quaternary deposits and some fractured zones exhibit the highest aquifer potential in the area. Likewise, groundwater shows significant variations in chemical parameters and quality, making it possible to identify both aquifers with favorable conditions and sources potentially vulnerable to contamination processes, whether of natural or anthropogenic origin.

The conceptual model developed provides an integrated framework to understand the behavior of groundwater in the Municipal District of Zambrana Abajo, allowing the identification of areas with potential for new drilling, as well as zones that require corrective actions due to their role as contributing areas. Overall, this research constitutes a scientific and technical basis to strengthen water resource management, improve access to water in rural communities of the district, and promote its rational and sustainable use.

CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

1.1 Descripción del contexto del proyecto

El Distrito Municipal Zambrana Abajo, ubicado en la provincia Sánchez Ramírez, forma parte de una zona de intensa actividad minera debido a la presencia de un yacimiento metálico de importancia mundial. La operación minera requiere grandes extensiones de terreno con características de cuenca hidrográfica para la construcción de presas de relaves, las cuales se sitúan aguas arriba de los drenajes superficiales. Esta infraestructura, junto con otras actividades asociadas a la minería, ha generado impactos directos en ríos y arroyos tributarios de la subcuenca del río Maguaca.

Históricamente, el río Maguaca constituía la principal fuente de agua superficial para las comunidades del distrito; sin embargo, su deterioro progresivo ha limitado drásticamente su uso para actividades domésticas y productivas. Ante esta disminución del recurso superficial, los habitantes —una población aproximada de 21,000 personas según el censo de la ONE (2020)— se han visto obligados a depender de fuentes alternativas, especialmente del agua subterránea, así como de camiones cisterna y ayudas externas. Esta situación ha generado la necesidad urgente de identificar recursos hídricos confiables y sostenibles para suplir el consumo humano, las actividades domésticas, agrícolas y productivas de la zona.

El área de estudio se encuentra influenciada por unidades geológicas relevantes, entre ellas la Formación Los Ranchos y sus miembros, la Formación Maimón y la Formación Hatillo. Estas formaciones presentan variaciones litológicas, estructurales y mineralógicas que condicionan directamente la circulación, el almacenamiento y la calidad del agua subterránea. La ausencia de un estudio hidrogeológico actualizado y técnico para Zambrana Abajo limita la comprensión del comportamiento del subsuelo, la identificación de los tipos de acuíferos, su potencial, conectividad y los procesos de recarga y descarga.

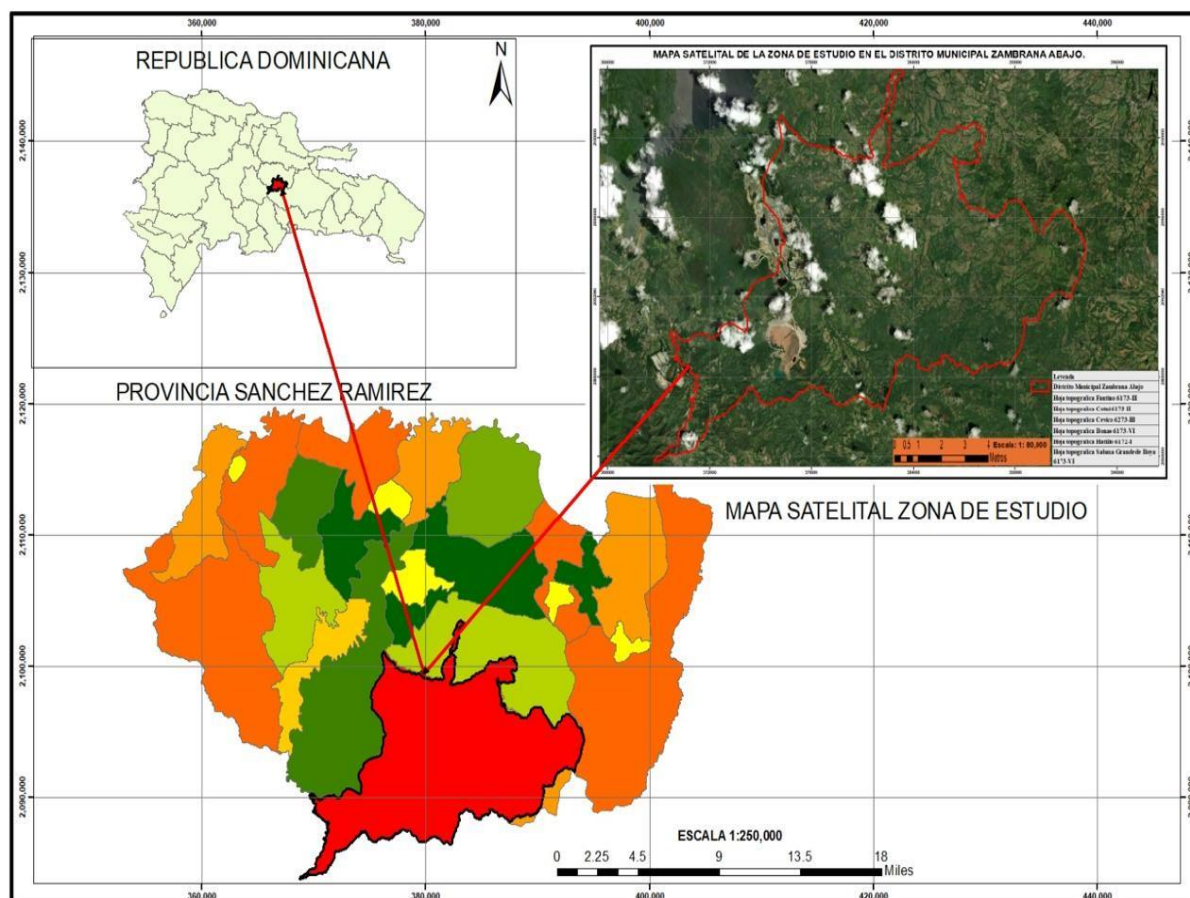


Figura 1. Mapa del Distrito Municipal Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Ante dicha situación fue necesario realizar una caracterización hidrogeológica más completa que permita conocer con exactitud la disponibilidad del agua subterránea y los niveles freáticos que la acompañan. Comprender cómo se desplaza el agua subterránea es esencial para mejorar la forma en que se gestiona este recurso. La ausencia de datos sistemáticos representa un obstáculo importante para que autoridades y comunidades puedan desarrollar estrategias de manejo realmente sostenibles.

De esta manera se presenta una investigación de proponer e integrar información litológica, estructural e hidrogeológica, junto con análisis de calidad del agua, con el propósito de ubicar con precisión los acuíferos del distrito municipal Zambrana Abajo, describir sus características y estimar su potencial. Las muestras de los resultados permitirán construir herramientas técnicas confiables que faciliten la toma de decisiones y apoyen una gestión adecuada del agua subterránea, especialmente en un momento en el que los cuerpos de agua superficial muestran una disponibilidad cada vez menor.

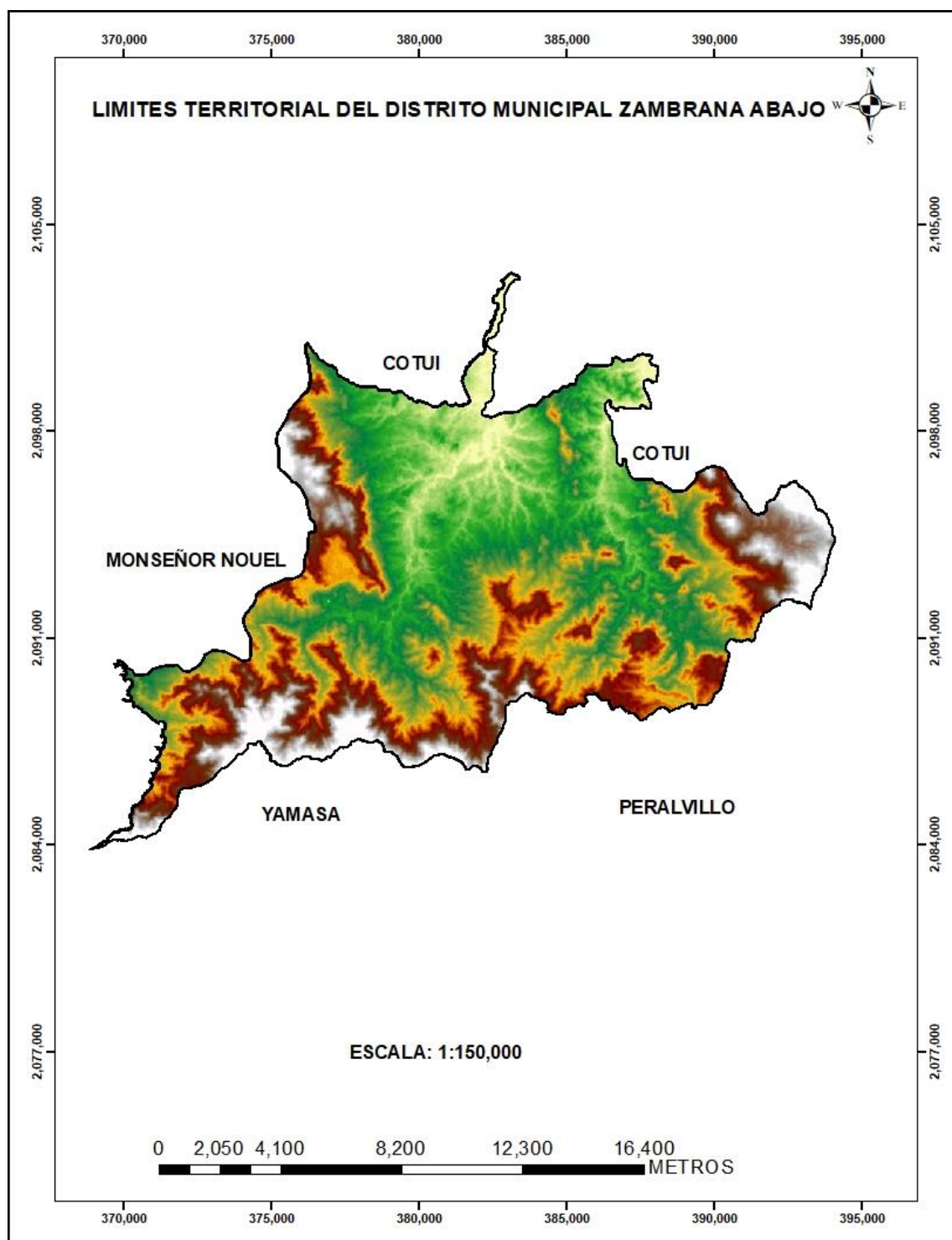


Figura 2: Límites del Municipio de Zambrana. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Ante esta problemática, el estudio se orienta a elaborar un diagnóstico técnico y científico del subsuelo y del comportamiento del agua subterránea en el Distrito Municipal Zambrana Abajo. Por lo cual los objetivos es identificar zonas con potencial hidrogeológico, evaluar la calidad del recurso y proponer estrategias de manejo que se ajusten a las condiciones del territorio. Para ello se aplicaron metodologías actuales de análisis geológico, muestreo de campo, herramientas SIG y modelación conceptual, siguiendo lineamientos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y referencias nacionales como la Memoria Explicativa de la Geología de la República Dominicana (ONESVIE, 2012).

Este proyecto forma parte del programa de Ingeniería en Geología de la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO), dentro de la Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales. Este proyecto responde al compromiso institucional de preparar profesionales capaces de comprender y atender problemáticas reales que afectan al medioambiente y a las comunidades.

1.1.1 Situación geográfica

El presente estudio se desarrolló en el Distrito Municipal Zambrana Abajo, localizado al suroeste del municipio de Cotuí, en la provincia Sánchez Ramírez, República Dominicana. Este Distrito Municipal Zambrana Abajo forma parte del sistema de subcuencas del centro-norte del país, y se encuentra dentro del contexto fisiográfico de la vertiente sur de la Cordillera Central.

Administrativamente, el Distrito Municipal Zambrana Abajo comprende cinco sectores principales: Tocoa, Las Lagunas, El Limpio, Chacuey Maldonado y Zambrana Abajo, siendo este último el centro administrativo y poblacional más importante. El área total del distrito es de aproximadamente 207.18 km², caracterizada por un relieve de topografía moderada a escarpada, con elevaciones variables y presencia de llanuras aluviales en los fondos de valle.

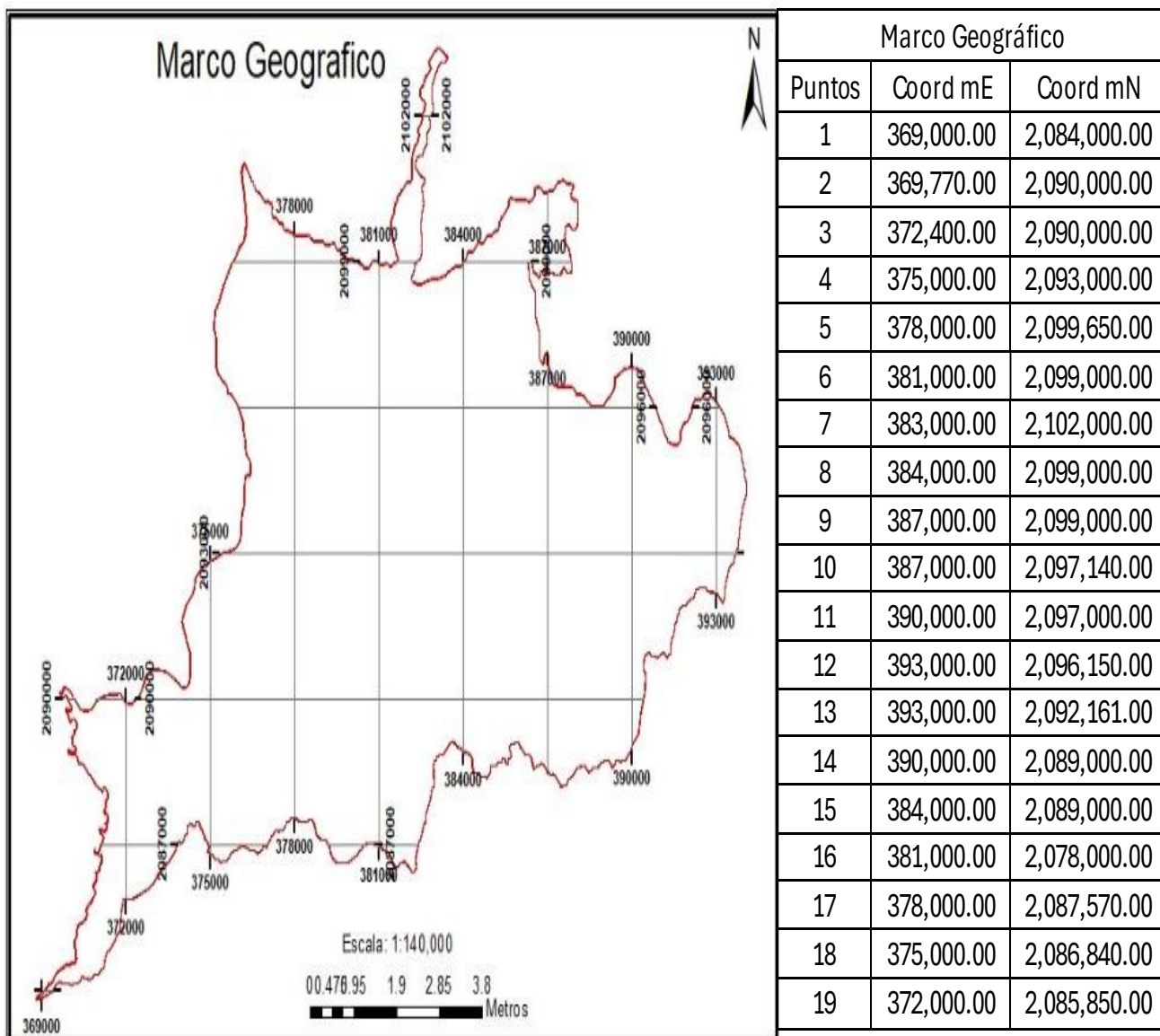


Figura 3. Marco Geográfico del Distrito Municipal Zambrana Abajo Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

El acceso al distrito se realiza a través de vías rurales que conectan con el casco urbano de Cotuí. Algunos sectores, como Las Lagunas y El Limpio, presentan accesibilidad limitada en temporada de lluvias debido a condiciones del terreno y erosión superficial.

Además, el distrito alberga una población estimada de aproximadamente 7,500 habitantes, distribuidos entre los cinco sectores mencionados. Esta población depende en gran medida del recurso hídrico subterráneo para abastecimiento doméstico, agrícola y, en menor medida, para actividades comerciales, por lo que la disponibilidad y calidad del agua representa un elemento esencial para el desarrollo sostenible de la zona.

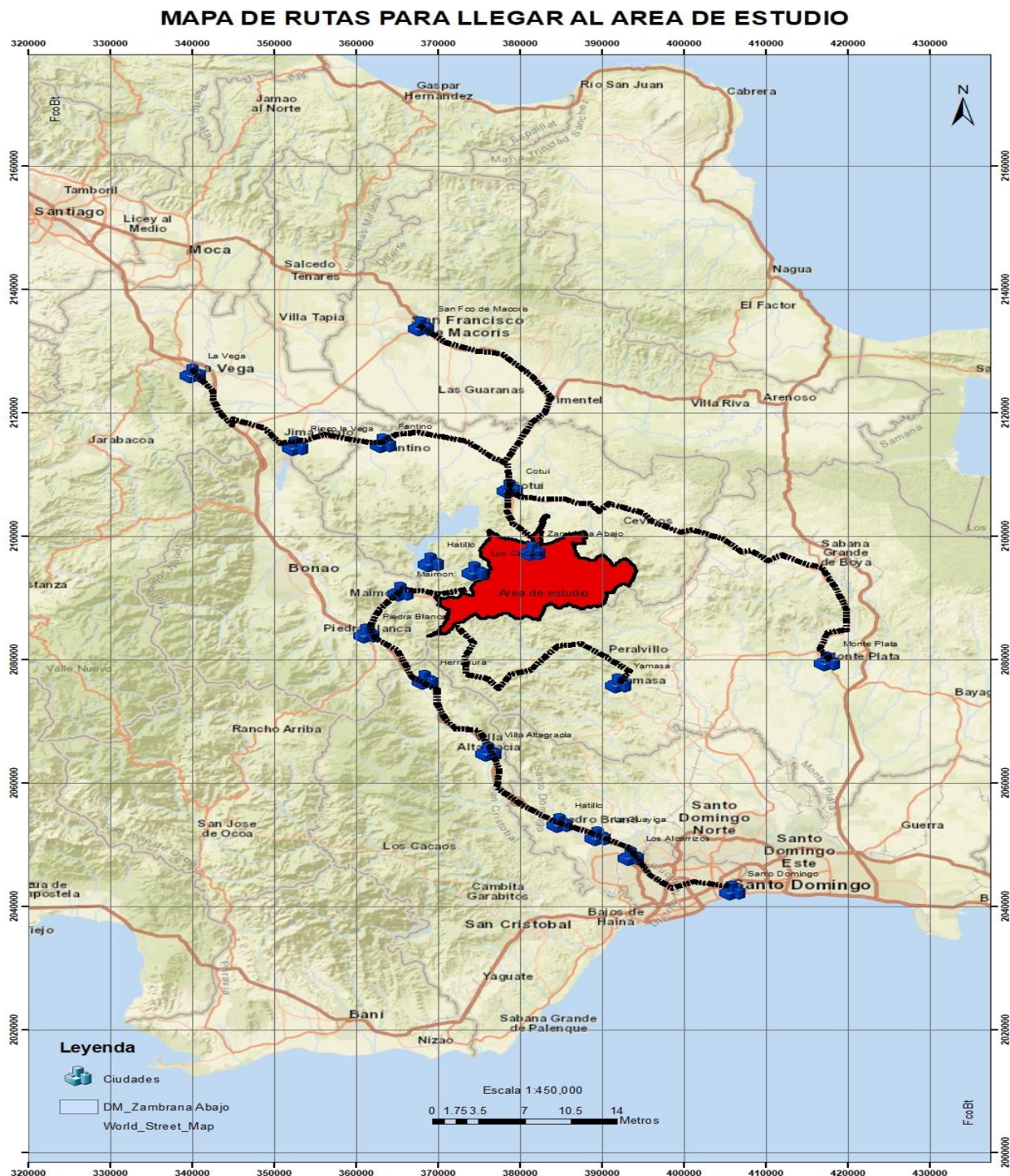


Figura 4. Mapa de ruta para llegar al área de estudio. Fuente Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025.

Por su ubicación, configuración litológica, condiciones naturales y presión demográfica creciente, el Distrito Municipal Zambrana Abajo representa una unidad territorial estratégica para el estudio hidrogeológico, ya que reúne múltiples factores que inciden en la infiltración, almacenamiento, flujo y calidad del agua subterránea.

1.1.2 Marco geológico de Zambrana

De acuerdo con la Hoja geológica 6173 II del Servicio Geológico Nacional (2010), Zambrana Abajo se encuentra dentro del Cinturón de Rocas Verdes y forma parte del Complejo Los Ranchos, una de las unidades más representativas del vulcanismo del Cretácico Inferior en la isla. Está compuesto por una secuencia de basaltos, andesitas, tobas, lutitas, y diques intrusivos que han sido intensamente alterados por procesos hidrotermales, lo cual ha contribuido a la mineralización metálica (oro, cobre, zinc) presente en la zona.

Las unidades geológicas más importantes en la región son:

Formación Los Ranchos: Secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias, muy fracturada y con presencia de zonas permeables por fallamiento tectónico.

Grupo Maimón: Compuesto por rocas volcánico-sedimentarias y metamorfitas, con cierto potencial de almacenamiento de agua en zonas de fractura.

Depósitos Cuaternarios: Coluviones y sedimentos fluviales recientes que recubren valles estrechos, con alta capacidad de infiltración local.

Las principales estructuras geológicas incluyen el sistema de fallas de orientación Noroeste-Sureste y fracturas asociadas a la actividad magmática y tectónica del Cretácico, que juegan un papel clave como conductos de flujo subterráneo o como barreras hidráulicas según su orientación y grado de cementación.

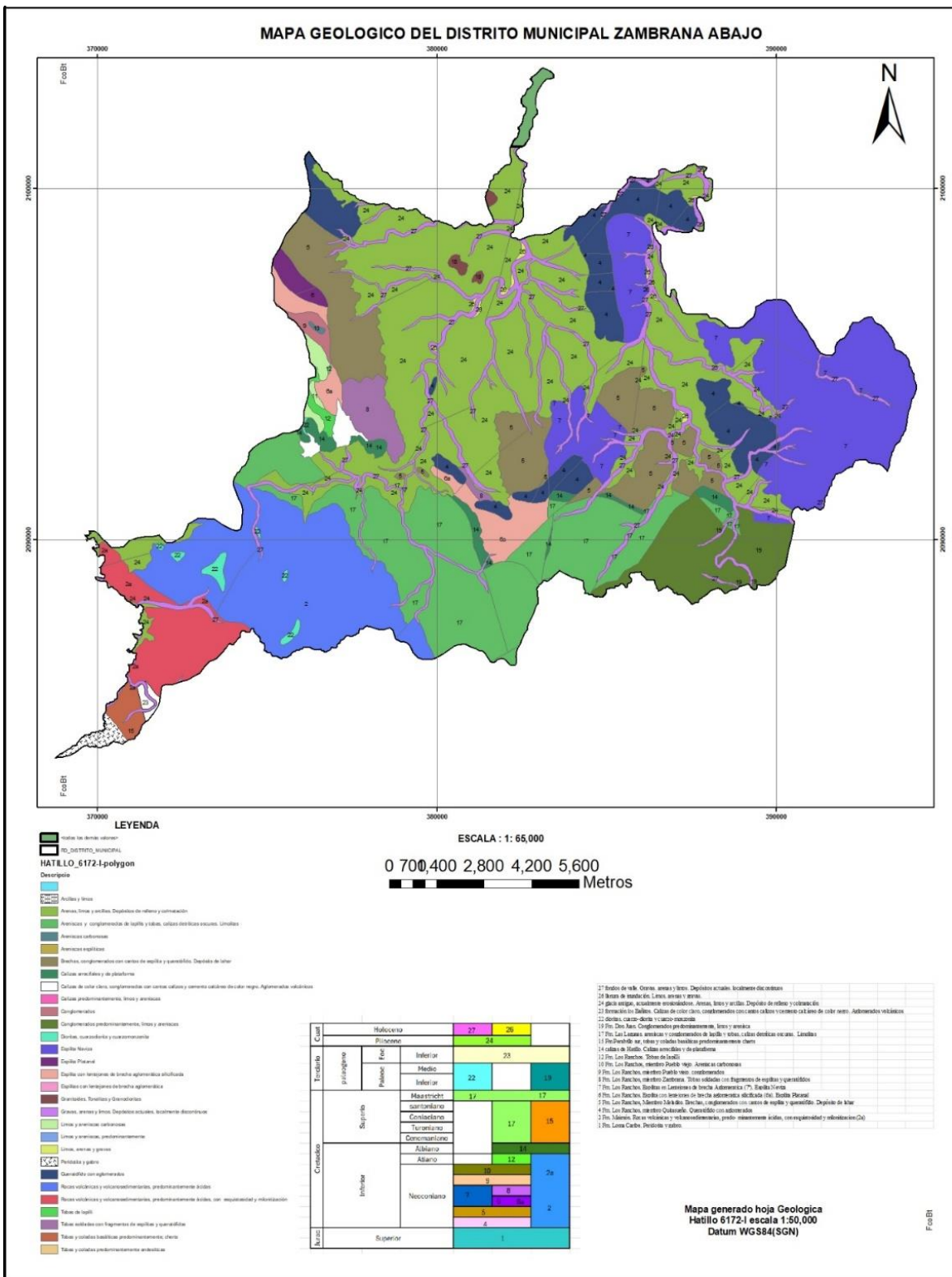


Figura 5. Mapa Geológico del Área de Estudio. Fuente: Adaptado de la Hoja Geológica 6172-I Hatillo, 1:50,000. DIGECOG, 1999. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Formaciones Geológicas Local que influyen al D.M Zambrana Abajo

La formación Hatillo, la cual presenta características y vegetación característica de bosque húmedo subtropical mezclado con áreas abiertas por cultivos o herbazales

Hatillo está sobrepuesta por la Formación Las Lagunas del Cretácico superior. La parte sur del área de proyecto está cubierta por la Formación Maimón del Cretácico inferior, la cual está cabalgando a las rocas más jóvenes de la Formación Las Lagunas y la Formación Caliza de Hatillo; es este contacto, la evidencia que da origen a la reconocida estructura regional mapeada como falla de empuje Hatillo.

En el sureste de la zona se encuentra la Formación Peralvillo sin esquistosidad con basaltos del Cretácico superior con lentes de caliza. Exposiciones de diorita aparecen como diques stock cortando las diferentes formaciones del distrito, también aflora un cuerpo más félsico de tonalitas que cubre todo el valle de Zambrana. Las formaciones de rocas que afloran en la región están caracterizadas como sigue:

Formación Maimón

La Formación Maimón del Cretáceo inferior, está compuesta de rocas metavolcánicas y metasedimentarias incluyendo metabasalto, metadacita/metariolita, rocas metavolcánicas no diferenciadas y metasedimentos (incluye caliza [transformado en mármol], formación de hierro y estratos bituminosos [transformado en pizarra]).

Las rocas de la Formación Maimón han sido correlacionadas como equivalentes de mayor profundidad marina a la Formación Los Ranchos, y han experimentado metamorfismo de bajo grado regional y de fondo marino (Kesler, Russell, Reyes, Santos, Rodríguez y Fondeur, 1991). La Formación Maimón tiene importancia económica ya que contiene al menos cuatro depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (Torró, Farré de Pablo, Proenza, Chávez, del Cario, León y Lewis, 2015). Esta formación está representada por un cinturón de rocas metamórficas, extendida 65 km en dirección noroeste a sureste, ocupando el flanco noreste de la Cordillera Central. Este bloque tectónico ocupa la parte central de la isla y hospeda la mayor actividad volcánica de la isla.

La formación Maimón se extiende paralelamente al grupo de rocas de la formación Duarte considerado del Jurásico, pero ahora en yuxtaposición, separados por la franja de peridotita emplazada en la falla que debió juntar las dos formaciones. Al noroeste, las rocas de la formación Maimón aparecen empujadas sobre la Formación Caliza Hatillo consideradas del Cenomaniano (93-99 Ma) o Albiano (99-112 Ma) y sobre las rocas de la Formación Las Lagunas del Cretácico Superior.

La Formación Caliza Hatillo discordantemente depositada sobre la Formación Los Ranchos del Neocomiano (121-144 Ma), también exhibe falla de bajo ángulo buzando hacia el suroeste. Múltiples evidencias de fallas de cabalgamiento de bajo ángulo se observan en el área de la región, relacionadas con la falla de empuje Hatillo, también evidencias de fallas subverticales y dextrales.

Los meta basaltos y meta andesitas identificados en la formación Maimón son derivadas de rocas máficas piroxeno - plagioclasa y relacionados a pórfidos de feldespatos, las metariolitas y metadacitas se derivan de pórfidos de cuarzo. Las rocas meta sedimentarias, como mármoles y pizarras, están relacionados a calizas y lutitas carbonosa. Se han identificado mineralizaciones estratiformes o Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) en la formación Maimón, incluso la mina Cerro Maimón es un depósito del tipo VMS de cobre con enriquecimiento de oro en la parte oxidada.

Formación Los Ranchos

Esta formación del Cretáceo inferior representa el basamento rocoso de la región La Española (República Dominicana y Haití forman la isla de La Española) y se formó en los inicios del desarrollo del arco insular intraoceánico. La Formación Los Ranchos aloja la mineralización epitermal de alta sulfuración de oro y plata de la zona mineral de Pueblo Viejo.

La formación Los Ranchos está dividida en seis miembros, todos son parte de una cuenca volcánica de ambiente marino con aportes félsicos de fuentes externas y aportes intermedios andesíticos de fuente interna; el miembro superior Pueblo Viejo consiste en unidades interestratificadas desde lutitas finas con alto contenido carbonáceo a horizontes volcanoclásticos y epiclásticos; debajo de este miembro le siguen como parte de este depósito los miembros interrelacionados Zambrana y Platanal, los cuales consisten en andesitas, tobas andesíticas líticas, tobas líticas con cristales de cuarzo y sedimentos calcáreos, con menores intercalaciones de unidades retrabajadas y volcanogénicos polimícticos debajo del paquete de rocas carbonosas.

Solo estos tres miembros afloran en la zona de los yacimientos de Pueblo Viejo, los miembros inferiores de la formación Los Ranchos: Quitasueño, Meladito y Naviza, son reconocidos al este y noreste de Pueblo Viejo; para estos miembros no se han reconocido mineralización. Este vulcanismo empieza en un ambiente submarino y termina en uno sub aéreo. Este metamorfismo debido al agua marina muestra que la espilita como un producto de la albitización de basaltos. La formación Los Ranchos es una de las acumulaciones volcánicas de arco isla, que forman la base de las Antillas Mayores.

Formación caliza de Hatillo

Esta formación del Cretáceo inferior, está conformado por caliza gris clara a gris oscuro con componentes fosilíferos, margas y conglomerados/brechas, y tiene un origen marino en aguas someras. La roca de la Formación Caliza de Hatillo ha sido minada y utilizada para el suministro de caliza para el circuito de neutralización de la mina de Pueblo Viejo, así como también para proveer enrocado en la construcción de presas y manejo del agua, incluyendo la presa del TSF El Llagal. La base de la Formación Caliza de Hatillo es arcillosa y se infiere que es un depósito cercano a la costa. La unidad no presenta alta deformación como la que se observa en la Formación Los Ranchos (Draper et al., 1996). Cerca de la mina de Pueblo Viejo, el contacto entre la Formación Caliza de Hatillo (sur) y la Formación Los Ranchos (norte) tiende a ir en rumbo este-oeste, y los buzamientos hacia el sur-suroeste.

El contacto se ha interpretado en algunos lugares como una discontinuidad, la cual se observa distorsionada por las fallas de cabalgamiento y/o bajo ángulo bien identificadas en las perforaciones del lado oeste de Pueblo Viejo, y en otros como una transición concordante (Kennedy, 2007)

Formación Las Lagunas

Esta formación del Cretáceo superior está compuesta por rocas volcanoclásticas de grano fino, calcoalcalinas, de aguas profundas (caliza micrítica tobácea, limolita y arenisca) con lentes de caliza interestratificados. Se interpreta que la formación yace en forma concordante sobre la Formación Caliza de Hatillo (Bowin, 1966). Se ha observado que algunas de las capas intercaladas de caliza de la Formación las Lagunas presentan cavidades por disolución en el afloramiento al sur de la mina de Pueblo Viejo. También se observa local e intermitente en la base de la formación un horizonte con menos de 20 m de espesor formado intercalación de sedimentos y caliza desde laminar hasta algunos centímetros.

Algunas de las rocas en la Formación Las Lagunas contienen venas y vetillas de calcita de gran difusión. La parte superior de la formación comprende lutitas calcáreas, filitas, areniscas y lutitas calcáreas con estratificación delgada a mediana, con capas intercaladas de caliza. Existe deformación debido a fallas de empuje y se reconoce por la deformación de las capas de desgarre de las unidades cabalgadas. Diques dioríticos instruyen esta formación provocando alteración meta somática.

Formación Peralvillo

Ubicada al sur, fuera del área del TSF Llagal. Comprende una facie superior de basaltos y tobas no foliadas con lentes de calizas, la facie norte más deformada no aflora en la zona, el cinturón de roca volcánica de la formación Peralvillo en contacto con los esquistos de la formación Maimón es rectilíneo, donde se observa un contacto de falla con buzamiento 50° y 60° al Suroeste.

Baudilio, Mendoza 2025, hoja Geológica 6172-1 (SGN)

Sistema hidrográfico del Distrito Municipal Zambrana Abajo

Desde el punto de vista hidrográfico, la región de Zambrana, ubicada en el municipio de Cotuí, se caracteriza por su pertenencia a la cuenca hidrográfica del río Yuna, con influencia considerable del lago de Hatillo y sus afluentes. Esta zona posee una dinámica fluvial roja donde los ríos y arroyos descienden en dirección noreste, contribuyendo al sistema de drenaje del valle del Cibao. La topografía, dominada por formaciones volcánicas y plutónicas, favorece un drenaje superficial bien definido y sistemas de recarga de aguas subterráneas a través de formaciones fracturadas y fisuradas. Asimismo, la región cuenta con formaciones kársticas en las calizas de Los Haitises, que constituyen importantes acuíferos tanto en cantidad como en calidad. Estas condiciones hidrográficas sustentan actividades agrícolas y agroindustriales significativas, además de definir el manejo y conservación de los recursos hídricos en el distrito municipal de Zambrana. En general, la hidrográfica de la zona presenta un equilibrio entre las aguas superficiales y subterráneas influenciadas por su contexto geológico y climático, lo que es vital para el desarrollo sostenible del territorio.

El sistema hidrográfico local está compuesto por los ríos Maguaca, La Cueva y varios arroyos y quebradas menores, cuya dinámica superficial influye significativamente en la recarga de los acuíferos. Estas Corrientes siguen patrones estructurales que obedecen a fallas tectónicas preexistentes y fracturamientos en la litología de base.

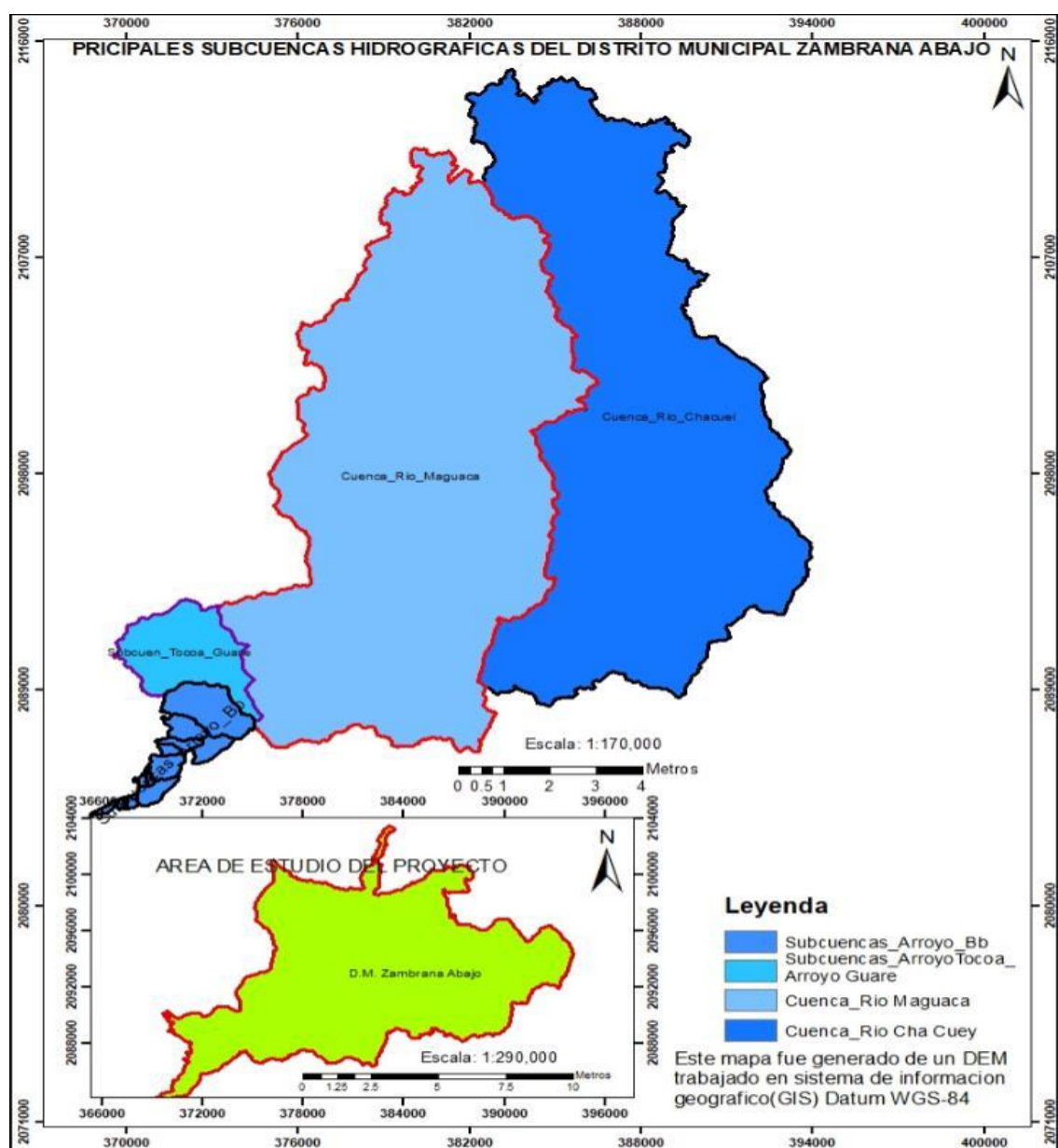


Figura 7. Mapa de Cuencas y Subcuencas Hídricas. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025.

Condiciones climáticas en Zambrana

El municipio de Zambrana, según la Hoja Geológica 6173 II del Servicio Geológico Nacional (2010), presenta un clima tropical húmedo de montaña. La precipitación anual oscila entre los 1,200 y 1,800 mm, con picos máximos entre mayo y noviembre. Las temperaturas promedio se sitúan entre 24°C y 30°C, con una humedad relativa alta durante la mayor parte del año.

Estas condiciones favorecen la recarga natural de acuíferos en áreas no compactadas ni impermeables. Sin embargo, la deforestación, la compactación de suelos por uso agrícola intensivo y la actividad minera reducen la infiltración efectiva, afectando negativamente la disponibilidad del agua subterránea.

La caracterización climática del área de estudio fue desarrollada considerando las estaciones meteorológicas pertenecientes a Pueblo Viejo (PVD), el cual cuenta con registros históricos para algunos de los parámetros de interés entre los años 2011 y 2021. El Distrito Municipal Zambrana Abajo se encuentra en una zona de características climáticas y meteorológicas homogéneas. Según el análisis del comportamiento de la humedad relativa y las precipitaciones, se distinguen dos temporadas:

Época húmeda: Entre abril y noviembre.

Época seca: Entre diciembre y marzo.

Como parte de la metodología, se utilizó información horaria de las mediciones en las estaciones meteorológicas y de calidad de aire, pertenecientes a Pueblo Viejo.

Estaciones	Coord X	Coord Y	Temp C ⁰
AMD-04	376846	2095725	24 C ⁰
AMD-LAG	376729	2091840	25 C ⁰
AWS-02	376486	2094196	24 C ⁰
AWS-03	374474	2098126	23 C ⁰
AWS-05	373108	2101271	25 C ⁰
AWS-06	375869	2089449	24 C ⁰
AWS-07	377766	2087405	23 C ⁰

Tabla 1 Listado de las estaciones, con coordenadas para la descripción de las condiciones meteorológicas

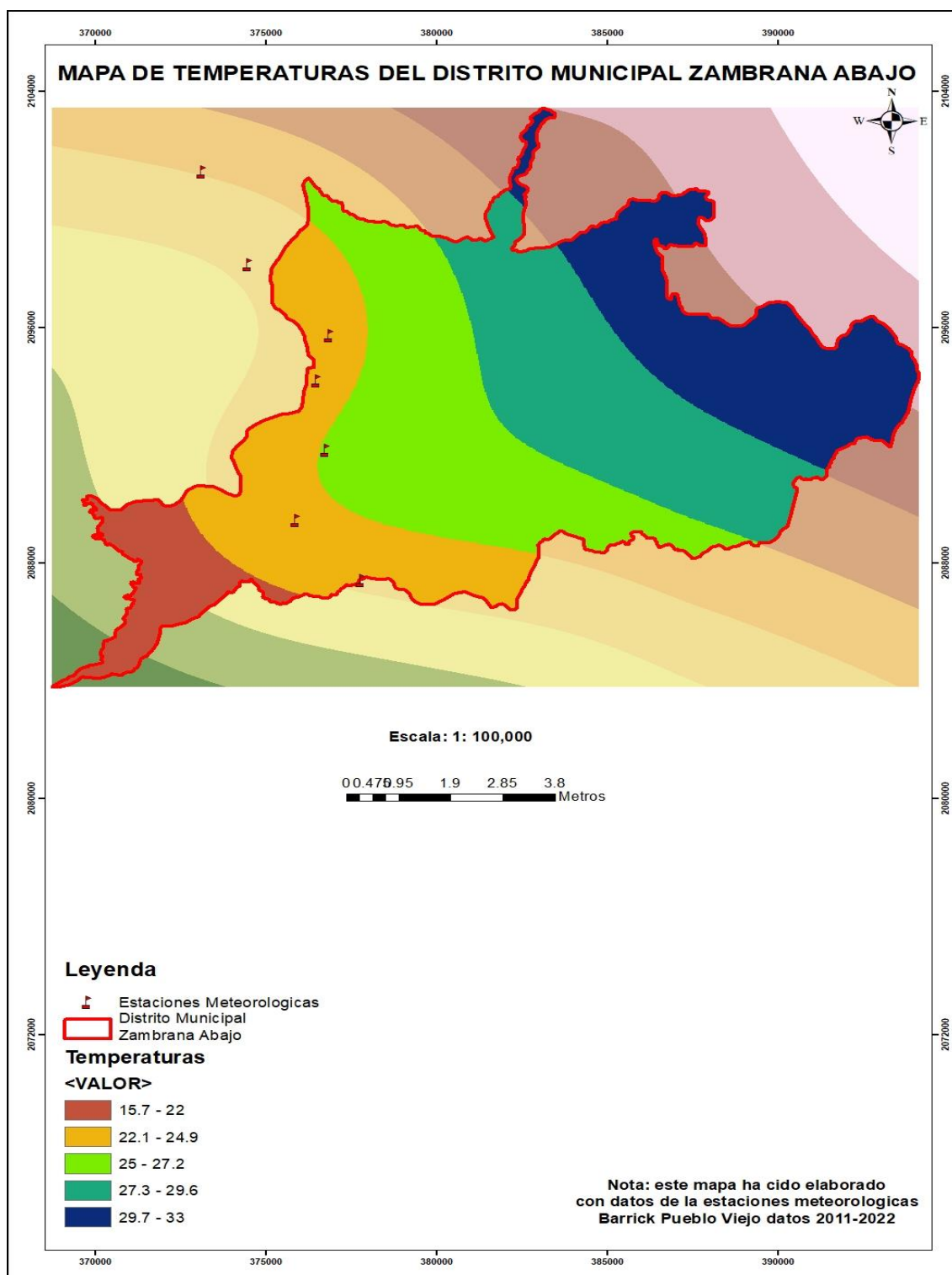


Figura 8: Mapa de temperatura en el Distrito Municipal Zambrana Abajo Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

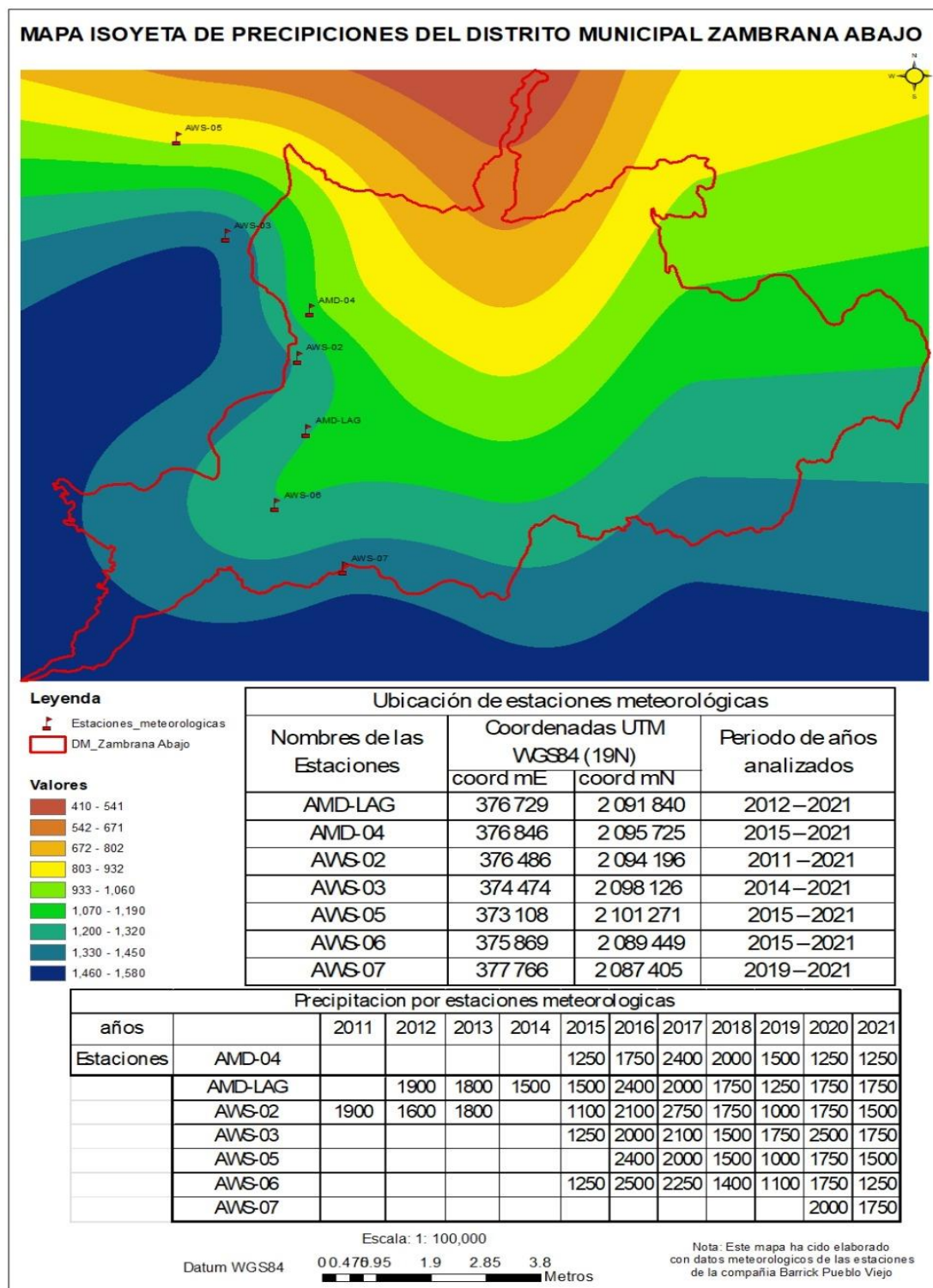


Figura 9: Mapa Isoyeta de precipitaciones. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2021 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo

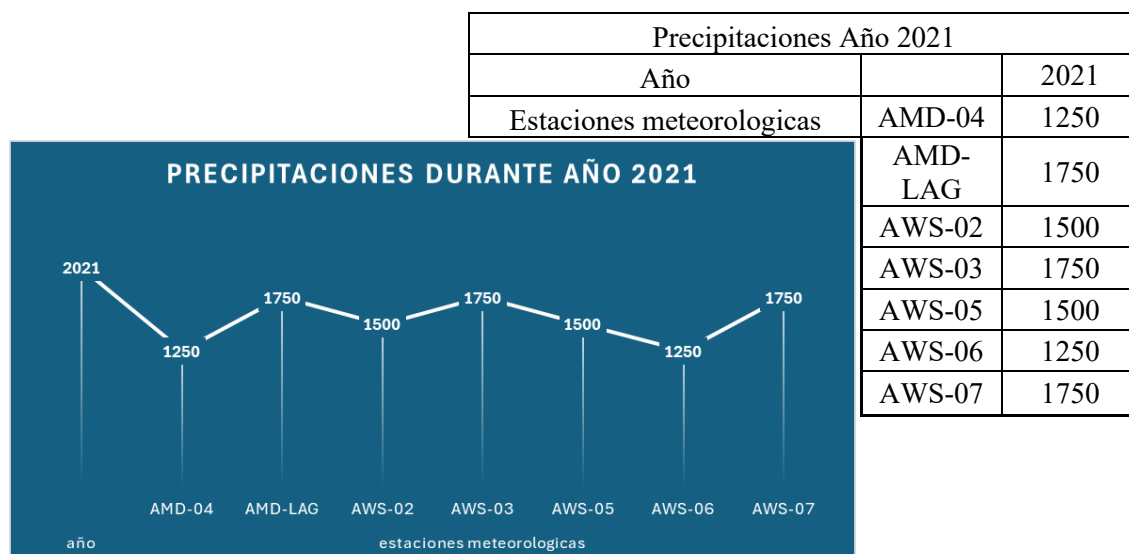


Figura 10: Gráfico de precipitaciones 2021. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2020 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo

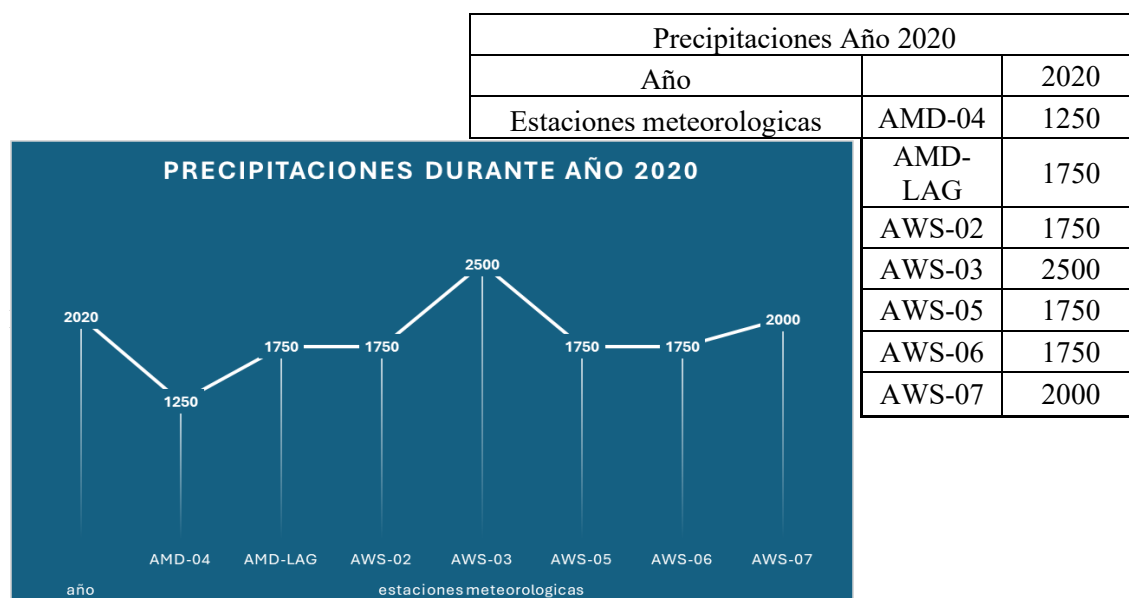


Figura 11: Gráfico de precipitaciones 2020. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2019 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo

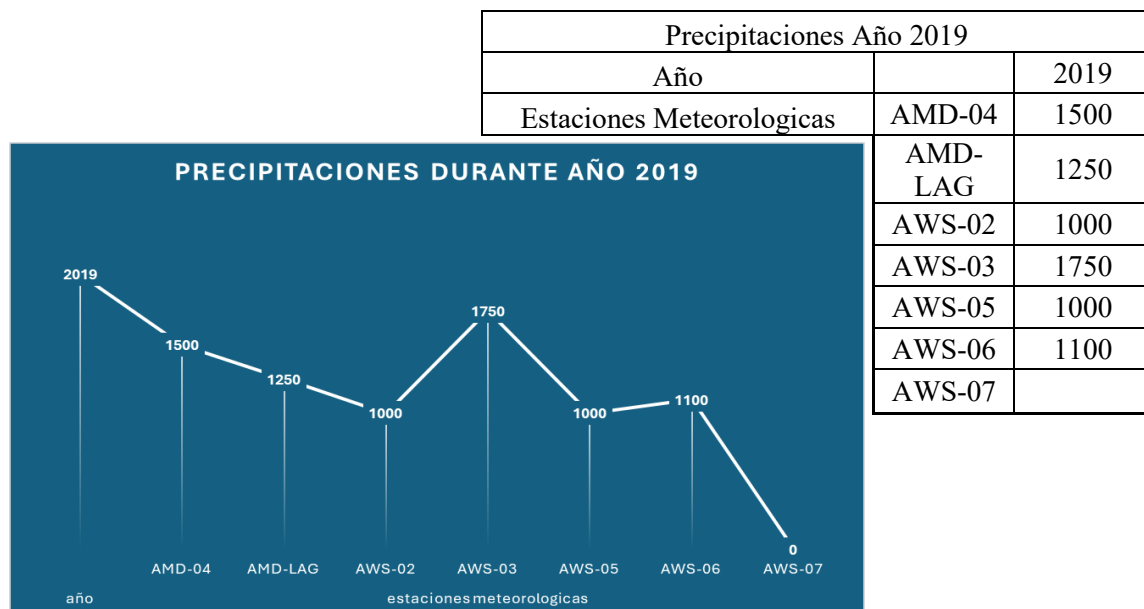


Figura 12: Gráfico de precipitaciones 2019. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2018 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo

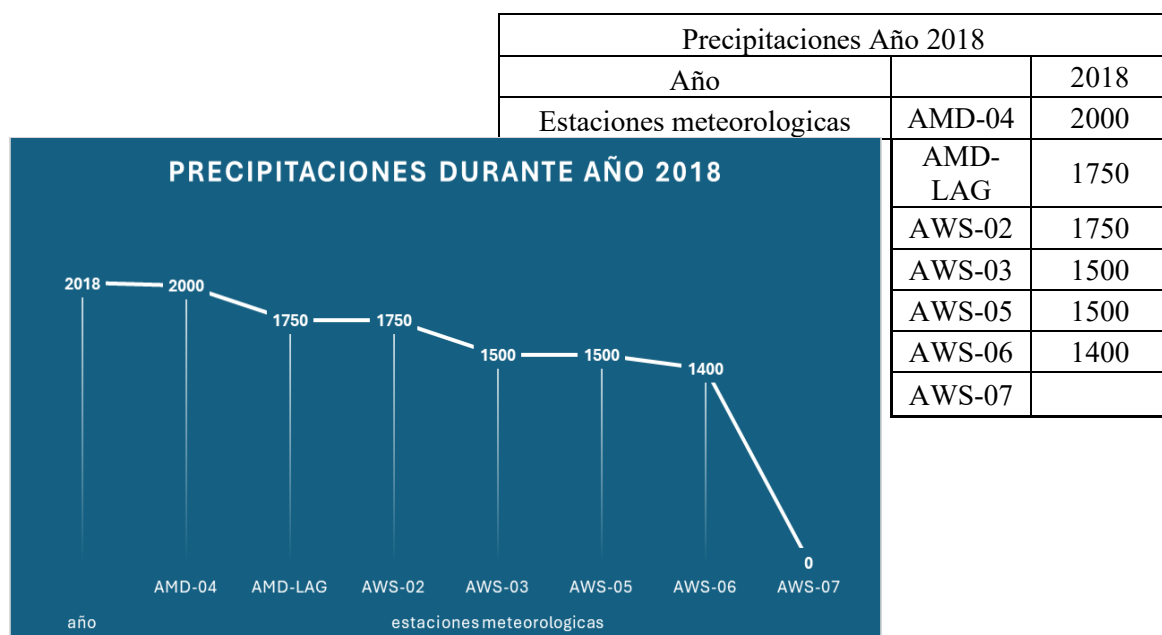


Figura 13: Gráfico de precipitaciones 2018. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2018 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo

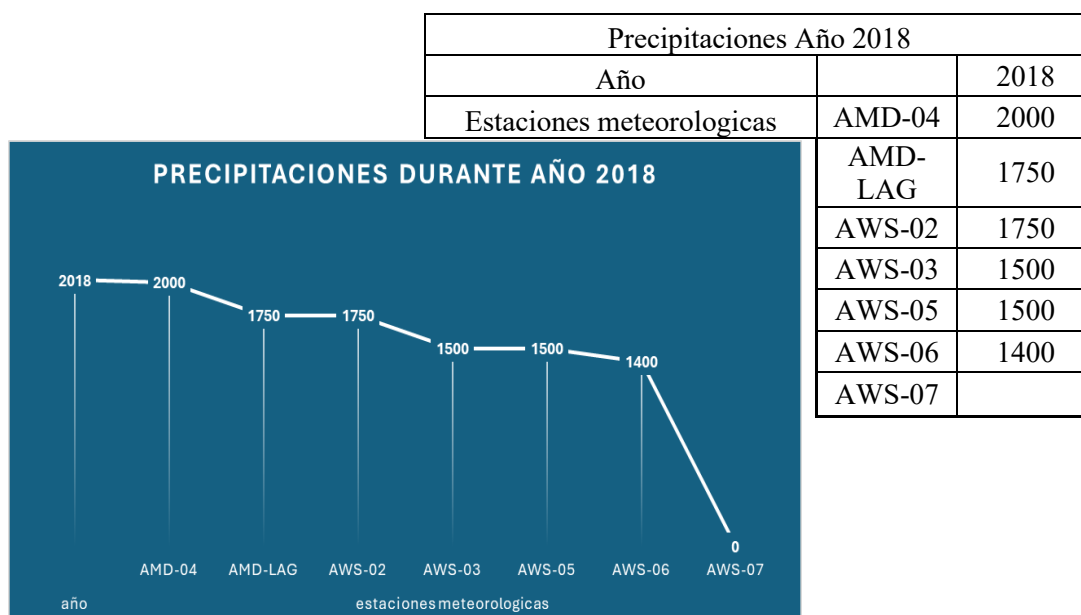


Figura14: Gráfico de precipitaciones 2018. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2017 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo

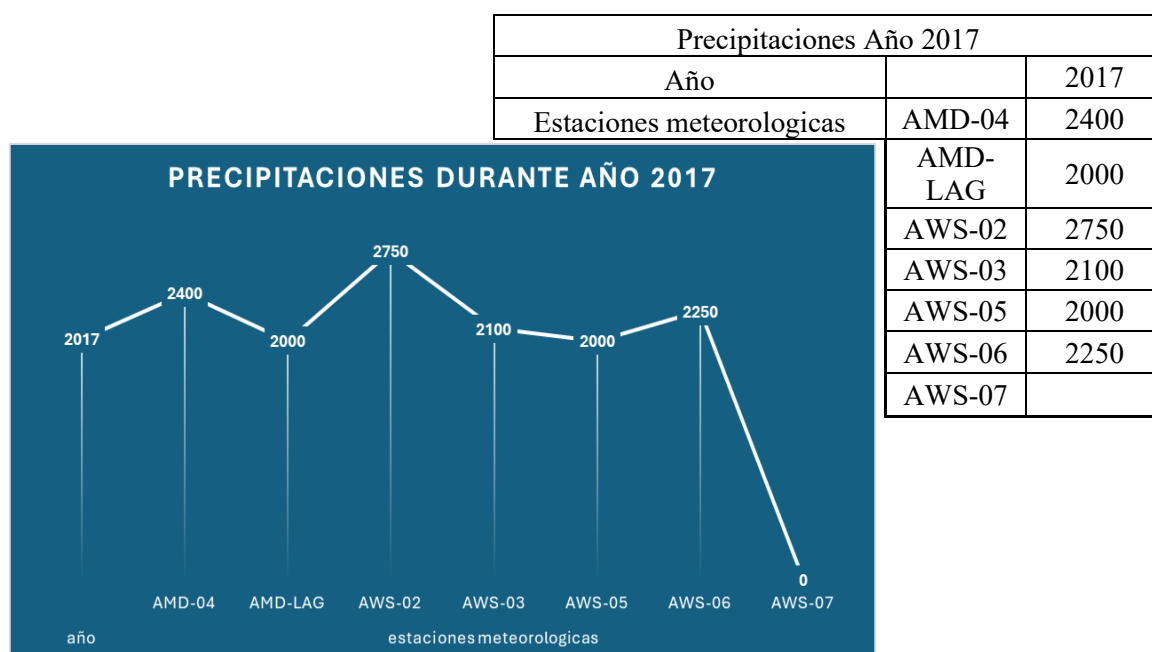


Figura15: Gráfico de precipitaciones 2017. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2016 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo.

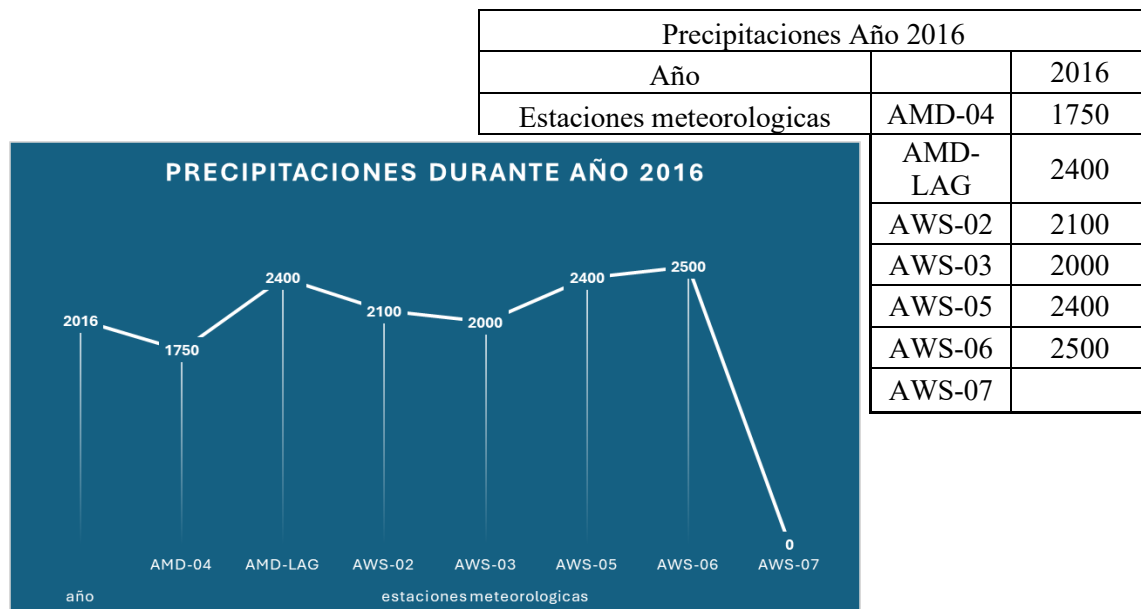


Figura 16: Gráfico de precipitaciones 2016. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2015 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo.

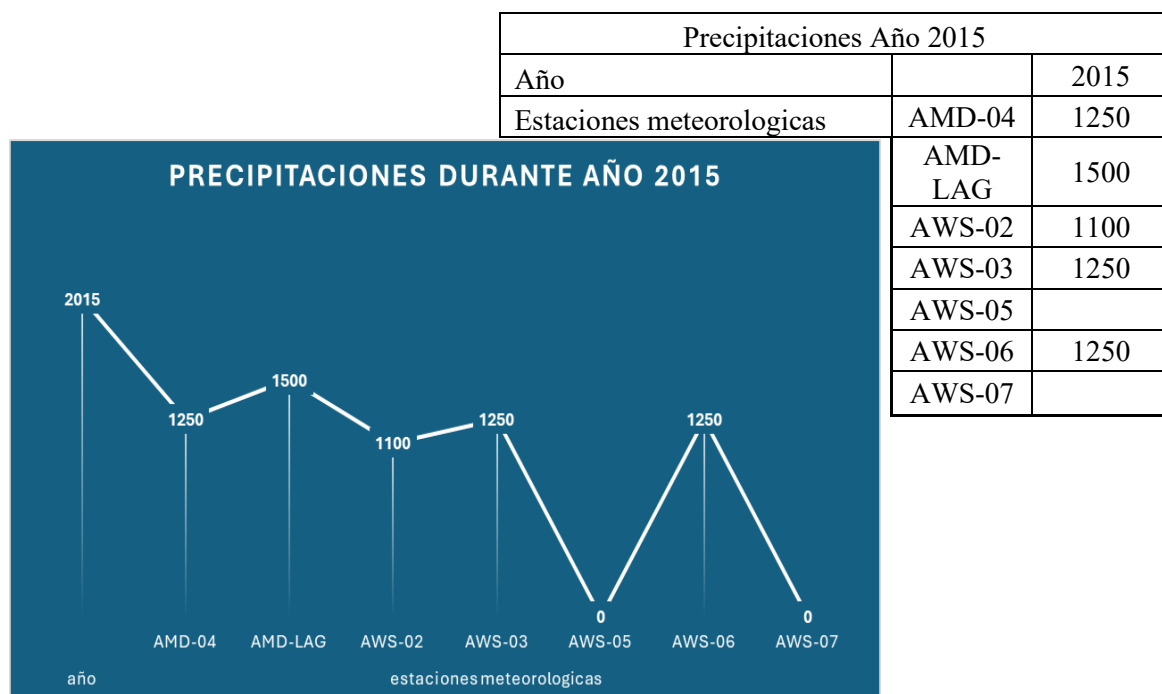


Figura 17: Gráfico de precipitaciones 2015. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2014 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo.

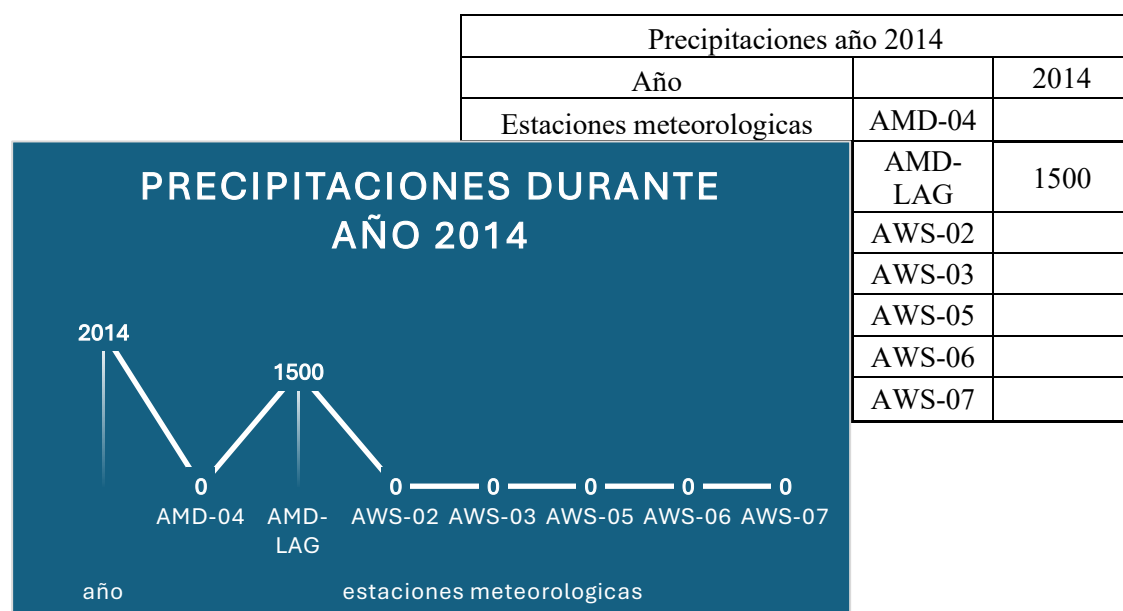


Figura 18: Gráfico de precipitaciones 2014. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2013 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo.

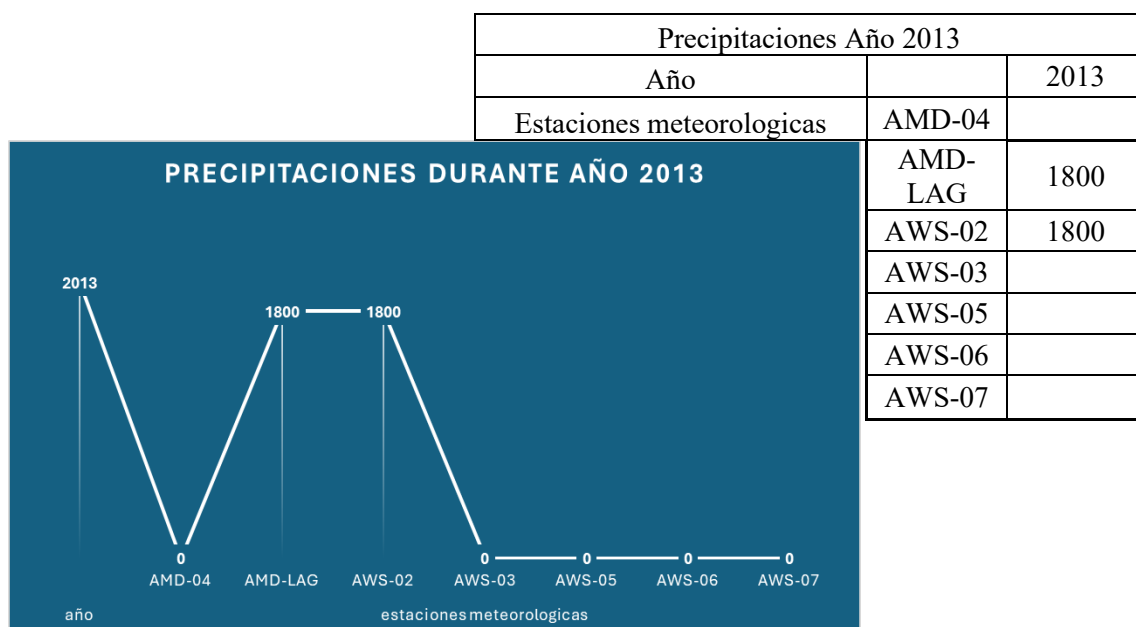


Figura 19: Gráfico de precipitaciones 2013. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2012 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo.

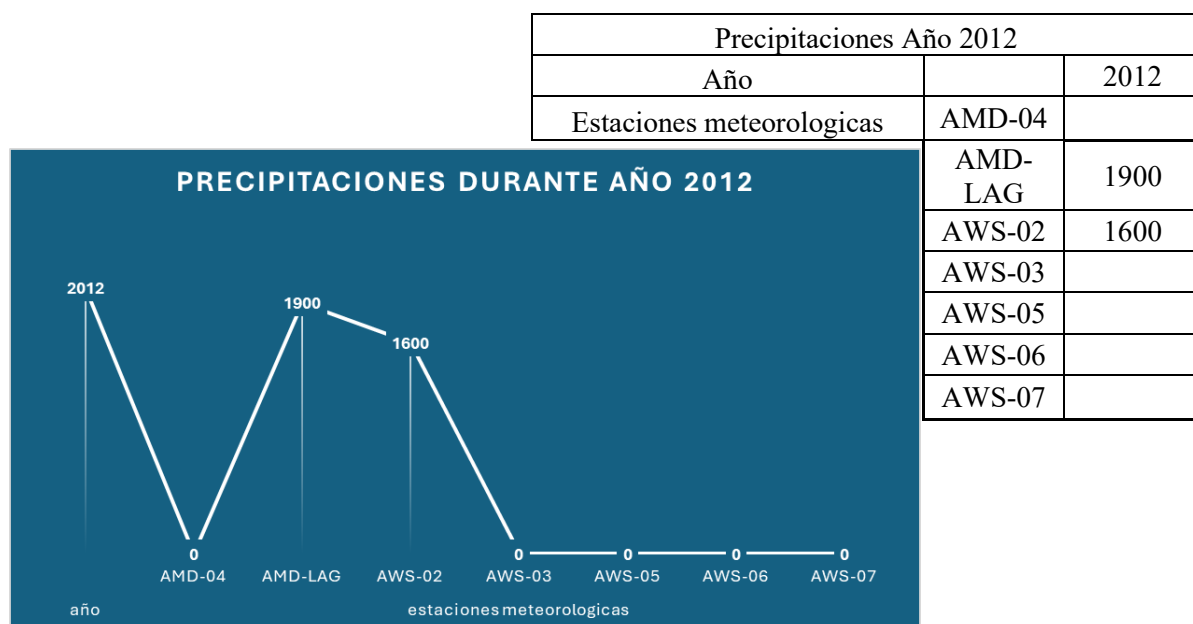


Figura 20: Gráfico de precipitaciones 2012. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones del año 2011 según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo.

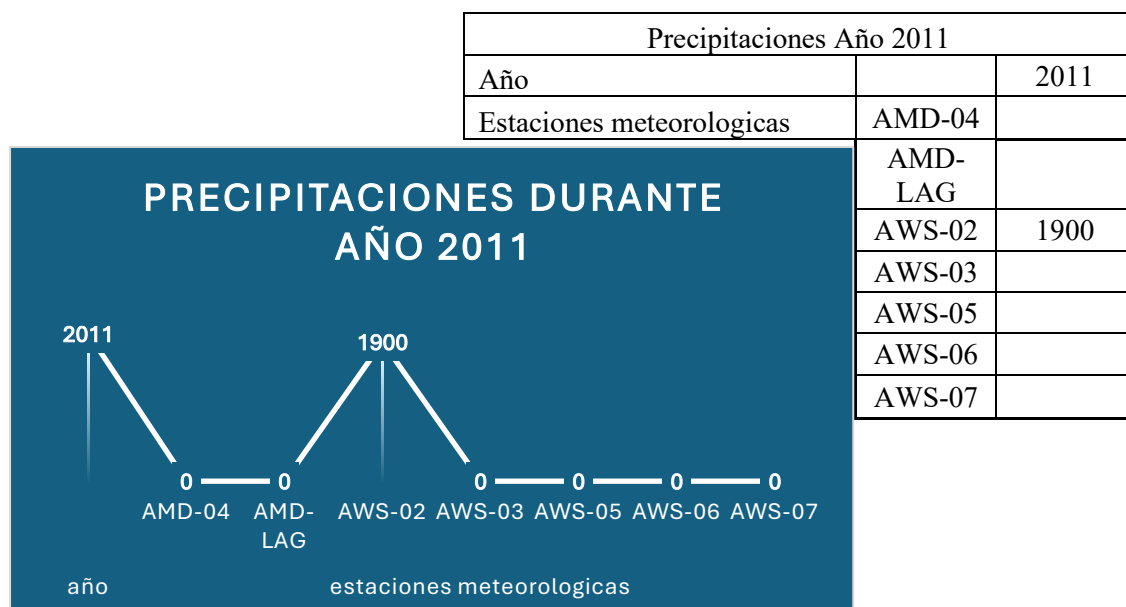


Figura 21: Gráfico de precipitaciones 2011. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Precipitaciones durante un periodo de 11 año, según datos tomado de las estaciones meteorológica instalada a los alrededores de la mina Barrick Pueblo Viejo 2011-2021

Precipitacion por estaciones meteorologicas durante los 11 años												
Años		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Estaciones	AMD-04					1250	1750	2400	2000	1500	1250	1250
	AMD-LAG		1900	1800	1500	1500	2400	2000	1750	1250	1750	1750
	AWS-02	1900	1600	1800		1100	2100	2750	1750	1000	1750	1500
	AWS-03					1250	2000	2100	1500	1750	2500	1750
	AWS-05						2400	2000	1500	1000	1750	1500
	AWS-06					1250	2500	2250	1400	1100	1750	1250
	AWS-07										2000	1750

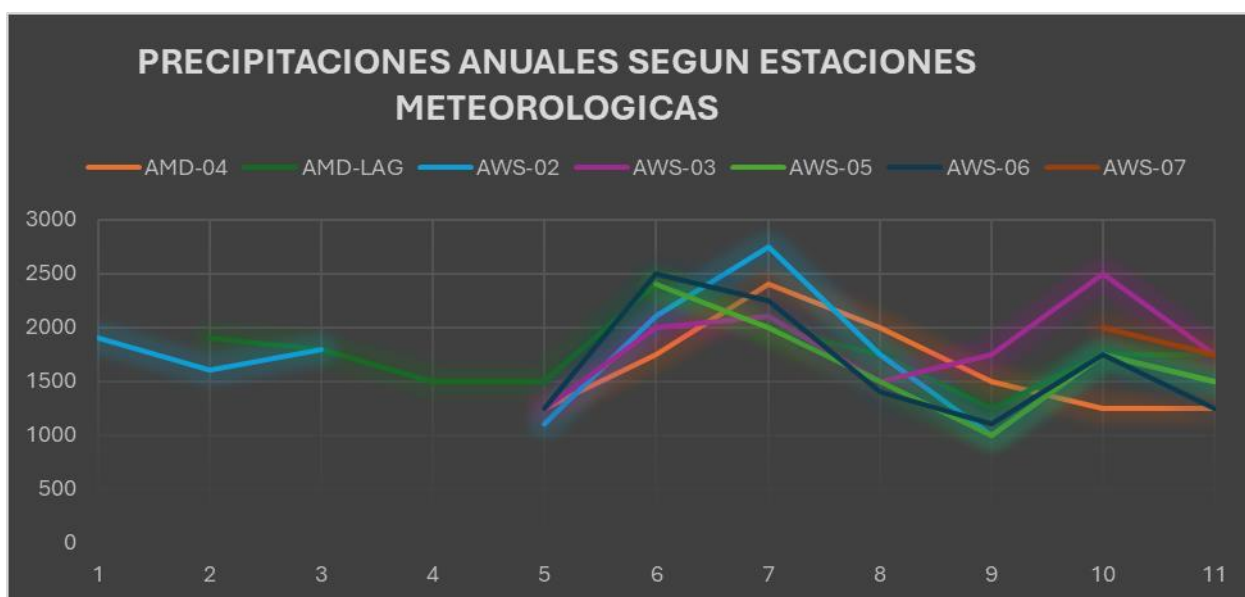


Figura 22: Gráfico de precipitaciones 2011-2021. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Uso del Agua en la Comunidad

La comunidad de Zambrana Abajo se abastece principalmente de agua superficial, captada de ríos y arroyos mediante bombas, mangueras o distribución por gravedad.

No existen redes de distribución subterránea ni pozos productivos desarrollados técnicamente, debido a los altos costos y la complejidad geológica que implica la perforación en esta zona.

La falta de estudios técnicos ha generado dependencia de fuentes vulnerables y una sobreexplotación de cuerpos superficiales sin control de calidad o cantidad.

Las poblaciones rurales, al carecer de alternativas, enfrentan episodios de escasez durante la estación seca, así como riesgos sanitarios por consumo de agua no tratada.

Este proyecto busca establecer una base técnico-científica para proponer futuras estrategias de aprovechamiento de agua subterránea mediante perforación dirigida, captación de escorrentías, protección de recargas y planificación territorial del uso del suelo.

1.1.3 Planteamiento Del Problema

El Distrito Municipal Zambrana Abajo, ubicado en la provincia Sánchez Ramírez, presenta una creciente demanda de recursos hídricos superficiales y subterráneos, impulsada por el aumento de la población, las actividades agrícolas y otros usos domésticos e industriales.

Sin embargo, esta demanda se enfrenta a la escasez de información técnica detallada sobre las condiciones hidrogeológicas del área, lo cual limita la toma de decisiones efectivas en cuanto a la explotación, protección y gestión sostenible del agua subterránea.

En la actualidad, se desconoce con precisión la distribución y comportamiento de los acuíferos locales, la litología predominante en las zonas de captación, así como la calidad fisicoquímica del recurso hídrico subterráneo. Esta falta de caracterización genera incertidumbre sobre la disponibilidad real del agua, los posibles riesgos de sobreexplotación, contaminación y disminución en la calidad del recurso, afectando directamente a la población que depende de estos sistemas acuíferos.

Además, la ausencia de estudios recientes impide establecer criterios técnicos sólidos para la planificación de pozos, la protección de zonas de recarga y el diseño de estrategias de conservación del recurso. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar una investigación que permita caracterizar adecuadamente el comportamiento hidrogeológico de Zambrana Abajo y así aportar datos fiables que sirvan de base para una gestión eficiente del agua subterránea en la zona.

1.2 Diagnóstico del Estado Actual

El distrito municipal Zambrana Abajo, ubicado en el municipio de Cotuí, provincia Sánchez Ramírez, se encuentra asentado sobre formaciones geológicas complejas que incluyen terrenos volcánicos básicos e intermedios del Cretácico Inferior, así como macizos plutónicos considerados parte del macizo tonalítico de Zambrana.

Estas formaciones presentan una alta fracturación y alteraciones hidrotermales, lo que influye directamente en la dinámica y calidad de los acuíferos de la región. La zona está geográficamente representada en la hoja topográfica 6173-II, con una orografía moderadamente montañosa que contribuye a un sistema hidrográfico activo perteneciente principalmente a la cuenca hidrográfica del río Yuna y al valle del Cibao.

Desde el punto de vista hidrogeológico, Zambrana Abajo presenta unidades con rocas volcánicas y plutónicas fisuradas que permiten la circulación y almacenamiento de aguas subterráneas, complementadas por depósitos de calizas kársticas que constituyen los acuíferos más importantes en términos cualitativos y cuantitativos. Hidrográficamente, la red fluvial y el drenaje superficial están influenciados por la topografía y geología local, con un equilibrio entre aguas superficiales y subterráneas que abastecen recursos hídricos para el consumo doméstico, la agricultura y otras actividades económicas. Actualmente, el Distrito, aunque en desarrollo demográfico y económico, enfrenta retos para la gestión sostenible de sus recursos hidrogeológicos debido a la presión humana y la posible contaminación vinculada a actividades principalmente minera y agroindustrial.

Este diagnóstico refleja la necesidad de un estudio integral que profundice en la caracterización hidrogeológica para la correcta planificación y manejo del recurso hídrico, garantizando su conservación y aprovechamiento sostenible en el distrito municipal de Zambrana Abajo.

Pregunta De Investigación

A partir del planteamiento del problema, y considerando la crisis del agua superficial en el Distrito Municipal Zambrana Abajo, así como la necesidad de identificar fuentes subterráneas sostenibles, se formulan las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cómo ha afectado la disminución y deterioro del río Maguaca la disponibilidad de agua para las comunidades del Distrito Municipal Zambrana Abajo?
2. ¿Cuáles son las formaciones geológicas presentes en el área de estudio y de qué manera influyen en la circulación y almacenamiento del agua subterránea?
3. ¿Qué tipo de acuíferos existen en Zambrana Abajo y cuáles presentan mejores condiciones para el desarrollo de pozos óptimos que puedan suplir a la población?
4. ¿Cuál es la calidad fisicoquímica del agua subterránea disponible en los principales puntos de captación utilizados por las comunidades del distrito?
5. ¿Qué factores naturales y antrópicos, incluyendo la actividad minera, influyen en la disponibilidad, calidad y sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo en la zona de estudio?

1.2.1 Objetivos del Diagnóstico

Objetivo General

Caracterizar la hidrogeología del Distrito Municipal Zambrana Abajo para identificar zonas con potencial de agua subterránea que permitan la construcción de pozos óptimos destinados al abastecimiento comunitario, considerando la disminución de las aguas superficiales y la afectación hídrica asociada a actividades mineras en la cuenca del río Maguaca.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la litología, estructura geológica, porosidad y permeabilidad de la zona de estudio para determinar las condiciones geológicas que influyen en la circulación y almacenamiento de aguas subterráneas.
- Identificar y describir los acuíferos presentes en la zona, determinando su tipo.
- Determinar la dinámica del agua subterránea en la zona, incluyendo niveles freáticos, direcciones de flujo y balance hídrico, para comprender los procesos de recarga, descarga y sostenibilidad del recurso.
- Determinar la calidad del agua subterránea mediante parámetros fisicoquímicos.
- Analizar la percepción comunitaria sobre la disponibilidad y acceso al agua, con el fin de identificar los sectores con mayor vulnerabilidad hídrica y apoyar la localización de pozos óptimos.

1.2.2 Metodología

El presente estudio se desarrolló en conformidad con el Reglamento de Tesis y Monográficos, así como con la Guía para el Proyecto de Investigación de la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO), que orientan el diseño metodológico requerido para investigaciones académicas. Según Hernández Sampieri (2014), el diseño metodológico corresponde al plan estructurado que guía la obtención y análisis de datos en función del problema de investigación. En este estudio, dicho diseño fue clave para alcanzar los objetivos planteados de manera rigurosa y técnica.

La metodología constituye el plan estructurado que permitió recolectar, procesar y analizar la información necesaria para cumplir con el objetivo general de esta investigación: analizar y caracterizar el comportamiento del agua subterránea como fuente de abastecimiento humano en los sectores del Distrito Municipal Zambrana Abajo, especialmente ante la disminución y degradación del recurso superficial del río Maguaca.

Esta metodología presenta combinaciones de procedimientos geológicos, hidrogeológicos y sociales para obtener una visión completa del territorio. por lo cual esto va a incluir la identificación de unidades litológicas, tipos de acuíferos, niveles freáticos, calidad fisicoquímica del agua y la percepción de la comunidad sobre el acceso al recurso hídrico. Esta integración permitió delimitar zonas con potencial para la perforación de pozos que respondan a las necesidades locales.

Por lo cual este apartado se explican los elementos esenciales del diseño metodológico empleado, como el enfoque, el tipo de investigación, las técnicas de recolección de datos, los instrumentos utilizados, los métodos de análisis y los criterios aplicados para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados. Esta elección de la metodología responde a la necesidad de abordar un problema ambiental complejo desde una perspectiva técnica, contextualizada y sustentada científicamente, considerando tanto los factores hidrogeológicos como la realidad social de las comunidades involucradas.

1.2.2.1 Enfoque metodológico

Este proyecto se desarrolló bajo el paradigma pragmático, el cual valora tanto los datos cuantitativos como las experiencias subjetivas para generar conocimiento. Se aplicó un enfoque mixto que combina técnicas cuantitativas y cualitativas con el fin de obtener una comprensión completa del comportamiento del agua subterránea y su relevancia para las comunidades del Distrito Municipal Zambrana Abajo.

De acuerdo con Peña et al. (2023), este tipo de enfoque permite unir la precisión de la información numérica con la profundidad interpretativa de las percepciones de los participantes, fortaleciendo la fiabilidad de los resultados.

Este enfoque cuantitativo se utilizó para medir parámetros fisicoquímicos del agua y analizar variables relacionadas con la distribución, profundidad y productividad de los pozos. Como señala Armadas (2018), el análisis objetivo de datos facilita la identificación de patrones medibles en el comportamiento hidrogeológico.

Incluyendo el enfoque cualitativo que permitió explorar de manera más cercana las experiencias y percepciones de los residentes respecto al acceso y disponibilidad del agua.

De acuerdo con Burgos (2019), este enfoque permite comprender la realidad local desde la perspectiva de los propios actores, a través de entrevistas semi-estructuradas, observación directa y cuestionarios comunitarios, los cuales fueron fundamentales para conocer la valoración social del agua, las dificultades de abastecimiento y los cambios percibidos tras la disminución del río Maguaca.

La integración de ambos enfoques —los datos técnicos del subsuelo y la experiencia vivida por la población— permitió construir un diagnóstico más completo, preciso y contextualizado de la problemática hídrica en Zambrana Abajo. Esto fortaleció la calidad de los resultados y aumentó su pertinencia para la toma de decisiones comunitarias y municipales, especialmente en la identificación de zonas con potencial para la construcción de pozos óptimos.

1.2.2.2 Diseño y tipo de estudios:

El proceso incluyó la recopilación, análisis e interpretación de información geológica, hidroquímica y geoespacial, utilizando herramientas cuantitativas para garantizar la rigurosidad y la validez de los resultados obtenidos.

Al empezar el estudio se realizó una supervisión amplia y detallada de diversas fuentes documentales. Se consultaron los artículos científicos, informes técnicos, mapas geológicos e hidrográficos, además de imágenes satelitales y registros climáticos. Con estos datos se obtuvieron de las instituciones nacionales e internacionales, entre ellas el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el Servicio Geológico Nacional (SGN), la Dirección General de Minería (DGM), el Instituto Dominicano de Meteorología (INDOMET) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Con todos estos datos del trabajo se trabajó un marco conceptual sólido, necesario para comprender la dinámica geológica de la región, los tipos de acuíferos presentes y los factores naturales que influyen en la disponibilidad de agua subterránea.

Con estos datos teórico, se planificó y ejecutó una campaña de trabajo de campo. Con los datos obtenidos por las principales unidades geológicas y geomorfológicas del área de estudio, se realizó la identificación y georreferenciación de puntos con interés hidrogeológico, la medición de niveles freáticos y la recolección de muestras de agua subterránea.

En compañía de las mediciones de profundidad del nivel del agua realizadas con cintas métricas en pozos previamente ubicados. Las muestras que fueron recolectadas para los análisis se almacenaron siguiendo los protocolos técnicos establecidos, garantizando así su calidad para los análisis efectuados posteriormente en laboratorios acreditados.

Gracias a estos estudios fueron posibles determinar parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, dureza y alcalinidad.

Los datos generados durante los estudios fueron organizados y procesados a través de sistemas de información geográfica (SIG), utilizando herramientas como QGIS y ArcGIS. Por medio a lo procesamiento fue posible la elaboración de mapas temáticos, la delimitación de unidades hidrogeológicas, la interpretación espacial de los datos y la integración de variables como litología, relieve, usos del suelo y fluctuaciones del nivel freático. Gracias a ello fue posible identificar zonas de recarga y descarga, rutas del flujo subterráneo y áreas con potencial de aprovechamiento, así como sectores vulnerables al sobreuso.

Los datos obtenidos se van a utilizar para comprender de manera más precisa la dinámica hídrica local y permitió formular propuestas orientadas a una gestión sostenible del recurso. Por esta razón se consideraron ciertas limitaciones técnicas y económicas observadas durante el proceso, como la dureza de las formaciones rocosas y los altos costos de perforación. Debido a lo anterior, la metodología empleada permitió generar un diagnóstico actualizado y confiable, útil para futuras investigaciones o proyectos relacionados con el desarrollo hídrico del área.

Junto al componente técnico, la metodología tiene un enfoque social mediante la aplicación de cuestionarios y entrevistas a residentes de distintos sectores del distrito.

Este componente permitió conocer cómo percibe la comunidad el acceso al agua, los cambios experimentados tras la disminución del caudal del río Maguaca, el funcionamiento real de los pozos y las principales dificultades que enfrentan las familias para cubrir sus necesidades domésticas de agua.

1.2.2.3 Población:

La población de esta investigación está constituida por los recursos hídricos subterráneos y las formaciones geológicas presentes en el distrito municipal Zambrana Abajo, provincia Sánchez Ramírez. Se consideran como parte de la población todos los pozos, manantiales y unidades geológicas que intervienen en el sistema hidrogeológico del área de estudio.

Muestra:

Dado que no es posible abarcar la totalidad de los elementos que conforman la población, se seleccionará una muestra representativa compuesta por:

- Pozos de uso doméstico y agrícola accesibles en la zona.
- Puntos de muestreo de agua subterránea en diferentes sectores del distrito.
- Afloramientos y unidades litológicas observables en campo.

La selección de esta muestra se realizó bajo un criterio no probabilístico intencional, eligiendo los puntos más relevantes y accesibles que permitan caracterizar las condiciones hidrogeológicas locales.

Adicionalmente, se incluyó como parte de la muestra un grupo de residentes seleccionados mediante un muestreo intencional, a quienes se aplicaron cuestionarios para recopilar información sobre la disponibilidad, acceso y percepción de la calidad del agua en sus comunidades. Esta información social complementó la caracterización hidrogeológica, permitiendo identificar sectores con mayor vulnerabilidad hídrica y validar en campo la utilidad de los pozos existentes.

Este tipo de muestreo es común en estudios de campo donde las condiciones físicas y la disponibilidad de accesos limitan la cobertura total (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

TABLA DE INVENTARIO DE POZOS DE CAPTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL DISTRITO MUNICIPAL ZAMBRANA ABAJO				
Numero	Pozos	Coord. X	Coord. Y	Comunidad
1	Morena	372072	2090867	Tocoa
2	Lidia	372070	2090826	Tocoa
3	Cordero	373786	2091179	La Piñita
4	Aníbal	374191	2091769	La Piñita
5	María	380949	2097638	El Limpio
6	Juan	378721	2095732	Jobo Claro
7	Jurungo	378838	2094628	Jurungo
8	Arroyo Vuelta	378785	2091323	Arroyo Vuelta
9	Dos Palmas	381480	2091766	Dos Palmas
10	Sabana del Rey	379237	2097136	Sabana del Rey
11	El Limpio	381149	2097874	El Limpio
12	El Limpio	381626	2097957	El Limpio

Tabla 2: Inventario de pozos de captación de aguas subterráneas en el distrito municipal Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

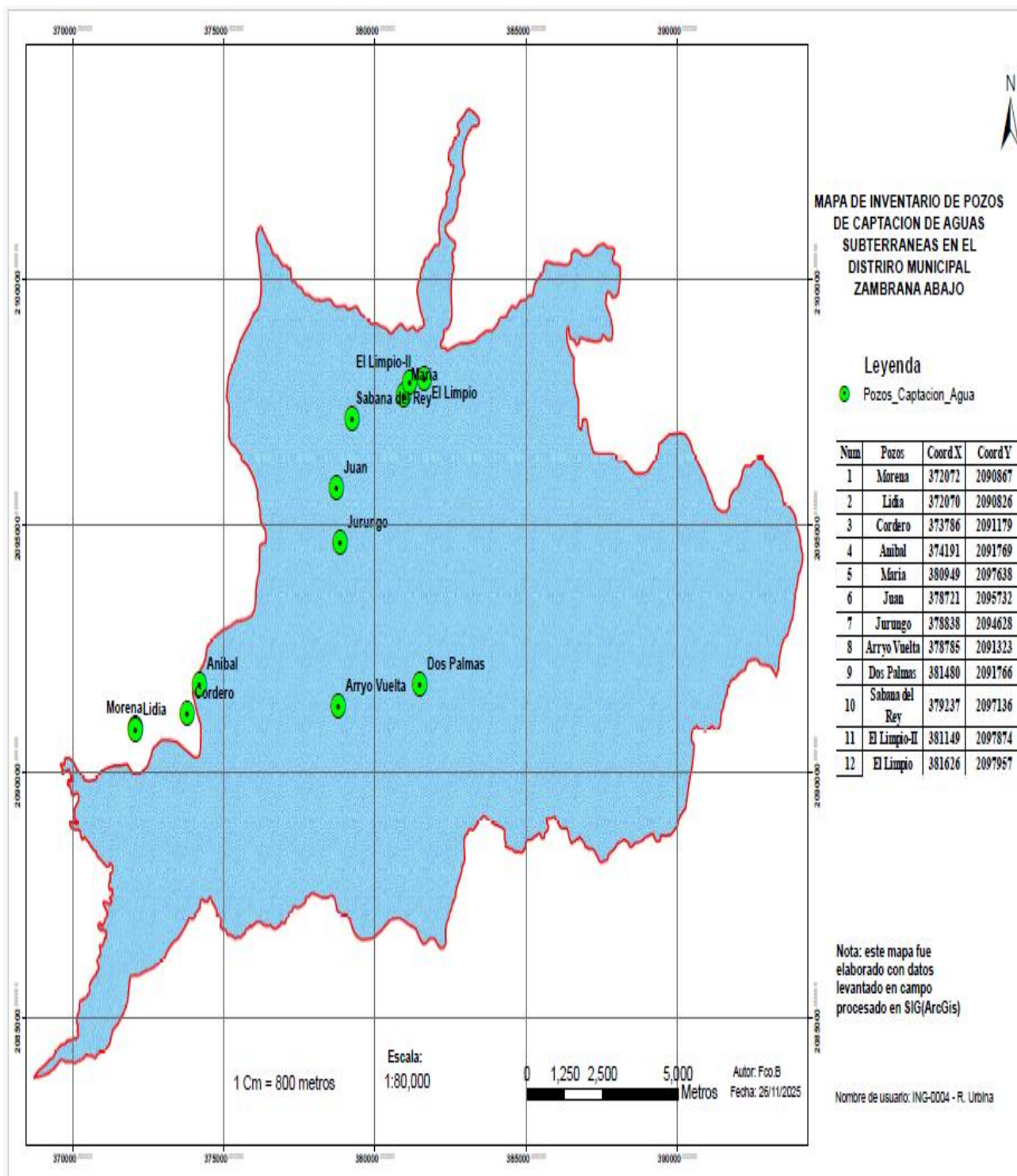


Figura 23. Mapa de inventario de pozos de captación de aguas subterráneas en el Distrito Municipal Zambrana Abajo Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025, hoja Geológica 6172-1 (SGN)

1.2.2.4 Métodos y Técnicas de recolección de datos

Se realizó:

- Revisión de mapas geológicos, hidrológicos, climáticos y topográficos de la región de Cotuí–Distrito Municipal Zambrana abajo.
- Estudio de la literatura científica, incluyendo tesis, memorias explicativas y boletines del Servicio Geológico Nacional.
- Análisis de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación (MDE).
- Preparación de rutas de campo y diseño de formularios de levantamiento de datos hidrogeológicos.

También se utilizaron herramientas de SIG para identificar patrones de drenaje, áreas de escorrentía, zonas con potencial de recarga y patrones geológicos regionales.

1.2.2.5 Instrumentos de Validez:

Durante el trabajo de campo se ejecutaron:

- Mediciones de niveles freáticos en fuentes accesibles.
- Levantamiento geológico básico y muestreo de afloramientos.
- Observación directa de estructuras geológicas (fallas, fracturas, contactos litológicos).
- Toma de muestras de agua subterránea para análisis físico-químico.
- Entrevistas a residentes sobre el uso del agua, pozos existentes, fallas técnicas y limitaciones de acceso.

Los datos recolectados fueron sistematizados, analizados y utilizados para generar un modelo conceptual hidrogeológico del área.

1.2.2.6 Variables e indicadores:

En esta investigación se identifican variables que permiten describir y analizar los aspectos geológicos e hidrogeológicos de la zona de estudio. Estas variables se asocian con indicadores específicos que facilitarán su medición y análisis durante el desarrollo del trabajo.

Objetivo Específico	Variable	Tipo de variable	Indicadores
Caracterizar la litología, estructura geológica, porosidad y permeabilidad de la zona de estudio.	Litología y estructura geológica	Cualitativa / Cuantitativa	Tipo de roca, composición, textura, origen geológico, porosidad, permeabilidad.
Identificar y describir los acuíferos presentes en la zona, determinando su tipo.	Tipo de acuífero	Cualitativa	Clasificación: libre, confinado o semiconfinado.
Determinar la dinámica del agua subterránea en la zona, incluyendo niveles freáticos, direcciones de flujo y balance hídrico.	Nivel freático y dinámica del flujo subterráneo	Cuantitativa continua	Profundidad en metros hasta el espejo de agua, dirección de flujo, gradiente hidráulico, balance hídrico.
Determinar la calidad del agua subterránea mediante parámetros fisicoquímicos.	Calidad del agua subterránea	Cuantitativa continua	pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS), dureza, cloruros, nitratos.
Analizar la recarga hídrica y su relación con la sostenibilidad del recurso.	Recarga hídrica	Cuantitativa estimada	Precipitación media anual, infiltración estimada, permeabilidad del terreno.
Evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos frente a factores de contaminación.	Vulnerabilidad del acuífero	Cualitativa / Ordinal	Grado de susceptibilidad a la contaminación: alta, media, baja.

1.2.2.7 Procedimientos:

Para el desarrollo de la investigación titulada “Caracterización Hidrogeológica del Distrito Municipal Zambrana Abajo”, se implementaron procedimientos estructurados que garantizan la rigurosidad técnica y la replicabilidad del estudio. A continuación, se detallan las etapas metodológicas:

Aprobación del título de investigación: Se obtuvo la aprobación formal del tema por parte de la Facultad de Ingeniería en Geología de la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO), lo que permitió iniciar el proyecto bajo supervisión académica.

Se llevaron a cabo recorridos exploratorios con el fin de reconocer las unidades litológicas, estructuras geológicas y manifestaciones hidrogeológicas del área. Se efectuaron observaciones, fotografías y coordenadas de los puntos relevantes.

Después, se ejecutó una revisión bibliográfica y cartográfica basada en informes técnicos, normativas y mapas geológicos e hidrogeológicos del territorio. A partir de esto se añadió la literatura académica y bases de datos digitales.

Se elaboraron fichas técnicas para el levantamiento geológico e hidrogeológico, considerando parámetros como litología, estructuras, niveles freáticos, permeabilidad y condiciones de pozos. Estos instrumentos fueron revisados por especialistas.

Así mismo, se seleccionaron puntos estratégicos de muestreo en pozos y manantiales activos según criterios de accesibilidad, representatividad y distribución espacial.

Trabajo de campo: Durante esta fase se realizó:

- Levantamientos litológicos y estructurales.
- Inventario y descripción técnica de pozos y manantiales.
- Medición de niveles piezométricos y observación de caudales.
- Recolección de muestras de agua subterránea para análisis directo en campo.
- Georreferenciación de todos los puntos mediante GPS y herramientas SIG (Google Earth y ArcGIS).

Mediciones de parámetros de agua subterránea: Como se indicó previamente, las muestras contaban con el respaldo de control y calidad de laboratorios acreditados. Pese a ello, fueron analizadas directamente en campo, lo que eliminó la necesidad de enviarlas a laboratorios externos. Para ello se utilizaron equipos portátiles, capaces de ofrecer resultados inmediatos y precisos. Entre los parámetros evaluados se encuentran:

- pH, mediante medidor multiparámetro portátil.
- Oxígeno disuelto (mg/L), mediante medidor multiparámetro portátil.
- Nivel freático (m), medida con wincha o cuerda graduada.
- Profundidad total del pozo (m), medida con wincha o cuerda graduada.

Este procedimiento garantizó la obtención de resultados precisos y aplicables a la caracterización hidrogeológica del Distrito Municipal Zambrana Abajo.

Procesamiento y análisis de datos: Los datos recolectados fueron organizados y analizados con herramientas como ArcGIS (para mapas), Excel (para estadística) y métodos hidro geoquímicos básicos (para clasificar el agua subterránea).

Triangulación de la información: La información recolectada en campo, junto con los datos bibliográficos y cartográficos, fue integrada y contrastada con el objetivo de validar hallazgos y garantizar la coherencia de los resultados obtenidos.

Redacción del informe final: Se elaboró el documento de investigación siguiendo las normas de presentación de la UTECO, integrando los apartados de introducción, marco teórico, metodología, resultados, análisis, conclusiones y recomendaciones.

1.2.2.8 Métodos y Técnicas de Análisis de Datos:

Recolección de los datos

La investigación adoptó un enfoque metodológico mixto, empleando métodos y técnicas cuantitativas y cualitativas, con el objetivo de comprender integralmente la caracterización hidrogeológica del Distrito Municipal Zambrana Abajo. El desarrollo metodológico se planea en tres fases principales:

Fase 1: Trabajo de gabinete (planificación y diseño)

Corresponde a las actividades previas al trabajo de campo, realizadas en oficina, con el propósito de planificar el estudio, analizar información secundaria y preparar los instrumentos para la recolección de datos.

Actividades realizadas:

Revisión documental: Se consultaron estudios geológicos e hidrogeológicos previos, tesis, artículos científicos y normativas nacionales relacionados con la gestión de recursos hídricos y el agua subterránea.

Análisis cartográfico y geoespacial: Se utilizaron mapas topográficos, geológicos e hidrogeológicos y herramientas como Google Earth para delimitar el área de estudio y definir puntos estratégicos de muestreo.

Consulta de bases de datos oficiales: Se accedió a información de INDRHI, INAPA y otras instituciones relacionadas con pozos, niveles freáticos y registros de explotación de acuíferos.

Diseño de instrumentos: Se elaboraron fichas técnicas de campo para registro de litología, estructuras, niveles freáticos y mediciones de agua in situ (pH, oxígeno, profundidad del pozo).

Planificación logística: Se organizaron rutas de trabajo de campo, cronograma de visitas y materiales necesarios.

Fase 2: Trabajo de campo (recolección de datos)

Durante esta fase se ejecutaron todas las actividades de recolección directa de información en los puntos estratégicos del Distrito Municipal Zambrana Abajo.

Actividades desarrolladas:

Levantamiento geológico e hidrogeológico: Se registraron litología, estructuras, fracturas y condiciones de los pozos.

Mediciones de agua subterránea: Se midieron parámetros directamente en campo con instrumentos portátiles:

- pH
- Oxígeno disuelto
- Nivel freático
- Profundidad total del pozo
- Registro de observaciones: Se documentaron condiciones físicas de los pozos, evidencia de recarga o descarga y presencia de factores de riesgo de contaminación.

TABLA DE INVENTARIO DE POZOS DE CAPTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL DISTRITO MUNICIPAL ZAMBRANA ABAJO									
Núm.	Pozos	Coord. X	Coord. Y	Comunidad	Profundidad Pozo/metros	Elev N.e (m.s.n.m.)	PH 6.5/8.5	OD (Oxígeno Disuelto) ≤ 4Mg/L	Fecha/Análisis
1	Morena	372072	2090867	Tocoa	22.56	149.64	7.13	5.95	7/8/2025
2	Lidia	372070	2090826	Tocoa	22.40	145.74	0.00	0.00	7/8/2025
3	Cordero	373786	2091179	La Piñita	22.19	161.91	6.72	5.54	7/8/2025
4	Aníbal	374191	2091769	La Piñita	60.96	151.68	6.9	4.19	7/8/2025
5	María	380949	2097638	El Limpio	30.48	88.03	6.77	4.92	7/8/2025
6	Juan	378721	2095732	Jobo Claro	25.39	111.31	7.53	7.00	7/8/2025
7	Jurungo	378838	2094628	Jurungo	30.69	134.51	0.00	0.00	7/8/2025
8	Arroyo Vuelta	378785	2091323	Arroyo Vuelta	36.\58	85.71	8.19	6.32	5/9/2025
9	Dos Palmas	381480	2091766	Dos Palmas	18.29	135.80	7.41	6.57	5/9/2025
10	Sabana del Rey	379237	2097136	Sabana del Rey	18.29	108.68	7.59	7.96	5/9/2025
11	El Limpio	381149	2097874	El Limpio	19.81	96.86	6	4.48	5/9/2025
12	El Limpio	381626	2097957	El Limpio	19.81	88.64	5.59	5.24	5/9/2025

Tabla 3 : Inventario de pozos de aguas subterráneas en el distrito municipal Zambrana Abajo, con parámetros de profundidad, Elv. N. E, PH, OD.: Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

Georreferenciación: Todos los puntos de muestreo fueron georreferenciados con GPS para su posterior análisis espacial.

Fase 3: Trabajo de gabinete (análisis y sistematización de datos)

a. Análisis cuantitativo (datos de campo):

- Se organizaron y procesaron los datos de mediciones in situ en tablas y hojas de cálculo.
- Se realizaron estadísticas descriptivas (promedios, rangos, frecuencias) de parámetros hidrogeológicos y de agua subterránea.
- Se generaron mapas temáticos de distribución de niveles freáticos, pH y oxígeno disuelto mediante SIG, identificando áreas con características similares o críticas.

b. Análisis cualitativo (observación directa):

- Se codificaron las observaciones de campo sobre litología, estructuras y condiciones de los pozos.
- Se clasificaron categorías relacionadas con vulnerabilidad de acuíferos, disponibilidad del recurso y posibles riesgos de contaminación.
- Se aplicó triangulación de información al comparar observaciones con datos bibliográficos y cartográficos, reforzando la validez de los hallazgos.

c. Análisis hidrogeológico:

- Se seleccionaron seis pozos representativos de las principales unidades hidroestratigráficas presentes en la zona (aluviales cuaternarios, abanicos pleistocenos, calizas kársticas y sustrato ultramáfico), considerando la densidad de explotación y cobertura espacial.
- Se correlacionaron los niveles freáticos y parámetros de agua medidos con las características litológicas y estructurales del subsuelo, para evaluar la interacción roca-agua.
- Se generaron modelos espaciales y mapas de interpretación hidrogeológica, apoyando la identificación de zonas críticas y la planificación de un manejo sostenible del recurso.

1.2.3 Presentación de los Resultados

En esta investigación se espera presentar los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos específicos planteados, mediante la organización de la información recolectada en campo y su análisis preliminar. La información se va a exponer mediante tablas, mapas, gráficos y descripciones técnicas que permiten visualizar las características hidrogeológicas del Distrito Municipal Zambrana Abajo.

Caracterización geológica: Se documentarán las principales unidades litológicas del Distrito Municipal Zambrana Abajo, incluyendo aluviones cuaternarios, abanicos pleistocenos, calizas kársticas y sustrato ultramáfico.

Se describirán las estructuras geológicas observadas (fracturas, diaclasas y fallas menores) y su influencia en la circulación y almacenamiento del agua subterránea.

Identificación de acuíferos: Se identificaron los acuíferos presentes en la zona (libres y confinados), se midieron niveles freáticos y se analizó la relación entre litología, tipo de acuífero y vulnerabilidad ante contaminación. También se determinaron zonas de recarga y descarga, así como la dirección del flujo subterráneo.

Dinámica del agua subterránea: Se mostrarán los niveles freáticos y la dirección de flujo inferida a partir de las mediciones de campo. Se identificarán las zonas de recarga y descarga, correlacionadas con la topografía y estructuras geológicas.

Calidad del agua subterránea: Se presentarán los parámetros medidos en la cual el pH, oxígeno disuelto, nivel freático y profundidad se interpretaron según las características geológicas del entorno, lo que permitió identificar áreas críticas para la gestión del recurso.

Síntesis analítica: La síntesis analítica permitió integrar geología, dinámica del agua y calidad del recurso en mapas y gráficos, fundamentales para proponer recomendaciones de manejo sostenible.

1.2.4 Análisis de los Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la investigación conforme a los objetivos específicos, organizando la información recopilada en campo y desarrollando su respectivo análisis preliminar.

1. Caracterización geológica:

- Identificar las principales unidades litológicas del Distrito Municipal Zambrana Abajo: aluviones cuaternarios, abanicos pleistocenos, calizas kársticas y sustrato ultramáfico.
- Registrar estructuras geológicas como fracturas y diaclasas que influyen en la circulación del agua subterránea.
- Analizar la relación entre porosidad, permeabilidad y capacidad de almacenamiento de los acuíferos.

2. Identificación de acuíferos:

- Determinar los acuíferos libres y confinados presentes en la zona, incluyendo profundidad de niveles freáticos y distribución espacial.
- Evaluar la vulnerabilidad de cada acuífero según litología y características hidrogeológicas.

3. Dinámica del agua subterránea:

- Estimar la dirección de flujo y variaciones de niveles freáticos en los pozos muestreados.
- Relacionar los niveles freáticos con la topografía y las estructuras geológicas, para identificar zonas de recarga y descarga.

4. Calidad del agua subterránea:

- Medir parámetros in situ: pH, oxígeno disuelto, nivel freático y profundidad de los pozos.
- Analizar la relación entre las características químicas del agua y las unidades litológicas, identificando posibles áreas críticas para la gestión del recurso.

Análisis esperado:

- Los resultados permiten establecer cómo las condiciones geológicas influyen la disponibilidad y calidad del agua subterránea.
- Identificar la dinámica y vulnerabilidad de los acuíferos para plantear recomendaciones de manejo sostenible.
- Elaborar mapas temáticos y gráficos que facilitarán la visualización de la información hidrogeológica y apoyarán la toma de decisiones.

1.3 Descripción del Problema Específico a solucionar con el Proyecto

La investigación se centra en caracterizar la hidrogeología del Distrito Municipal Zambrana Abajo, identificando sus unidades geológicas, los tipos de acuíferos y la calidad fisicoquímica del agua subterránea. También se consideran los factores que influyen en su recarga y en las condiciones del recurso.

El propósito es generar información técnica que sirva como base para una gestión sostenible del agua en la zona, y como apoyo para futuras investigaciones o proyectos de perforación, planificación territorial y protección ambiental.

El distrito municipal Zambrana Abajo enfrenta un problema central: la ausencia de información hidrogeológica precisa, actualizada y sistemática, necesaria para comprender las características del subsuelo y la disponibilidad real de los recursos hídricos subterráneos. Esta falta de información se manifiesta en varios aspectos críticos, entre ellos:

- Desconocimiento detallado de la litología y las estructuras geológicas que controlan la recarga y el flujo subterráneo;
- Ausencia de identificación formal de los acuíferos presentes en la zona y sus propiedades;
- Falta de datos precisos sobre los niveles freáticos, su variabilidad espacial y temporal, y la dirección del flujo subterráneo;
- Insuficiencia de evaluaciones sobre la calidad físico-química del agua;
- Carencia de información para evaluar la sostenibilidad del recurso.

Debido a esta carencia de información, las comunidades dependen del agua sin conocer la vulnerabilidad de los pozos, la capacidad de almacenamiento del subsuelo ni los posibles riesgos de contaminación. Tampoco se cuenta con herramientas técnicas que permitan tomar decisiones informadas sobre manejo, protección del recurso o planificación territorial.

Esta problemática se agrava debido a que, con la disminución y deterioro del río Maguaca —históricamente la principal fuente de agua superficial para las comunidades de Zambrana Abajo— la población ha tenido que depender casi exclusivamente del agua subterránea, sin contar con estudios que orienten su aprovechamiento adecuado. Las familias reportan dificultades para acceder al agua, pozos con bajo rendimiento, variabilidad en la calidad y una creciente dependencia de camiones cisterna o ayudas externas. La ausencia de información técnica, sumada a la percepción comunitaria de escasez y a los cambios en la disponibilidad del recurso, evidencia la urgencia de desarrollar una caracterización hidrogeológica integral que permita identificar zonas con potencial para pozos óptimos y garantizar un suministro confiable y sostenible para la población.

En consecuencia, el problema específico que aborda este proyecto es la falta de una caracterización hidrogeológica integral que permita conocer las condiciones del subsuelo y la calidad del agua subterránea en Zambrana Abajo, para garantizar una gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico.

1.4 Análisis del Problema

La dinámica hidrogeológica es compleja en el Distrito Municipal de Zambrana Abajo, que está mediado por la diversidad de rocas, las estructuras tectónicas y las actividades humanas como la minería.

La población de este distrito depende en gran medida de las fuentes de agua tanto superficial como subterránea; sin embargo, la falta de estudios detallados sobre las estructuras hidrogeológicas locales socava la certeza de la disponibilidad de agua, la calidad y la idea de sostenibilidad. La deficiencia de datos litológicos precisos, los acuíferos en su lugar, la dinámica de los niveles freáticos y las características físico-químicas del agua descarrilan la planificación de la estrategia de gestión del agua.

Esto se traduce en riesgos de sobreexplotación, contaminación y pérdida de acceso a un recurso vital para las comunidades locales. A nivel ambiental, la presión sobre el recurso hídrico también amenaza los ecosistemas asociados a los flujos superficiales y subterráneos.

En este contexto, surge la necesidad de una caracterización hidrogeológica que integre la descripción geológica, la identificación de acuíferos, el análisis de la dinámica hídrica y la determinación de la calidad del agua. Solo a través de este diagnóstico integral será posible orientar decisiones técnicas y de gestión que garanticen un aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en Zambrana Abajo.

Asimismo, la reducción del caudal y el deterioro del río Maguaca —históricamente la principal fuente de agua superficial para las comunidades del distrito— ha intensificado la dependencia hacia los pozos y otras fuentes subterráneas, generando preocupación entre los habitantes por la disminución del acceso al agua. En comunidades como Arroyo Vuelta, actualmente solo existen dos pozos funcionales, mientras que años atrás la población se abastecía sin dificultades del río.

De igual manera, en sectores como Las Dos Palmas, anteriormente se utilizaba un tinaco elevado que distribuía agua por gravedad a todas las viviendas, sistema que quedó en desuso debido al deterioro progresivo de las fuentes superficiales. Estos testimonios comunitarios evidencian el colapso del abastecimiento superficial y refuerzan la necesidad urgente de identificar zonas con potencial para pozos óptimos que contribuyan a una distribución más equitativa y sostenible del recurso.

El conocimiento detallado de las características hidrogeológicas de una región constituye la base para una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos subterráneos, especialmente en comunidades que dependen de ellos como fuente primaria de abastecimiento. El Distrito Municipal Zambrana Abajo, en la provincia Sánchez Ramírez, presenta una dinámica geológica y tectónica compleja que condiciona directamente la disponibilidad, el almacenamiento y la calidad de sus aguas subterráneas.

A pesar de la relevancia estratégica del recurso hídrico, el crecimiento poblacional, agrícola y minero ha intensificado la presión sobre los acuíferos locales, sin que existan estudios recientes y sistemáticos que describan con precisión la litología, los tipos de acuíferos presentes, las condiciones de recarga y descarga, ni la calidad del agua disponible. Esta carencia de información limita la capacidad de las autoridades y de la comunidad para planificar el aprovechamiento del recurso, controlar la contaminación, reducir la vulnerabilidad de los sistemas acuíferos y prevenir riesgos de sobreexplotación.

1.5 Análisis de objetivos

El análisis de objetivos transforma los problemas identificados en el diagnóstico hidrogeológico en un conjunto de soluciones que orientan la investigación.

Este ejercicio permite establecer una ruta de acción clara que vincula las causas del problema con las estrategias para mitigarlas, garantizando así la coherencia del estudio.

El objetivo general se plantea como la alternativa principal al problema: caracterizar la hidrogeología del Distrito Municipal Zambrana Abajo para comprender la disponibilidad, dinámica y calidad del recurso hídrico, y de este modo aportar bases técnicas para su aprovechamiento sostenible.

A partir de este, los objetivos específicos responden a las causas identificadas:

- Caracterización litológica y estructural: responde a la falta de información geológica detallada, proponiendo la descripción de litologías, estructuras y propiedades hidrogeológicas de los materiales.
- Identificación y clasificación de acuíferos: se deriva de la necesidad de diferenciar los reservorios de agua subterránea, su capacidad de almacenamiento y relevancia para el abastecimiento.
- Determinación de la dinámica hídrica: surge de la incertidumbre sobre los niveles freáticos y los procesos de recarga y descarga, proponiendo acciones de medición y modelación.

- Evaluación de la calidad del agua: responde a la amenaza de contaminación asociada a la minería y otras actividades humanas, proponiendo el análisis de parámetros fisicoquímicos y la valoración de riesgos para la salud.
- Análisis de la percepción comunitaria sobre la disponibilidad y acceso al agua: este objetivo surge de la necesidad de comprender cómo los cambios en el recurso hídrico —incluida la disminución del agua superficial— afectan directamente a la población, permitiendo identificar los sectores con mayor vulnerabilidad hídrica y apoyar la localización estratégica de pozos óptimos.

En conjunto, el análisis de objetivos permite pasar de una situación de desconocimiento y riesgo hacia un escenario de información confiable, gestión planificada y reducción de amenazas sobre el recurso hídrico.

1.6 Justificación

El conocimiento detallado de las características hidrogeológicas de una región constituye la base para una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos subterráneos, especialmente en comunidades que dependen de ellos como fuente primaria de abastecimiento. El Distrito Municipal Zambrana Abajo, en la provincia Sánchez Ramírez, presenta una dinámica geológica y tectónica compleja que condiciona directamente la disponibilidad, el almacenamiento y la calidad de sus aguas subterráneas.

A pesar de la relevancia estratégica del recurso hídrico, el crecimiento poblacional, agrícola y minero ha intensificado la presión sobre los acuíferos locales, sin que existan estudios recientes y sistemáticos que describan con precisión la litología, los tipos de acuíferos presentes, las condiciones de recarga y descarga, ni la calidad del agua disponible. Esta carencia de información limita la capacidad de las autoridades y de la comunidad para planificar el aprovechamiento del recurso, controlar la contaminación, reducir la vulnerabilidad de los sistemas acuíferos y prevenir riesgos de sobreexplotación.

La investigación se justifica porque responde a interrogantes fundamentales relacionadas con:

- La identificación de las formaciones geológicas y su influencia en la circulación subterránea.
- La determinación de los acuíferos y sus características hidráulicas.
- La evaluación de la calidad fisicoquímica del agua
- El análisis de los factores naturales y antrópicos que inciden en la sostenibilidad del recurso.

En este sentido, la caracterización hidrogeológica del Distrito Municipal Zambrana Abajo no solo representa un aporte académico al conocimiento científico de la hidrogeología local, sino también una herramienta técnica indispensable para:

- Orientar la perforación y manejo de pozos.
- Proteger las zonas de recarga.
- Diseñar planes de ordenamiento territorial.

- Garantizar el acceso a agua segura para la población.

De esta manera, el estudio ofrece soluciones prácticas al problema de falta de información hidrogeológica, proporcionando una base científica que respalde la gestión sostenible y la protección de un recurso vital como el agua subterránea.

Además, la disminución progresiva del río Maguaca —que durante décadas constituyó la principal fuente de agua superficial para la población— ha generado una creciente dependencia del agua subterránea. Sin embargo, la población enfrenta dificultades relacionadas con la disponibilidad, accesibilidad y calidad del recurso. La incorporación del análisis de la percepción comunitaria permite comprender estas dificultades desde la experiencia directa de los habitantes, identificando sectores con mayor vulnerabilidad hídrica y respaldando la necesidad de localizar pozos óptimos que garanticen un suministro seguro y sostenible para la comunidad. Por ello, el estudio se justifica también desde la dimensión social, al integrar evidencia técnica y comunitaria para orientar soluciones reales y aplicables.

1.7 Análisis de Involucrados

Para poder entender las dinámicas sociales, institucionales y comunitarias que giran en torno a la gestión del recurso hídrico, se realizó un análisis de involucrados. Esto permitió identificar a los actores clave con interés directo, responsabilidad o que son afectados por los resultados de esta caracterización hidrogeológica en Zambrana Abajo.

La Comunidad Local: Este es el actor principal, ya que son quienes dependen diariamente de estas aguas subterráneas para su consumo doméstico, agricultura y actividades productivas. Su interés central es la disponibilidad y la calidad constante del recurso, convirtiéndolos en los beneficiarios directos de este estudio.

Autoridades y Planificación: En un segundo nivel, se encontró a las autoridades municipales y distritales. Su responsabilidad es promover políticas de manejo sostenible y asegurar el agua potable. Ellos se benefician de esta investigación porque les proporciona la información técnica necesaria para la planificación territorial y la toma de decisiones informadas.

Gestión Nacional (INDRHI): El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) es otro actor clave. Como ente rector de las aguas superficiales y subterráneas, su principal interés es contar con datos técnicos actualizados para mejorar la administración de los acuíferos y garantizar la sostenibilidad del recurso a nivel nacional. De igual forma, las empresas mineras de la zona representan un actor con alto impacto, dado que sus actividades pueden modificar la disponibilidad y calidad del agua subterránea. Su interés radica en disponer de un marco de referencia técnico que oriente sus operaciones hacia la sostenibilidad y minimice conflictos socioambientales.

Finalmente, la academia y centros de investigación, como la UTECO, tienen un papel importante en el fortalecimiento del conocimiento científico y la formación de profesionales en geología e hidrogeología.

El presente estudio constituye una base técnica que puede ser utilizada para futuros trabajos de investigación y monitoreo ambiental.

En conclusión, el análisis de los involucrados refleja que tanto la comunidad como las instituciones estatales, el sector productivo y la academia tienen un interés común en la adecuada gestión de las aguas subterráneas, siendo este estudio un aporte técnico que contribuye a la sostenibilidad del recurso en el Distrito Municipal Zambrana Aba

Actor / Involucrado	Interés principal	Nivel de influencia	Posibles conflictos o aportes
Comunidad local (Zambrana Abajo)	Acceso a agua de calidad para consumo y uso doméstico/agropecuario	Alto	Conflictos por escasez o mala calidad del agua; aportes en información local y participación
Autoridades municipales y distritales	Garantizar abastecimiento de agua y planificación territorial	Medio-Alto	Limitaciones técnicas y financieras; aportes en gestión comunitaria
INDRHI (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos)	Administración de recursos hídricos y manejo de acuíferos	Alto	Posible falta de coordinación; aportes en normativa y gestión técnica
Empresas mineras de la zona	Uso del recurso hídrico en procesos productivos y cumplimiento ambiental	Alto	Riesgo de contaminación o sobreexplotación; aportes en inversión y monitoreo ambiental
Academia (Universidad UTECO y otros centros)	Investigación y formación profesional en hidrogeología	Medio	Limitación en recursos económicos; aportes en conocimiento científico y monitoreo

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA O MARCO REFERENCIAL

2.1 Introducción

Este capítulo expone los elementos conceptuales, investigativos y referenciales que conforman los marcos contextuales, conceptuales y teóricos. En este apartado se analizan los antecedentes y las variables relacionadas con las características geológicas e hidrogeológicas del área de estudio, así como su influencia en la calidad del acuífero.

En esta sección se describe las principales litologías y los eventos de alteración hidrotermal. Con énfasis particular en cómo estas características condicionan directamente la presencia y el comportamiento del agua subterránea en el Distrito Municipal Zambrana Abajo. Este análisis geológico es fundamental, pues es lo que permite identificar las zonas de mayor potencial hidrogeológico, comprender los patrones de recarga y almacenamiento, y anticipar cualquier dificultad técnica en la explotación de los acuíferos.

2.2 Antecedentes

2.2.1 Antecedentes internacionales

Parra Sáez (2024), en su investigación titulada “Caracterización hidrogeológica del área de influencia del santuario de la naturaleza — desembocadura río Itata, Región de Ñuble, Chile”, desarrolló un estudio integral orientado a identificar las principales unidades hidrogeológicas, la dinámica piezométrica y la calidad de las aguas subterráneas de la zona. Para ello se aplicaron técnicas de inventario de pozos, mediciones de niveles estáticos, análisis hidroquímicos de laboratorio y la elaboración de mapas de isopiezas y facies químicas.

El estudio permitió delimitar las zonas de recarga y descarga, describiendo cómo las condiciones litológicas y geomorfológicas determinan la disponibilidad hídrica. Los resultados mostraron que las aguas presentan facies bicarbonatadas cálcicas, aunque en sectores cercanos a la costa se observaron incrementos de cloruros asociados a intrusión marina. Este trabajo se considera un referente metodológico, ya que integra variables geológicas, hidroquímicas y piezométricas en un modelo conceptual aplicable a la gestión local del recurso.

Martínez Estrada (2023), en su tesis “Caracterización hidrogeológica y determinación de áreas de recarga acuífera en la microcuenca del río Agua Caliente, Lago de Coatepeque, El Salvador”, se centró en el análisis integral de los sistemas hidrogeológicos y su dinámica en condiciones de época seca y lluviosa.

El objetivo fue identificar las áreas de recarga acuífera y comprender los procesos de circulación subterránea, además de caracterizar la hidroquímica de las aguas subterráneas. La metodología incluyó muestreos hidroquímicos, análisis de isótopos estables de oxígeno (O-18) y deuterio, pruebas de infiltración, así como balances hídricos diferenciados por estación. Los hallazgos permitieron diferenciar zonas con mayor capacidad de recarga y se elaboró un modelo conceptual hidrogeológico que describe las relaciones entre litología, precipitación y dinámica del flujo subterráneo.

El estudio demostró que la variabilidad estacional influye de manera significativa en la composición hidroquímica del agua y en los procesos de recarga-descarga, aportando criterios técnicos para la gestión sostenible del recurso.

Ríos-Vásquez, Colegial-Gutiérrez y Collazo-Caraballo (2023), en su artículo “Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas, Minas, Lavalleja, Uruguay”, analizaron las aguas subterráneas con fines de consumo humano y usos locales, a fin de establecer las facies químicas predominantes y evaluar su calidad. El estudio se desarrolló a través de muestreos de fuentes subterráneas, determinación de iones mayoritarios y análisis comparativos con normas de calidad de agua. Los resultados mostraron que predominan facies bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, típicas de acuíferos desarrollados en rocas carbonatadas, aunque en algunos puntos se detectaron iones con valores por encima de los límites establecidos para potabilidad.

Además, mediante la aplicación de metodologías de vulnerabilidad hidrogeológica, se identificaron zonas con vulnerabilidad alta a muy alta debido a las características intrínsecas del acuífero. El estudio constituye un referente para la planificación del uso del agua, ya que integra tanto la caracterización química como la evaluación de riesgo de contaminación.

Molina et al. (2023), en el trabajo “Caracterización de recursos hídricos y modelo hidrogeológico de la microcuenca del río Colón, San Salvador, El Salvador”, abordaron la caracterización hidrogeológica mediante un enfoque de cuenca. La metodología incluyó un inventario de 58 fuentes de agua, la medición de caudales base, muestreo hidroquímico, análisis estadístico multivariante y la elaboración de un modelo conceptual que describe la conexión entre aguas superficiales y subterráneas. Los resultados evidenciaron que las aguas del acuífero presentan principalmente una facies bicarbonatada cálcica, aunque en zonas agrícolas se observaron concentraciones elevadas de nitratos. El estudio concluyó que la microcuenca posee alta vulnerabilidad por su litología fracturada y la cercanía de fuentes de contaminación difusa. Además, recomendó establecer perímetros de protección y programas de control de la calidad del agua.

Chapoñan Cayao (2022), en su investigación titulada “Caracterización hidrogeoquímica de aguas subterráneas en el distrito de Jayanca, Lambayeque, Perú”, tuvo como propósito evaluar la calidad hidrogeoquímica de las aguas extraídas de pozos tubulares y determinar la presencia de metales pesados y parámetros fisicoquímicos de interés.

La metodología empleada se basó en el muestreo de diez pozos tubulares distribuidos en la zona de estudio, donde se realizaron análisis fisicoquímicos, bacteriológicos y de metales pesados, utilizando diagramas hidroquímicos como Piper, Gibbs y Schoeller.

Los resultados revelaron anomalías en ciertos parámetros, destacando la presencia de metales pesados en concentraciones superiores a los límites normativos, así como un predominio de facies químicas asociadas a sodio, potasio y cloruros. Se elaboraron mapas de isoconcentración que permitieron identificar zonas con mayor vulnerabilidad hidrogeoquímica. Este trabajo constituye un aporte fundamental al conocimiento de la hidrogeología local, ya que no solo identificó los principales tipos de agua presentes, sino que además destacó los factores antrópicos y naturales que influyen en su calidad.

Teixeira et al. (2021), en su revisión “Caracterización estructural, hidrogeológica e hidroquímica de acuíferos de la Cuenca del Paraná”, recopilaron información de más de 30 investigaciones realizadas en Brasil, Paraguay y Argentina. El objetivo fue analizar la relación entre la estructura geológica, la dinámica de flujo y la hidroquímica de las aguas subterráneas. Los autores concluyeron que las fracturas y lineamientos tectónicos son los principales controladores del flujo regional, mientras que la disolución de rocas carbonatadas y la interacción con suelos lateríticos influyen en la calidad del agua. La revisión destaca la utilidad de combinar estudios estructurales, hidroquímicos y de modelación numérica para una caracterización completa de acuíferos a gran escala.

Greza Toloza (2021), en la tesis “Caracterización hidrogeológica de aguas subterráneas, análisis de vulnerabilidad y cartografía de riesgo del acuífero Bío-Bío Medio, Chile”, tuvo como propósito describir las unidades hidrogeológicas, evaluar la vulnerabilidad del acuífero y generar cartografía de riesgo para apoyar la gestión de recursos hídricos. El estudio integró inventario de pozos, análisis físicoquímicos de aguas subterráneas, modelamiento hidrogeológico e implementación de métodos de evaluación de vulnerabilidad como DRASTIC. Los resultados indicaron la existencia de dos unidades hidrogeológicas principales: depósitos volcánicos y sedimentos no consolidados, cada una con distinta capacidad de almacenamiento y conducción. Se concluyó que el acuífero presenta niveles de vulnerabilidad intermedios a altos frente a la contaminación, y se enfatizó la necesidad de proteger las zonas de recarga y controlar las fuentes de contaminación difusa.

Rabi Mislé (2018), en su tesis “Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de la cuenca del río Cauquenes, Región del Maule, Chile”, planteó como objetivo comprender la relación entre la geología volcánica predominante, la hidroquímica de las aguas subterráneas y la dinámica de flujo del acuífero. Se realizaron muestreos estacionales de pozos, mediciones de parámetros *in situ* como pH, conductividad eléctrica y potencial redox, además de análisis de iones mayores en laboratorio. Se emplearon diagramas de Piper y Schoeller para establecer las facies dominantes, resultando principalmente bicarbonatadas cálcicas y sódicas. El autor concluyó que la variabilidad hidroquímica está influenciada tanto por los procesos de disolución de rocas volcánicas como por aportes superficiales de escorrentía. Asimismo, se recomendó implementar un

monitoreo estacional continuo para anticipar cambios asociados al clima y a la presión antrópica sobre los recursos.

González de Jiménez (2015), en el trabajo “Caracterización geofísica e hidrogeológica preliminar del acuífero de Antón, Panamá”, desarrolló un modelo conceptual hidrogeológico con el fin de evaluar las condiciones de explotación sostenible del acuífero local.

Para ello se aplicaron sondeos eléctricos verticales (SEV), pruebas de bombeo y análisis iónicos de aguas subterráneas, además de un inventario de pozos y el estudio de las condiciones geológicas. Los resultados permitieron diferenciar unidades hidráulicas con distintas conductividades, establecer valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, así como definir zonas de recarga y descarga.

Este trabajo proporcionó lineamientos técnicos para la gestión sostenible del recurso y puso en evidencia la importancia de integrar herramientas geofísicas en la caracterización hidrogeológica.

2.2.2 Antecedentes nacionales

Liriano et al. (2021), en el trabajo “Análisis de la calidad de las aguas subterráneas en el Municipio de Cotuí”, realizaron una caracterización hidrogeológica a partir de 15 pozos, donde se aplicaron análisis físicos, químicos y microbiológicos.

Se determinó que, aunque los parámetros físicos se encontraban dentro de los rangos permitidos, el 73.3% de los pozos presentaban contaminación fecal y el 33% superaba los límites en parámetros químicos, lo que evidencia una calidad deficiente del recurso subterráneo. Además, se identificaron deficiencias en la construcción de los pozos que incrementaban el riesgo de contaminación cruzada.

Mejía et al. (2021), en su proyecto “Inventario actualizado de puntos de agua del municipio Cotuí y establecimiento de perímetros de protección”, elaboraron un inventario detallado de aproximadamente 190 pozos, sondeos y manantiales, evaluando parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y potencial redox. A través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se elaboraron mapas de vulnerabilidad y se diseñó una base de datos pública para la gestión del recurso. Se concluyó que la mayoría de las aguas subterráneas de Cotuí cumplen con los estándares nacionales e internacionales de calidad, aunque se identificaron algunos puntos vulnerables a contaminación antrópica.

Rosa et al. (2017), en la investigación “Hidrogeología e hidro geoquímica del Distrito Municipal de Boyá, Provincia Monte Plata”, caracterizaron las aguas subterráneas y superficiales del área, integrando análisis fisicoquímicos, hidroquímicos y bacteriológicos. El estudio determinó que las fuentes analizadas no cumplen con las normas de calidad para consumo humano establecidas por el Ministerio de Medio

Ambiente y Recursos Naturales (2012), principalmente por la presencia de contaminantes microbiológicos.

Mediante el uso de diagramas de Stiff, se identificó que las aguas presentan composiciones bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, asociadas a procesos naturales de disolución en rocas carbonatadas. Sin embargo, la presencia de vertederos, cementerios y criaderos de animales incidió en la alteración de la calidad hidroquímica.

Francisco et al. (2016), en su trabajo de grado titulado “Determinación del comportamiento hidrogeológico en la periferia del espacio de disposición final de residuos sólidos en Cotuí”, caracterizaron el sistema hidrogeológico en las inmediaciones de un vertedero, con énfasis en los impactos sobre los acuíferos locales.

La metodología incluyó muestreos fisicoquímicos y bacteriológicos de agua, levantamientos morfológicos y análisis de la geología local. Los resultados mostraron que el flujo de contaminantes, especialmente lixiviados, sigue la dirección sur-norte, influenciado por la litología kárstica y la presencia de arcillas férricas, lo que incrementa la vulnerabilidad del acuífero. El estudio concluyó que el vertedero impacta de manera significativa en la calidad de las aguas subterráneas y puso en evidencia la necesidad de aplicar medidas de mitigación y monitoreo permanente.

Rodríguez Morillo y Febrilete Huertas (2006), en el estudio “Hydrogeological potential of the Dominican Republic”, realizaron un análisis general de las unidades hidrogeológicas del país, destacando las condiciones de recarga, el balance hídrico y la disponibilidad de agua subterránea. Se reportó que los acuíferos dominicanos presentan condiciones de vulnerabilidad por la ausencia de perímetros de protección y el uso intensivo del recurso, especialmente en zonas urbanas y agrícolas. Además, se indicó que una gran proporción de pozos someros presentan contaminación bacteriológica, lo que refleja la necesidad de establecer programas de monitoreo piezométrico y químico a nivel nacional.

2.3 Marco Teórico

2.3.1 Geología e hidrogeología

Geología

Como pilar fundamental del estudio, la geología (Pinos, 2020) es la ciencia que explica la composición, la estructura y los procesos que han afectado a la Tierra, incluyendo las formaciones rocosas y los suelos.

En el contexto de los recursos hídricos, la geología es decisiva (Somers & Jeffrey M. McKenzie, 2020) porque las características de las rocas, como la porosidad y la permeabilidad, son las que definen dónde se almacena el agua subterránea y cómo se mueve. Por ejemplo, mientras que rocas como la caliza pueden generar sistemas kársticos con gran capacidad de conducción (algo relevante en el Distrito Municipal Zambrana Abajo), las rocas ígneas generalmente limitan el paso del agua.

Hidrogeología

La hidrogeología es el espacio de estudio de la geología que se encarga de la distribución, movimiento y propiedades del agua subterránea en los poros y fracturas de las rocas y sedimentos terrestres, así como su interacción con los ecosistemas y actividades humanas (Rogers, 2021)

El estudio se concentró en comprender cómo las propiedades de las rocas y los sedimentos controlan el movimiento del agua, cómo interactúan las aguas superficiales y subterráneas, concentrándonos más en las subterráneas y el impacto que las actividades humanas tienen en la calidad y cantidad de este recurso vital.

Este campo multidisciplinario (basado en geología, física, química e ingeniería) fue esencial para abordar la compleja problemática ambiental y de gestión hídrica en el distrito.

Hidrogeología y asuntos humanos

La hidrogeología está asociada de manera cercana a los asuntos humanos de muchas maneras. Así como:

Servicio de agua potable: Una de las aplicaciones más importantes de la hidrogeología es evaluar y gestionar los recursos de agua subterránea para el abastecimiento de agua. Los hidrogeólogos analizan y describen las propiedades de los acuíferos, estiman las tasas de recarga y el flujo de agua subterránea y desarrollan modelos para predecir cómo responderán los acuíferos a diferentes escenarios de bombeo. Las personas responsables de la gestión del agua hacen esta información para tomar decisiones sobre la asignación de agua, la colocación de pozos y las tasas de bombeo.

Transporte de contaminantes: Los hidrogeólogos también juegan un papel clave en la evaluación y gestión de la contaminación de las aguas subterráneas. Investigan el movimiento de contaminantes en las aguas subterráneas, evalúan el potencial de los contaminantes para llegar a las fuentes de agua potable y desarrollan estrategias para remediar los sitios contaminados. Las investigaciones hidrogeológicas a menudo forman parte de las evaluaciones ambientales del sitio para sitios industriales, vertederos y otros sitios contaminados.

Planificación del uso de la tierra: la hidrogeología es importante en la planificación del uso de la tierra, particularmente en áreas donde los recursos de agua subterránea son vulnerables a la contaminación o al uso excesivo.

Las investigaciones hidrogeológicas pueden identificar áreas que son adecuadas para ciertos tipos de desarrollo (por ejemplo, residencial, industrial, agrícola), así como áreas que deben protegerse del desarrollo para mantener los recursos de agua subterránea. (Domenico & Schwartz, 2020).

Cambio climático: la hidrogeología también es importante para comprender los impactos del cambio climático en los recursos de agua subterránea. A medida que cambian los patrones de precipitación y evapotranspiración, es probable que las tasas de recarga de las aguas subterráneas y los patrones de flujo de las aguas subterráneas se vean afectados. Las investigaciones hidrogeológicas pueden ayudar a predecir cómo responderán los acuíferos a estos cambios e identificar áreas que son particularmente vulnerables a la sequía u otros impactos.

En general, la hidrogeología es un campo importante que contribuye a nuestra comprensión de los recursos hídricos y su interacción con las actividades humanas.

Historia de la Hidrogeología

La evolución del conocimiento hidrogeológico abarca desde los saberes empíricos de las civilizaciones antiguas —como egipcios, griegos y romanos— hasta el desarrollo científico moderno. Durante los siglos XVI al XVIII, los avances en cartografía impulsaron una comprensión más sistemática del comportamiento del agua subterránea. En el siglo XIX, la disciplina se fortaleció con aportes fundamentales como la Ley de Darcy (1856). Ya en el siglo XX, la incorporación de métodos geofísicos, sondeos y modelación matemática consolidó la hidrogeología moderna. En la actualidad, su enfoque integra sostenibilidad, gestión de acuíferos y herramientas tecnológicas avanzadas. (García & Pérez, 2022)

2.3.2 Propiedades del agua subterránea

"Las propiedades del agua subterránea son la base de esta investigación, ya que definen la disponibilidad hídrica en Zambrana Abajo.

Por definición, el agua subterránea es el recurso que se encuentra almacenado bajo la superficie en formaciones geológicas permeables, denominadas acuíferos. Estos están compuestos por materiales como arena, grava o roca porosa, que facilitan tanto el almacenamiento como el flujo del recurso. La Fundación AQUAE (2021) destaca que esta reserva es esencial para la vida y el desarrollo humano, cumpliendo un rol clave en la agricultura y en el ciclo hidrológico.

La formación de estas reservas es un proceso natural: el agua de lluvia se infiltra y se acumula en los espacios porosos entre las rocas y sedimentos (Icebook, 2023).

Este proceso de infiltración y recarga es fundamental para mantener el balance hídrico. A nivel global, este recurso representa cerca del 30% del agua dulce disponible. En nuestro contexto de estudio, el agua subterránea es una fuente vital que se extrae mediante pozos para uso doméstico, agrícola e industrial, especialmente crítica para regiones que enfrentan escasez de agua superficial (ver Anexo 6, Imagen 1).

Este recurso es fundamental en el ciclo hidrológico, ya que contribuye significativamente al caudal de los ríos, manteniéndolos durante períodos sin precipitaciones (Schleiger, 2024). Además, las aguas subterráneas representan aproximadamente el 99% del agua dulce en estado líquido disponible en el planeta, lo que subraya su importancia para el abastecimiento humano, la agricultura y la industria.

En la República Dominicana, las aguas subterráneas son esenciales para el suministro de agua potable y el desarrollo económico. El director del Gabinete del Agua, Gilberto Reynoso (2022) ha afirmado que, en el país, las aguas subterráneas son comparables al "petróleo", representando un patrimonio hídrico vital.

Sin embargo, a pesar de su importancia, las características hidrológicas del agua subterránea en la región no están completamente comprendidas (MEPyD, 2018), lo que tiene implicaciones tanto técnicas como políticas. Estudios previos indican la existencia de un acuífero binacional dominado por una geología kárstica, cuyas áreas de recarga y flujo aún no se comprenden totalmente.

Flujo de agua subterránea/disminución:

De acuerdo con USGS (USGS, Flujo de agua subterránea , 2023) el sistema de agua subterránea se recarga debido a la precipitación pluvial y el agua fluye hacia los arroyos a través de este sistema (ver Anexo 6, imagen 2).

Agua bombeada del sistema subterráneo causa que la capa freática baje de nivel y cambie la dirección de la corriente del agua subterránea. Parte del agua que fluía hacia un arroyo, ya no lo hace y así mismo, algo de esta corriente también es acarreada desde el arroyo hasta el sistema de agua subterránea, reduciendo por lo tanto la corriente del arroyo (Ver Anexo 6, imagen 3).

Los contaminantes que se introducen en la superficie de la tierra pueden infiltrarse a la capa freática y fluir hacia un punto de descarga, ya sea un pozo o un arroyo. (A pesar de no mostrarse aquí, también es importante saber sobre la descarga potencial de contaminantes que pasan del arroyo hacia el sistema de agua subterránea), (ver Anexo 6, imagen 3)

Los declives del agua pueden afectar el ambiente natural de las plantas y animales. Por ejemplo, plantas en las áreas ribereñas que crecen por la proximidad de la capa freática a la superficie, podrían no sobrevivir si el agua aumentara su profundidad. El ambiente para los peces y vida acuática también puede ser alterado si el nivel del arroyo decae, (ver Anexo 6, imagen 3).

Origen del agua subterránea

El agua subterránea tiene su origen principalmente en el proceso de infiltración del agua de lluvia, ríos o cuerpos superficiales que penetra en el subsuelo a través de los poros, fisuras o fracturas de las rocas y sedimentos. Este proceso se conoce como recarga natural del acuífero, y depende de factores como la permeabilidad del terreno, la cobertura vegetal, la topografía y la intensidad de las precipitaciones (AQUAE, 2024).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2022), el agua subterránea se forma a lo largo de años, décadas o incluso siglos, como resultado del paso lento del agua a través de formaciones geológicas permeables, donde se almacena en acuíferos, ya sean libres o confinados.

De acuerdo con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, Groundwater Basics. United States Geological Survey, 2020), existen dos tipos principales de recarga:

- Recarga directa o meteórica: proviene de la infiltración del agua de lluvia directamente sobre la superficie del terreno.
- Recarga indirecta o lateral: ocurre cuando el agua se infiltra desde cuerpos superficiales cercanos como ríos, lagos o canales.

En zonas de geología kárstica, como ocurre en algunas regiones de la República Dominicana (2022), el agua puede circular rápidamente a través de cavidades y grietas de origen calizo, favoreciendo una recarga más dinámica, pero también más vulnerable a la contaminación.

Importancia de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son una fuente crucial de agua dulce a nivel mundial, representando aproximadamente el 30% del volumen total de agua dulce y siendo fundamental para el consumo humano, la agricultura y la industria. Su importancia radica en su capacidad de proporcionar agua durante periodos de sequía, mantener los ecosistemas acuáticos y apoyar el desarrollo económico de las comunidades. Además, las aguas subterráneas contribuyen a la recarga de ríos y lagos, asegurando la continuidad de los ecosistemas superficiales. La gestión sostenible de estos recursos es esencial para evitar su sobreexplotación y la contaminación, aspectos que han tomado mayor relevancia en los últimos años debido a la creciente demanda y las amenazas ambientales. (Martínez, 2022)

Según un informe reciente de la UNESCO (2022), la gestión adecuada de las aguas subterráneas es crucial para evitar su sobreexplotación, que puede conducir a la disminución de los niveles freáticos, la intrusión salina y el deterioro de la calidad del agua, afectando tanto a las comunidades humanas como a los ecosistemas acuáticos. La protección y conservación de estos acuíferos son esenciales para garantizar un suministro de agua sostenible y resiliente frente a los desafíos del cambio climático y el crecimiento poblacional.

Las aguas subterráneas desempeñan un papel fundamental en la agricultura, especialmente en regiones donde las precipitaciones son escasas o irregulares.

Su disponibilidad contribuye a garantizar la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, además de ofrecer una fuente de agua confiable para el riego durante períodos de sequía.

Según un estudio reciente de Smith et al (2022), la gestión sostenible de las aguas subterráneas es crucial para mitigar los efectos de la sequía en la agricultura, promoviendo prácticas que permitan mantener los niveles de acuíferos y evitar su agotamiento. La protección de estos recursos no solo favorece la continuidad de las actividades agrícolas, sino que también ayuda a reducir la vulnerabilidad de las comunidades ante eventos climáticos extremos, asegurando un suministro de agua a largo plazo.

Problemas asociados a la explotación de las aguas subterráneas

Aun siendo un recurso fundamental, el uso intensivo y la gestión inadecuada de las aguas subterráneas pueden desencadenar impactos significativos. Entre los más relevantes se encuentra la sobreexplotación, la cual se presenta cuando la extracción supera la capacidad natural de recarga. Esto puede provocar el agotamiento de acuíferos, lo que lleva a la escasez de agua en ciertas regiones.

Además, la contaminación de las aguas subterráneas es otro desafío importante. Los acuíferos pueden contaminarse debido a la infiltración de productos químicos agrícolas, aguas residuales industriales o desechos domésticos.

Una vez contaminada, es difícil y costoso restaurar la calidad del agua subterránea, lo que puede tener consecuencias a largo plazo para la salud humana y los ecosistemas. Icebook (2023).

2.3.3 Geología de la República Dominicana

La República Dominicana se sitúa en el extremo norte de la Placa del Caribe, compartiendo con Haití la isla La Española. Geológicamente, esta región ha sido modelada por una intensa actividad tectónica que ha incluido subducción, levantamientos, vulcanismo, y sedimentación desde el Jurásico hasta el presente. El país presenta una configuración compuesta por múltiples provincias geológicas, entre ellas el Cinturón de Rocas Verdes, que reviste especial interés en el área del Distrito Municipal Zambrana Abajo.

Las principales provincias geológicas incluyen:

- Cinturón de Rocas Verdes
- Macizo Metamórfico Septentrional
- Complejo Duarte
- Provincia de Bahoruco-Enriquillo
- Complejo Ofiolítico de la Formación Loma Caribe

El Cinturón de Rocas Verdes, formado en un ambiente de arco de isla oceánico durante el Cretácico Inferior, contiene principalmente rocas volcánicas submarinas y sedimentarias con grados de metamorfismo bajo.

Dentro de esta unidad destaca la Formación Los Ranchos, rica en andesitas, tobas y fragmentos de queratófidos, y cuyos miembros incluyen los complejos Quitasueño, Meladito, Platanal, Zambrana y Pueblo Viejo.

2.3.4 Geología de la Región del Distrito Municipal Zambrana Abajo

El área del Distrito Municipal Zambrana Abajo se encuentra en el corazón del Cinturón de Rocas Verdes, dentro de la provincia Sánchez Ramírez. Su geología está dominada por el Complejo Los Ranchos, una unidad que aflora extensamente y presenta una gran variedad de facies volcánicas, sedimentarias y volcanoclásticas con altos niveles de alteración hidrotermal.

Las principales características de esta región son:

- Rocas de tipo andesítico-basaltoide altamente fracturadas.
- Eventos hidrotermales antiguos que han generado brechas mineralizadas, principalmente de oro.
- Formaciones ígneas intrusivas, como tonalitas, especialmente la Tonalita de Zambrana, datada en 115 millones de años.
- Relieves montañosos intercalados con depresiones sedimentarias como la Depresión de Zambrana, donde se acumulan sedimentos cuaternarios de hasta 20 metros de espesor.

Las unidades más representativas en Zambrana Abajo son:

- **Miembro Zambrana:** Se trata de rocas fragmentarias formadas por tobas líticas de grano grueso, con presencia de cuarzoqueratófidos y fragmentos de espilitas. Estas rocas están altamente brechificadas e hidrotermalizadas, lo que las distingue del resto de la Formación Los Ranchos. Han sido objeto de explotación aurífera debido a su mineralización secundaria. Se cree que derivan del Miembro Meladito, pero intensamente afectadas por actividad volcánica explosiva.
- **Miembro Platanal y Naviza (Espilitas):** Representadas por coladas y brechas aglomeráticas, con fenocristales de clinopiroxeno y plagioclasa. Estas espilitas son comúnmente meteorizadas en forma de bolos, especialmente en la Loma La Cuaba y Loma La Naviza, formando parte de estratovolcanes antiguos.
- **Depósitos Cuaternarios:** En la depresión de Zambrana, existen depósitos de limos, arcillas y gravas que conforman abanicos aluviales coalescentes. Estas unidades son importantes desde el punto de vista hidrogeológico y agrícola.
- **Tonalitas de Zambrana:** Intrusión ígnea de grano medio con cuarzo, horblenda y plagioclasa zonada, presente en el norte de la depresión de Zambrana. Muestran disyunción en bolos y alta meteorización superficial.

2.3.5 Estructuras Geológicas Relevantes

Zambrana Abajo está influenciado por diversas estructuras tectónicas, entre las cuales se destacan:

- **Cabalgamiento de Hatillo:** Una falla inversa de dirección NO-SE, responsable de la superposición de la Formación Maimón sobre Las Lagunas. Visible desde la carretera Maimón-Cotuí.
- **Fracturación y fallamiento:** Presencia de fallas normales e inversas, así como fracturas subparalelas que pueden actuar como zonas de flujo preferente de agua subterránea o como barreras hidráulicas si están colmatadas por minerales de alteración.
- **Estructura de tipo “pop-up”:** Producto de compresión NE-SO durante el Eoceno, generando vergencias tectónicas dobles en la región.
- **Red hidrográfica estructuralmente controlada:** La disposición de los arroyos y ríos responde a lineamientos geológicos, siguiendo directrices NOSE y NE-SO, especialmente en el drenaje del río Chacuey y sus afluentes.

Geología Local del Distrito Municipal Zambrana Abajo

La geología local muestra una alta complejidad litológica y estructural. Entre los elementos principales se encuentran:

- Lavas basálticas y andesíticas alteradas por hidrotermalismo (con clorita, epidota, óxidos).

- Tobas piroclásticas: Grises y ocre, débilmente consolidadas, que pueden funcionar como reservorios si están poco compactadas.
 - Capas arcillosas y pelitas de origen sedimentario o hidrotermal, que actúan como acuitardos.
 - Diques intrusivos: Gabros y microdioritas de comportamiento generalmente impermeable, que segmentan los flujos subterráneos.

Figura 24: Mapa Geológico Del Distrito Municipal Zambrana abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025

2.3.6 Modelación del Relieve

La modelación del relieve consiste en la representación tridimensional de la superficie terrestre a partir de datos altitudinales. Esta herramienta es útil para comprender la distribución de cuencas, la dirección del escurrimiento superficial y su relación con la recarga del acuífero. Además, permite identificar zonas vulnerables a procesos erosivos, inundaciones o sobreexplotación del recurso hídrico.

El relieve presenta:

- Depresiones colmatadas, como la de Zambrana, donde es más viable la perforación de pozos.
- Laderas empinadas, donde la fracturación puede favorecer la infiltración, pero con riesgos de baja productividad o turbidez en pozos.

La exploración hidrogeológica debe enfocarse en identificar:

- Redes de fracturación conectada.
- Sectores con rellenos aluviales.
- Zonas con baja alteración hidrotermal, para asegurar la productividad y calidad del agua.

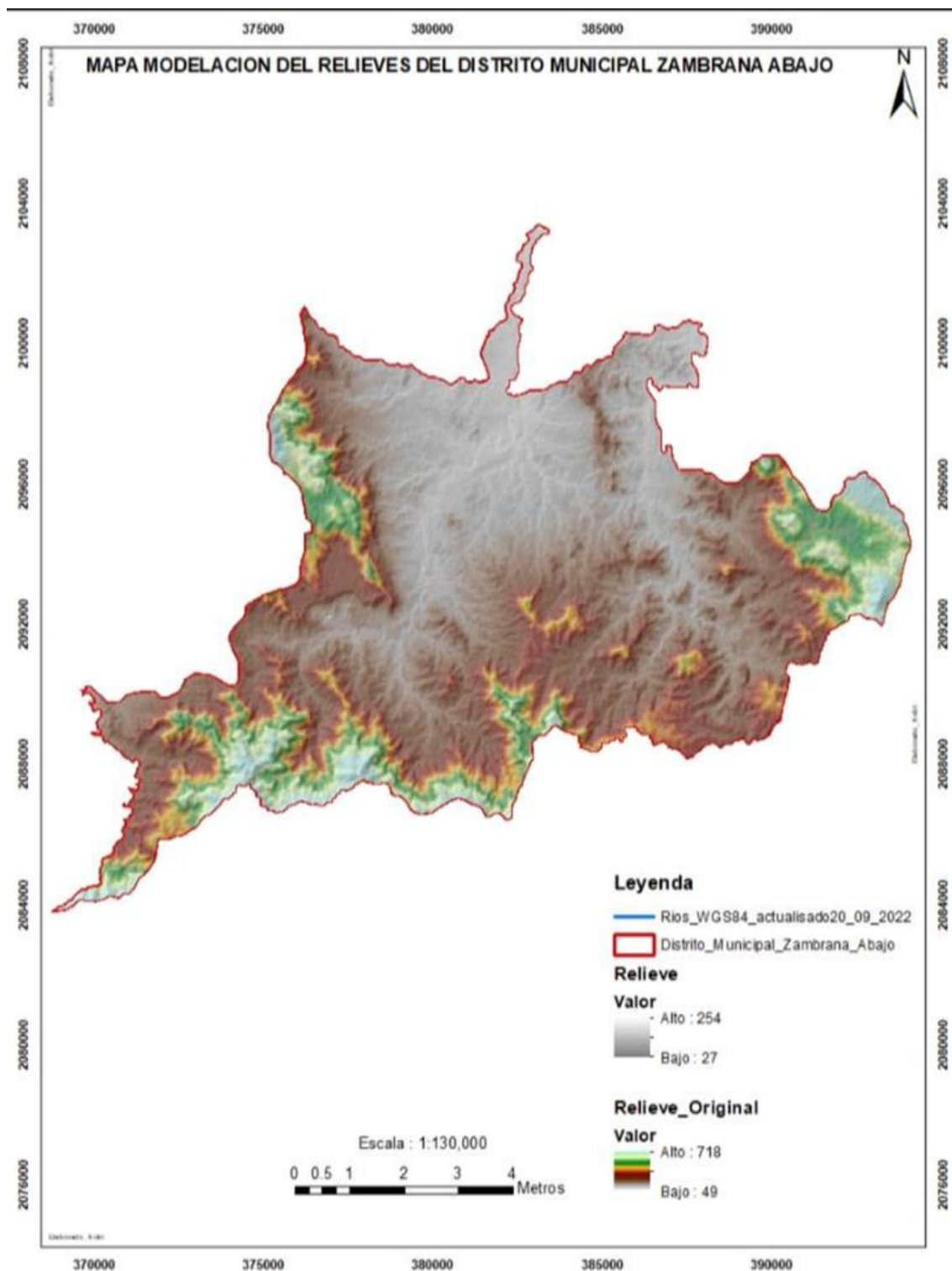


Figura 24: Mapa modelado del relieve del distrito municipal Zambrana abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025

2.3.7 Comunidades del Distrito Municipal Zambrana Abajo

La Quebradita, Tocoa, Maguaca, Fátima, La Pinita, Piedra Imán, Las Naranjos, El Llagal, Sabana Larga, El Rayo, El Higo, Arroyo Vuelta, Las Lagunas, Jobo Claro, Sabana Rey, Maricao, La Jagua Mocha, Las Lajas, Arroyo Vuelta, Las Tres Bocas, La Cueva, Las Dos Palmas, La Placeta, Zambrana Abajo, Los Algarrobos, La Atravesada, El Limpio, Tojin, Zambrana Arriba, Algarrobal, Los Corocitos, Los Jobos, La Caoba, Arroyo Grande, La Jagua, La Cueva, El Corozo, Loma de la Gallina, Los yagrumos, La placeta, La Hondonadas, La javilla, Los tres Pasos de Chacuey, Naranjos, Los Pomos, La Culata, El Limón, La Llamada, Los mapolos. (49 comunidades)

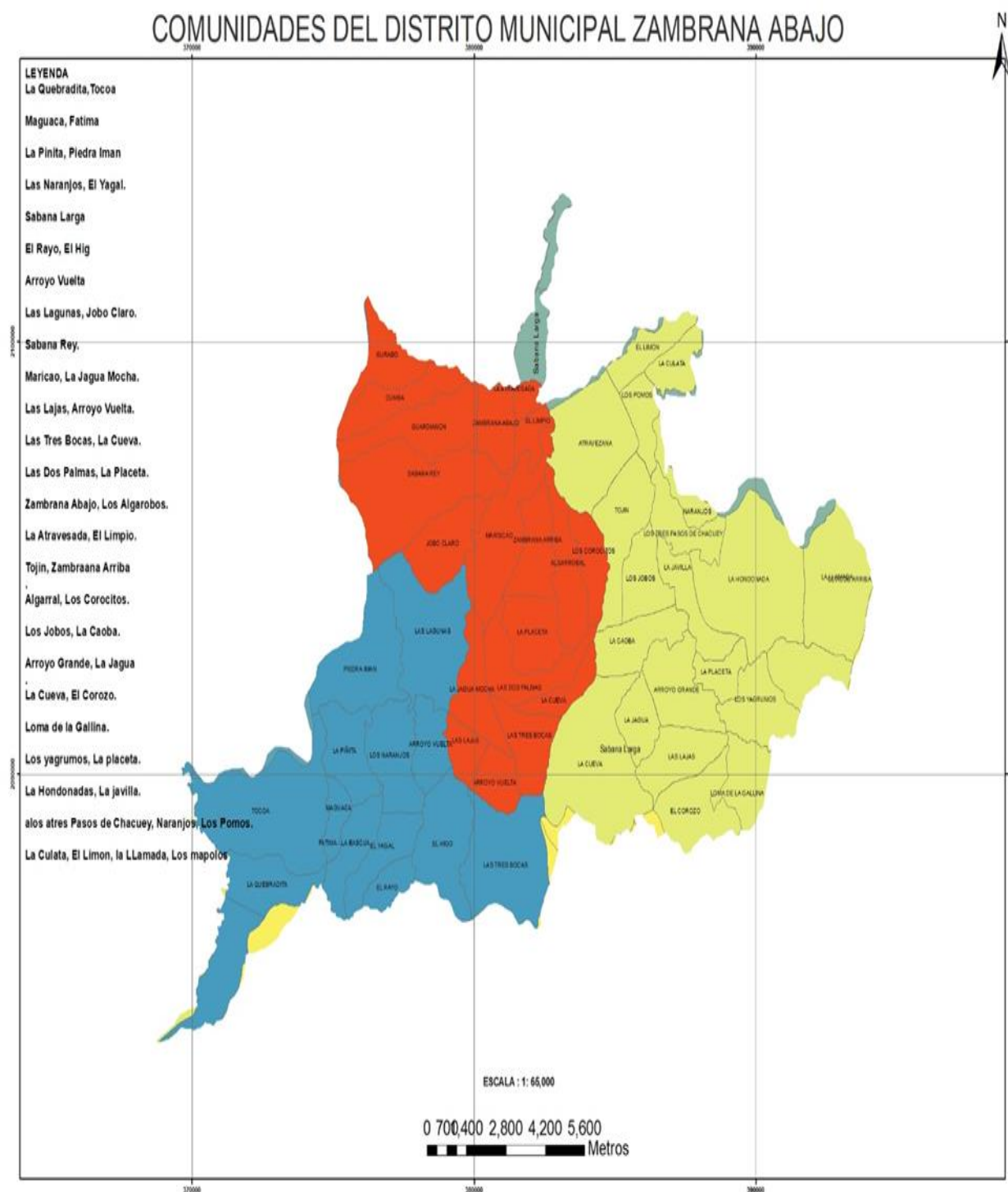


Figura 25: Mapa de las comunidades del distrito municipal Zambrana abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

2.4 Marco conceptual

Agua:

El agua es una sustancia química compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O), esencial para la vida por su papel fundamental en la supervivencia y funcionamiento de los seres vivos. Es un líquido incoloro, inodoro e insípido, que se puede encontrar en estado sólido, líquido y gaseoso, y constituye la base del ciclo hidrológico y los ecosistemas terrestres (Bernal, 2017).

Agua potable:

El agua potable es aquella que, por sus características físicas, químicas, microbiológicas y organolépticas, es apta para el consumo humano. Su ingesta no causa efectos nocivos para la salud y cumple con normativas específicas que regulan los valores máximos admisibles de contaminantes y propiedades sensoriales (Mendizábal, 2010)

Agua subterránea:

El agua subterránea es el agua que se encuentra bajo la superficie terrestre, almacenada en los poros y fracturas de las rocas y suelos, formando acuíferos geológicos. Es un recurso hídrico esencial que forma parte del ciclo hidrológico y se origina principalmente por la infiltración de aguas superficiales como lluvia o ríos. Este tipo de agua es fundamental para el abastecimiento humano, agrícola e industrial, además de sostener ecosistemas acuáticos y terrestres (Escobar, 2017).

Calidad del agua subterránea:

La calidad de las aguas subterráneas se define como el conjunto de características físicas, químicas, biológicas y microbiológicas que determinan su aptitud para el consumo humano, agrícola, industrial o para el mantenimiento de los ecosistemas asociados. Esta calidad debe protegerse, conservarse y mejorarse para garantizar la seguridad en su uso y preservar las condiciones ecológicas adecuadas (MMARN, 2018)

Porosidad

La porosidad es la proporción entre el volumen de espacios vacíos o poros en un material sólido y el volumen total de dicho material. En hidrogeología, la porosidad es fundamental para determinar la capacidad de almacenamiento de agua en formaciones rocosas o sedimentarias. Se distingue la porosidad total, que incluye todos los poros, y la porosidad efectiva, que corresponde solo a los poros interconectados que permiten el flujo de agua (Montoya, 2025).

Permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad que tiene un medio poroso, como un suelo o una roca, para permitir el paso de fluidos a través de sus espacios porosos interconectados. En hidrogeología, la permeabilidad es un parámetro fundamental que indica cómo el agua subterránea se mueve a través del acuífero bajo un gradiente hidráulico. Esta propiedad depende tanto de la porosidad como del tamaño y la conexión de los poros. La permeabilidad se mide comparada mediante la conductividad hidráulica, que refleja la facilidad con la que el agua puede atravesar el medio (Camargo-Calderón, 2015).

Acuífero

Un acuífero es una formación geológica que contiene agua subterránea en sus poros y fracturas, y que puede transmitir cantidades significativas de agua que pueden ser extraídas para distintos usos.

Los acuíferos pueden estar compuestos por materiales como arenas, gravas, rocas fracturadas o formaciones carbonatadas, y su caracterización hidrogeológica se basa en sus propiedades hidráulicas y geomorfológicas, como la porosidad y permeabilidad, que determinan la cantidad y movimiento del agua almacenada. La dinámica de un acuífero depende de factores naturales y antrópicos, influyendo en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico subterráneo. (Oliván Pociello, 2013).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se aborda la caracterización hidrogeológica del subsuelo del Distrito Municipal Zambrana Abajo, con el fin de entender la dinámica del agua subterránea en función de las unidades litológicas y estructurales previamente descritas. Se identifican las unidades hidrogeológicas activas, su capacidad de almacenamiento, la dirección del flujo subterráneo y la variabilidad estacional de los niveles freáticos.

Se incluyen datos de campo como mediciones piezométricas, mapas hidrogeológicos, y análisis de recarga y descarga de acuíferos. También se discuten las limitaciones técnicas derivadas de la escasa densidad de pozos instrumentados y la complejidad geológica del área. Este capítulo constituye la base para evaluar la viabilidad de captación de aguas subterráneas y para el diseño de estrategias de manejo sostenible.

3.2 Descripción de la Propuesta

Nuestra propuesta de investigación se enfocó en realizar una caracterización hidrogeológica completa del Distrito Municipal Zambrana Abajo. El propósito central fue establecer el comportamiento y la calidad de sus aguas subterráneas. Este trabajo se justificó por la necesidad urgente de generar información técnica confiable que permita comprender los parámetros fisicoquímicos más relevantes y la compleja relación entre la geología local y el recurso hídrico."

Para lograr este objetivo, el estudio combinó lo que es la recopilación de datos de campo (mediante muestreo y análisis de agua en puntos clave) con una revisión exhaustiva de antecedentes hidrogeológicos y geológicos. Con este enfoque se buscó establecer las características hidroquímicas principales, analizando su variación espacial y los factores geológicos específicos que influyen en ellas.

La información obtenida fue integrada en un diagnóstico claro que permite comprender la dinámica de los acuíferos locales, identificando limitaciones críticas en calidad y disponibilidad. Este diagnóstico no solo cumple un objetivo académico; se concibió como un aporte técnico-científico directo para las autoridades locales, instituciones reguladoras y organizaciones comunitarias. Con esto, buscamos fortalecer las capacidades de planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos en el distrito.

3.3 Alcance y límite

Alcance

El alcance de este estudio se delimitó estrictamente a la caracterización hidrogeológica del Distrito Municipal Zambrana Abajo, cubriendo su extensión territorial de 138.01 km² dentro de la provincia Sánchez Ramírez. Dicho estudio presenta la identificación de las unidades geológicas, la tipología y distribución de los acuíferos, así como las propiedades fisicoquímicas del agua subterránea, considerando los factores que influyen en la recarga y la calidad del recurso hídrico.

Límites

El estudio se circunscribe al Distrito Municipal Zambrana Abajo y, en consecuencia, los resultados no son extrapolables a otras regiones con condiciones geológicas diferentes. El análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua subterránea, así como de los factores que inciden en su recarga y calidad, se centra únicamente en seis comunidades: Tocoa, La Pinita, Arroyo Vuelta, Sabana Rey, Las Dos Palmas y El Limpio.

La disponibilidad de datos secundarios y el acceso limitado a ciertos puntos de muestreo restringen la amplitud del análisis hidroquímico. Asimismo, debido al tiempo y recursos asignados a la investigación, no se incluyen estudios de modelación numérica del flujo subterráneo ni evaluaciones hidrogeológicas a profundidad regional.

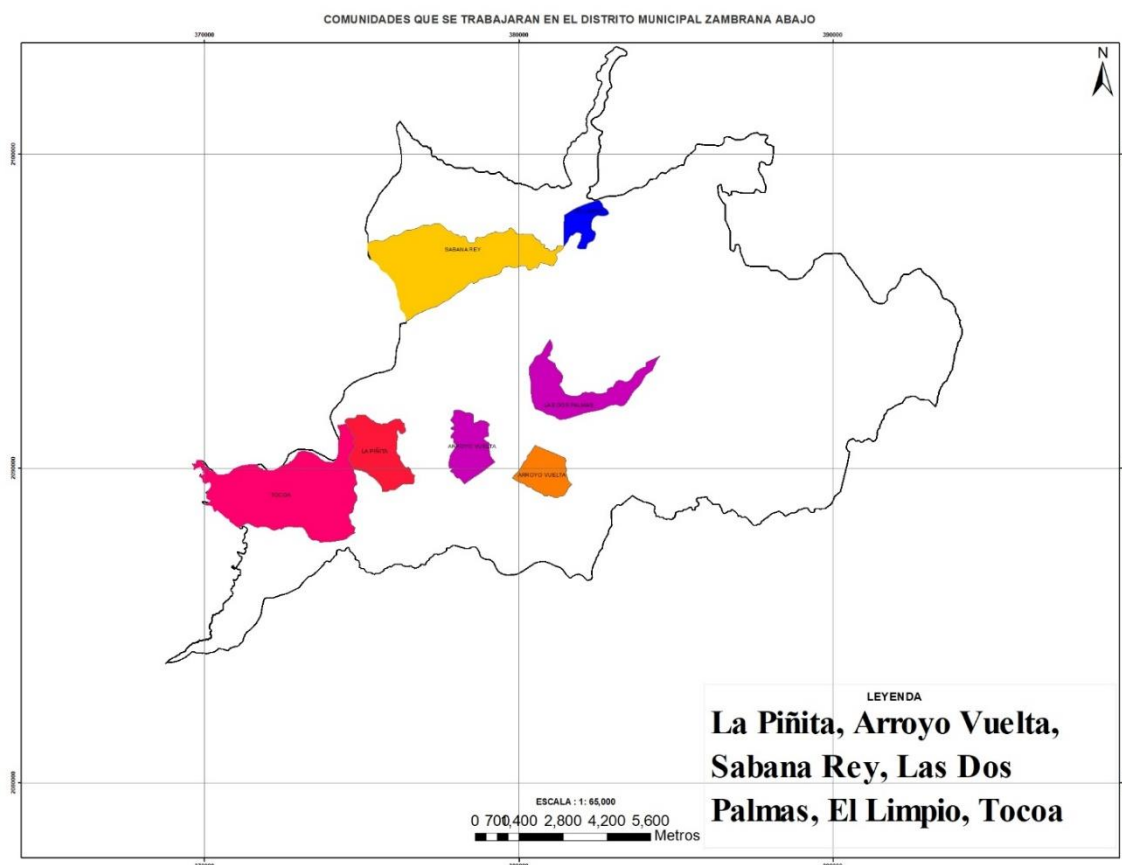


Figura 26: Mapa de las comunidades que se trabajaron en el distrito Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025

El desarrollo de este estudio se llevará a cabo en un período estimado de tres meses, comprendido entre el mes de julio 2025 y diciembre 2025, tiempo en el cual se realizarán las fases de levantamiento de información, toma de muestras, análisis de laboratorio, sistematización de datos y elaboración del informe final. Este cronograma ha sido definido de acuerdo con el calendario académico de la UTECO y con la fecha de aprobación de la propuesta de investigación

3.5 Plan de Acción

Con el propósito de desarrollar esta investigación se utilizaron técnicas tanto de recolección de datos de campo como de análisis documental, lo cual permitió obtener información precisa sobre las características hidrogeológicas del distrito municipal Zambrana Abajo.

Entre las técnicas de investigación aplicadas se encontraron:

- Observación directa: enfocada en reconocer lo que está presente en el afloramiento, formaciones geológicas superficiales, puntos de captación de agua y condiciones topográficas del área.

- Las mediciones de datos in situ: se utilizaron para medir parámetros como el nivel freático, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica.

- Las Revisiones de documentos: se consultaron de informes geológicos, mapas hidrogeológicos, tesis previas y bases de datos oficiales.

En cuanto a los instrumentos de investigación, se utilizaron:

- Fichas de campo: para registrar las características litológicas y geológicas observadas.

- Medidor de nivel freático (cuerda o wincha): para determinar la profundidad del agua en pozos.

- Botellas de muestreo estériles: para la recolección de muestras de agua subterránea.

- Equipos de laboratorio y hojas de análisis químico: para evaluar parámetros fisicoquímicos del agua, tales como pH, conductividad, entre otros.

- GPS y brújula geológica: para georreferenciar puntos clave del área de estudio.

Estas técnicas e instrumentos están alineados con el enfoque cuantitativo del estudio, permitiendo recopilar datos medibles y confiables que respaldarán el análisis hidrogeológico.

3.6 Cronograma de Implementación

El presente cronograma de implementación detalla las actividades planificadas para el desarrollo de la tesis titulada “Caracterización hidrogeológica del distrito municipal Zambrana Abajo”. Su finalidad es organizar y distribuir en el tiempo las distintas etapas de investigación, desde la revisión bibliográfica y el trabajo de campo, hasta los análisis de laboratorio, interpretación de resultados y la elaboración final del informe.

La planificación contempla un período de 11 semanas, en el cual se busca garantizar un avance progresivo y ordenado, optimizando recursos y tiempo para el logro de los objetivos planteados.

3.7 Presupuesto

PRESUPUESTO ESTIMADO PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE TESIS					
#	PARTIDAS	ITEM	CANTIDAD	COSTOS UNITARIO RD\$	TOTAL RD\$
1	Trabajo de campo				
1.1	Transporte para trabajo de campo	Viajes	12	\$ 5,000.00	\$ 60,000.00
1.2	Alimentacion	Comidas y Estancias	12	\$ 3,000.00	\$ 36,000.00
1.3	Asistente de campo o guia	Obreros	8	\$ 2,000.00	\$ 16,000.00
1.4	Equipos para trabajo de campo	GPS	1	\$ 33,500.00	\$ 33,500.00
		Brújula	1	\$ 38,000.00	\$ 38,000.00
		Cinta Metrica	1	\$ 700.00	\$ 700.00
		Conductimetro	1	\$ 6,000.00	\$ 6,000.00
		Libretas de apuntes	3	\$ 200.00	\$ 600.00
2	Muestreo y análisis físico-químico	Pozos	12		
		PH	12	\$ 200.00	\$ 2,400.00
		Conductividad Electrica	12	\$ 2,050.00	\$ 24,600.00
		TDS(Solidos Disueltos Totales	12	\$ 2,050.00	\$ 24,600.00
		Microbiológico	1	\$ 2,050.00	\$ 2,050.00
		Oxigeno	12	\$ 350.00	\$ 4,200.00
3	Muestreo de rocas	Colectar rocas	12	\$ 5,000.00	\$ 60,000.00
4	Software	QGIS, ArcGIS	2	\$ 50,000.00	\$ 100,000.00
5	Imágenes satelitales/cartografia	Sentinel/Landsat	2	\$ 10,000.00	\$ 20,000.00
6	Computadora/estación de trabajo	Equipo	2	\$ 50,000.00	\$ 100,000.00
7	Trabajo de redaccion y arreglos	Paquete	1	\$ 40,000.00	\$ 40,000.00
8	Impresión + encuadernado	Paquete	5	\$ 10,000.00	\$ 50,000.00
9	Material presentación y gastos defensa	Paquete	1	\$ 15,000.00	\$ 15,000.00
				TOTAL GENERAL RD\$	\$ 633,650.00

3.8 Análisis de factibilidad

La factibilidad del presente estudio se fundamenta en la correcta planificación y ejecución de todas las fases de la investigación.

Primero, la recopilación de información secundaria fue viable gracias a la revisión exhaustiva de cartografía geológica, hidrogeológica e hidrológica, complementada con estudios previos nacionales e internacionales. Esta base teórica fue clave, ya que permitió definir el contexto geológico e hidrogeológico del Distrito Municipal Zambrana Abajo y entender la potencial circulación y almacenamiento del agua subterránea.

En la fase de campo, se logró efectuar un inventario detallado de pozos. Esto proporcionó información esencial sobre su ubicación, construcción, niveles piezométricos y explotación. Durante los trabajos de campo, se analizó los parámetros in situ (pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y niveles freáticos), estableciendo una línea base técnica indispensable.

Además, se realizó los muestreos de agua que fueron analizados en laboratorios certificados, cumpliendo con las normativas (MIMARENA, 2012; OMS, 2017). Los resultados de laboratorio ayudaron a identificar las tendencias en la calidad y la influencia de factores tanto antrópicos (agricultura, residuos) como naturales (litología carbonatada).

Desde el punto de vista económico y logístico, la investigación fue viable gracias a la gestión eficiente de los recursos, optimizando los costos de transporte, insumos y análisis de laboratorio. Las limitaciones presupuestarias se manejaron priorizando los puntos de mayor relevancia.

Finalmente, la factibilidad se vio reforzada por el apoyo institucional y comunitario, que fue vital para acceder a los puntos de agua. En resumen, el estudio fue factible en todos los términos (técnicos, logísticos, económicos e institucionales), garantizando la obtención de datos precisos y confiables.

De esta forma, aseguramos que el conocimiento trascienda la esfera académica y se aplique en la práctica para la gestión sostenible del agua subterránea. En resumen, la sostenibilidad radica en que no solo caracterizamos el recurso, sino que establecimos las bases técnicas y sociales para su gestión responsable y conservación a largo plazo.

3.9 Sostenibilidad

La sostenibilidad ambiental se fundamenta en la información generada. La caracterización permitió identificar con precisión los principales acuíferos, la litología y la dinámica de flujo subterráneo. Esta línea base es esencial para implementar medidas concretas de protección de zonas de recarga, prevenir la contaminación difusa y regular el uso del agua. Además, los análisis de calidad evidencian la necesidad de establecer sistemas de control periódico ante el crecimiento poblacional y la actividad agrícola.

A nivel social, el estudio logró un aporte significativo al involucrar activamente a la comunidad en el levantamiento de información. Al permitir el acceso a pozos, los habitantes pudieron comprender directamente la importancia de conservar sus recursos. Este vínculo con la comunidad es clave, pues el uso responsable y la sostenibilidad futura dependen directamente de la participación y conciencia de los usuarios locales.

En el plano institucional, los resultados son un insumo valioso para organismos reguladores como INDRHI, el Ministerio de Medio Ambiente y las autoridades municipales. La información obtenida puede ser utilizada como línea base inmediata para planes de ordenamiento territorial, gestión del recurso y proyectos de abastecimiento.

De esta forma, se asegura que el conocimiento trascienda la esfera académica y se aplique en la práctica para la gestión sostenible del agua subterránea. En resumen, la sostenibilidad radica en que no solo se caracterizó el recurso, sino que se estableció las bases técnicas y sociales para su gestión responsable y conservación a largo plazo.

3.10 Monitoreo y seguimiento

Este proyecto permitió establecer un sistema inicial de referencia para el monitoreo y seguimiento de las aguas subterráneas en el Distrito Municipal Zambrana Abajo. Durante el trabajo de campo se efectuaron mediciones piezométricas en los pozos de inventarios, identificando niveles freáticos y direcciones de flujo que pueden ser comparados en futuras campañas para detectar variaciones en la disponibilidad del recurso.

Asimismo, los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua generaron una línea base de calidad del agua subterránea. Esta información permitirá evaluar en el futuro los cambios asociados tanto a factores naturales (procesos de disolución de rocas carbonatadas, variaciones en la recarga por cambios climáticos) como a factores antrópicos (agricultura intensiva, vertederos, disposición inadecuada de aguas residuales).

El inventario de pozos y manantiales, acompañado de su georreferenciación y caracterización litológica, constituye un insumo fundamental para desarrollar un sistema local de información hidrogeológica. Este sistema puede ser actualizado periódicamente por instituciones y técnicos, convirtiéndose en una herramienta de seguimiento dinámico del recurso hídrico.

Se recomienda establecer un programa de monitoreo continuo, con actividades como:

- Medición semestral de niveles freáticos en pozos seleccionados.
- Evaluación anual de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en puntos estratégicos.
- Registro comunitario de caudales en manantiales y fuentes tradicionales de abastecimiento.
- Capacitación a técnicos locales para la toma y análisis de datos básicos.

De esta manera, lo realizado en la presente investigación no solo permitió caracterizar la hidrogeología del Distrito Municipal Zambrana Abajo, sino que además sentó las bases para un sistema de monitoreo y gestión sostenible, asegurando que la información generada sea utilizada como referencia en el tiempo y apoye la toma de decisiones sobre el recurso hídrico.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante la evaluación hidrogeológica realizada entre los meses de agosto y septiembre de 2025 en el Distrito Municipal Zambrana Abajo, provincia Sánchez Ramírez. El estudio tuvo como propósito caracterizar la calidad de las aguas subterráneas en diferentes sectores de la zona, incluyendo El Limpio, Zambrana Abajo, Jobo Claro, Jurungo, Sabana del Rey, Arroyo Vuelta, La Piñita, Tocoa y Dos Palmas.

Los parámetros evaluados fueron el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE), los sólidos disueltos totales (TDS), el oxígeno disuelto (OD) y el nivel freático, con el fin de establecer relaciones entre las características hidrogeoquímicas y las condiciones geológicas locales.

Desarrollo de los Objetivos Específicos

Objetivo 1. Caracterizar la litología, estructura geológica, porosidad y permeabilidad de la zona de estudio para determinar las condiciones geológicas que influyen en la circulación y almacenamiento de aguas subterráneas

El área de estudio está conformada principalmente por las Formaciones Hatillo y Maimón, que presentan diferencias significativas en composición, estructura y propiedades hidrogeológicas.

La Formación Hatillo está compuesta por calizas, margas y lutitas, con una estructura fracturada que favorece la alta permeabilidad y porosidad secundaria, permitiendo la circulación libre del agua subterránea.

En contraste, la Formación Maimón, constituida por tobas, basaltos y brechas volcánicas, presenta una baja permeabilidad debido a la compactación y escaso desarrollo de fracturas, lo cual limita el flujo del agua.

Estas diferencias litológicas y estructurales influyen directamente en la capacidad de almacenamiento y recarga de los acuíferos presentes en la zona.

Objetivo 2. Identificar y describir los acuíferos presentes en la zona, determinando su tipo

En base a los datos de campo y los registros hidrogeológicos, se identificaron acuíferos de tipo libre y semiconfinado.

Los acuíferos libres se desarrollan principalmente en los sectores asociados a la Formación Hatillo, donde la roca caliza fracturada permite la infiltración directa del agua.

Los acuíferos semiconfinados se asocian a sectores cubiertos por materiales volcánicos y arcillosos de la Formación Maimón, que actúan como capas de baja permeabilidad.

En general, la dirección del flujo subterráneo se orienta desde el noroeste hacia el sureste, coincidiendo con la pendiente natural del terreno y el drenaje superficial hacia el río Yuna.

Objetivo 3. Determinar la dinámica del agua subterránea en la zona, incluyendo niveles freáticos, direcciones de flujo y balance hídrico, para comprender los procesos de recarga, descarga y sostenibilidad del recurso

Las mediciones de niveles freáticos en los 11 pozos indican variaciones significativas según el tipo de terreno.

En los sectores de Tocoa, La Piñita y Sabana del Rey, los niveles son someros (superficiales), lo que sugiere zonas de recarga activa.

En cambio, en El Limpio, Zambrana y Jobo Claro, los niveles son más profundos, reflejando zonas de descarga o menor recarga.

La dirección general del flujo subterráneo sigue el gradiente topográfico hacia el sureste, lo que confirma la conexión hidráulica entre las áreas altas y bajas de la zona.

El balance hídrico preliminar sugiere que la recarga proviene principalmente de la infiltración pluvial, mientras que las pérdidas ocurren por descarga hacia cursos superficiales y evaporación en zonas bajas.

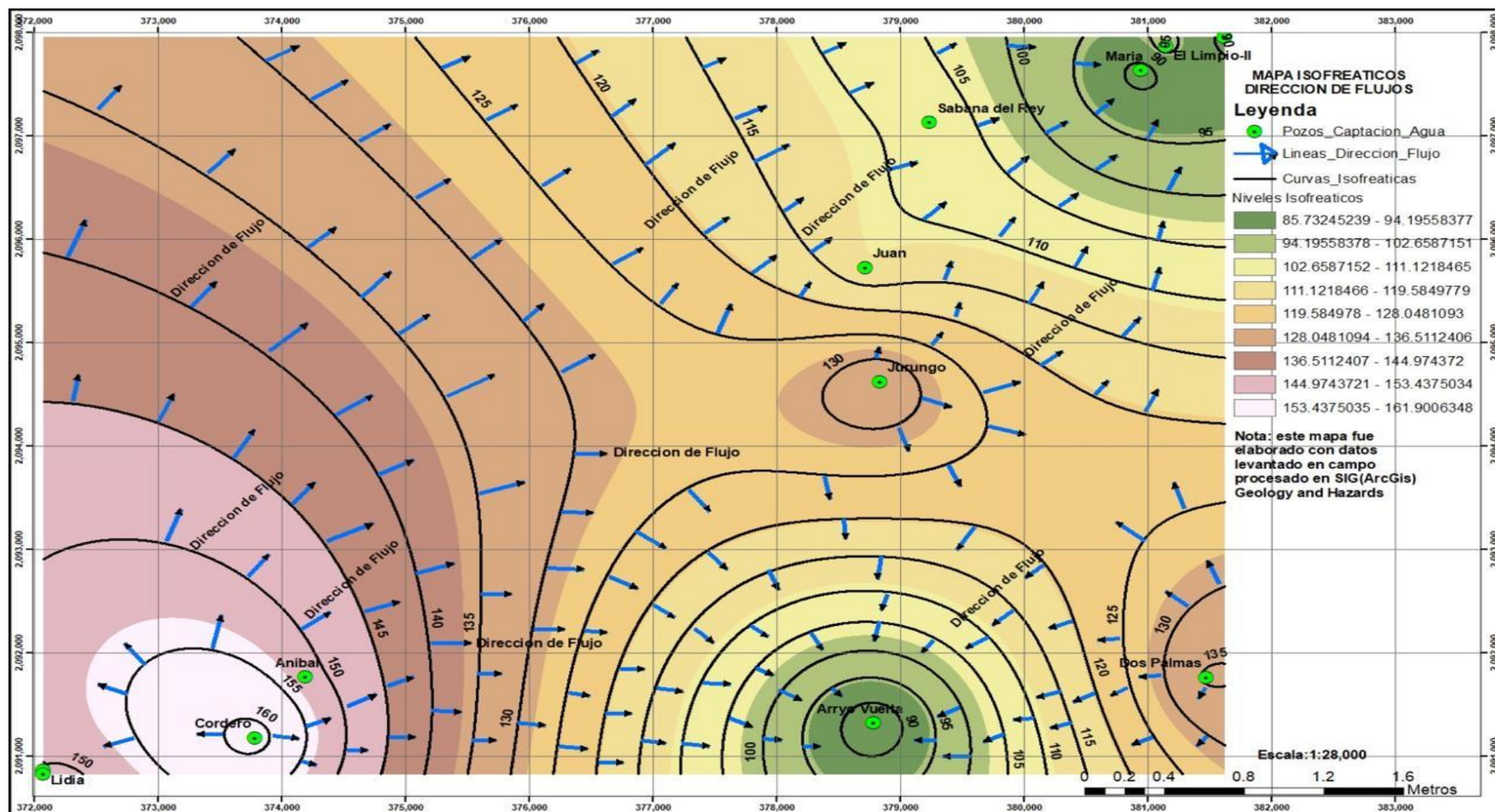


Figura 28: Mapa de curvas isofreáticas y dirección del flujo de agua subterránea en el distrito Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza, 2025

Objetivo 4. Determinar la calidad del agua subterránea mediante parámetros físicoquímicos

Se analizaron parámetros como pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (TDS) y oxígeno disuelto (OD).

Los resultados muestran diferencias notables entre sectores:

En el noreste (Tocoa, La Piñita, Dos Palmas), los valores son estables y dentro de los rangos normales para agua dulce.

En el sureste (El Limpio, Zambrana, Jobo Claro), se registraron valores más bajos de pH (6.2–6.6), CE y TDS, indicando una ligera acidez y menor mineralización.

Estas variaciones se atribuyen a la influencia de las rocas volcánicas de la Formación Maimón y a la profundidad del nivel freático, que limita el intercambio con la atmósfera y reduce la oxigenación.

En general, las aguas son aptas para uso doméstico y agrícola, aunque se recomienda mantener un programa de monitoreo continuo.

TABLA DE COLECCIÓN DE DATOS DE POZOS EN CAMPO Y PARAMETROS VERIFICACIONN DE CALIDAD DE AGUA SUBTERRANEA(POZOS TUBULARE O MINI ACUEDUCTOS COMUNITARIOS)																
Num	Pozos	Coord X	Coord Y	Comunidad	Profundidad Pozo/metros	N.e (m.b.n.s.)	N.d (m.b.n.s.)	Q (1/s)	Elev m.s.n.m.	Elev N.e (m.s.n.m.)	PH 6.5/8.5	Conductividad ≤ 1000µS/cm	TDS ≤ 1000Mg/L	Temperatura 35 C°	OD(Oxigeno Disuelto) ≤ 4Mg/L	Fecha/Análisis
1	Morena	372,072.00	2,090,867.00	Tocoa	22.56	14.36	13.20		164.00	149.64	7.13	275.00	119.80	27.10	5.95	7/8/2025
2	Lidia	372,070.00	2,090,826.00	Tocoa	22.40	14.26	13.05		160.00	145.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7/8/2025
3	Cordero	373,786.00	2,091,179.00	La Piñita	22.19	15.09	18.62		177.00	161.91	6.72	330.00	145.80	26.20	5.54	7/8/2025
4	Anibal	374,191.00	2,091,769.00	La Piñita	60.96	29.32	32.16		181.00	151.68	6.9	635.00	276.00	30.60	4.19	7/8/2025
5	Maria	380,949.00	2,097,638.00	El Limpio	30.48	20.97	22.34		109.00	88.03	6.77	589.00	258.00	27.10	4.92	7/8/2025
6	Juan	378,721.00	2,095,732.00	Jobo Claro	25.39	8.69	16.31		120.00	111.31	7.53	398.00	168.40	28.90	7.00	7/8/2025
7	Jurungo	378,838.00	2,094,628.00	Jurungo	30.69	10.49	19.69		145.00	134.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7/8/2025
8	Arroyo Vuelta	378,785.00	2,091,323.00	Arroyo Vuelta	36.58	18.29	0.00		104.00	85.71	8.19	196.70	86.70	26.90	6.32	5/9/2025
9	Dos Palmas	381,480.00	2,091,766.00	Dos Palmas	18.29	8.20	0.00		144.00	135.80	7.41	178.20	80.90	26.10	6.57	5/9/2025
10	Sabana del Rey	379,237.00	2,097,136.00	Sabana del Rey	18.29	7.32	0.00		116.00	108.68	7.59	170.00	75.80	26.70	7.96	5/9/2025
11	El Limpio	381,149.00	2,097,874.00	El Limpio	19.81	9.14	0.00		106.00	96.86	6	144.00	63.20	28.00	4.48	5/9/2025
12	El Limpio	381,626.00	2,097,957.00	El Limpio	19.81	10.36	0.00		99.00	88.64	5.59	105.10	44.70	29.40	5.24	5/9/2025

Tabla 4: Resultados de los parametros realizados

Objetivo 5. Analizar la percepción comunitaria sobre la disponibilidad y acceso al agua, con el fin de identificar los sectores con mayor vulnerabilidad hídrica y apoyar la localización de pozos óptimos

Como parte del enfoque cualitativo del estudio, se aplicaron cuestionarios estructurados a residentes de diversas comunidades del Distrito Municipal Zambrana Abajo, con el fin de conocer la percepción local sobre la disponibilidad, accesibilidad y calidad del agua. El cuestionario fue aplicado a 15 residentes seleccionados en distintos sectores del distrito, lo que permitió obtener una visión diversa y representativa de la situación hídrica local. Los participantes fueron elegidos considerando su experiencia directa en el uso diario del agua y la disponibilidad de pozos en sus comunidades.

Los resultados muestran que las comunidades con mayor vulnerabilidad hídrica corresponden a sectores donde el acceso al agua es limitado y los pozos existentes resultan insuficientes para la demanda actual. En Arroyo Vuelta, por ejemplo, solo se identificaron dos pozos funcionales, lo que obliga a las familias a compartir puntos de extracción y depender en ocasiones de camiones cisterna. En Las Dos Palmas, los habitantes reportaron que antes utilizaban un tinaco elevado alimentado por el río Maguaca; sin embargo, debido al deterioro de esta fuente superficial, el sistema quedó fuera de funcionamiento, incrementando la dependencia del agua subterránea.

En contraste, comunidades como Tocoa y La Piñita perciben una mejor disponibilidad del recurso, lo cual coincide con los resultados técnicos que identificaron niveles freáticos someros y zonas de recarga activa en estos sectores.

Esta coincidencia entre percepción comunitaria y condiciones hidrogeológicas respalda la validez del diagnóstico integral.

La percepción comunitaria también permitió identificar sectores donde la baja disponibilidad de pozos, la profundidad del nivel freático o la limitada capacidad de almacenamiento generan dificultades para cubrir las necesidades básicas de consumo, higiene y actividades domésticas. Esta información constituye un insumo clave para priorizar localidades donde la perforación de pozos resultaría más urgente y efectiva desde el punto de vista social y técnico.

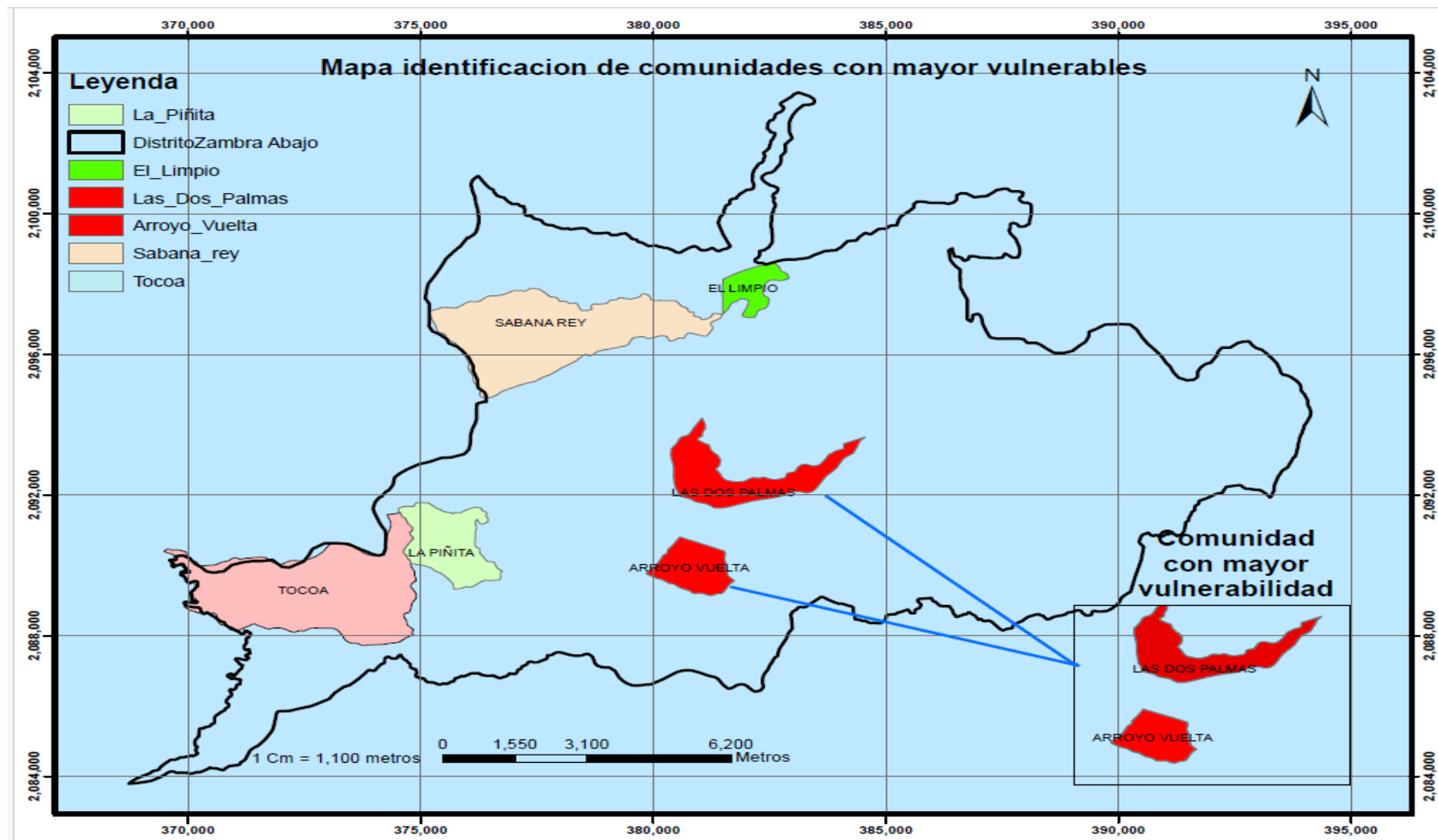


Figura 29: Mapa de curvas isofreáticas y dirección del flujo de agua subterránea en el distrito Zambrana Abajo. Fuente: Batista, De la Cruz, Baudilio, Mendoza 2025

4.2 Contexto Geológico e Hidrogeológico

El área de estudio se encuentra emplazada sobre unidades geológicas correspondientes principalmente a la Formación Hatillo y la Formación Maimón, ambas de gran relevancia en la geología del Cinturón Ferrífero de Bonao–Maimón.

Formación Hatillo: compuesta mayormente por calizas, margas, lutitas y rocas sedimentarias asociadas a ambientes marinos poco profundos. Esta formación se asocia a materiales porosos y permeables que favorecen la infiltración del agua de lluvia, aunque con una tendencia a presentar aguas con pH ligeramente ácido debido a la disolución parcial de minerales carbonatados y la presencia de materia orgánica.

Formación Maimón: está conformada por rocas volcánicas (andesitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas) de baja permeabilidad y escasa porosidad. Esto influye en la baja mineralización del agua subterránea, ya que el contacto con minerales solubles es limitado. Los acuíferos en estas zonas suelen presentar valores de CE y TDS bajos, reflejando aguas de escasa interacción con el medio rocoso.

El recorrido de campo abarcó desde la presa de Hatillo hasta la zona de Maimón, permitiendo observar cambios litológicos, estructurales e hidrogeológicos que influyen directamente en la calidad de las aguas subterráneas.

4.3 Resultados Físicoquímicos

Los valores medidos de los parámetros físicoquímicos presentan una tendencia clara a diferenciarse entre el noreste (La Piñita, Tocoa,) y el sureste (El Limpio, Sabana del Rey, Jobo Claro, Arroyo Vuelta, Dos Palmas). El potencial de hidrógeno (pH):

En los sectores de El Limpio y La Piñita, los valores oscilaron entre 5.58 y 6.90, lo cual indica aguas ligeramente ácidas. En contraste, las zonas de Tocoa, Dos Palmas, Arroyo Vuelta, Sabana del Rey, Jobo Claro, registraron valores entre 7.13, y 8.19, considerados dentro del rango neutro y óptimo para aguas subterráneas naturales.

Conductividad Eléctrica (CE): En El Limpio, Sabana del Rey, Dos Palmas y Arroyo Vuelta, los valores fueron bajos (105.1–196.6 $\mu\text{S/cm}$), mientras que en las demás zonas se midieron valores entre 275 y 635 $\mu\text{S/cm}$, lo que sugiere una menor mineralización en el sector sureste del área de estudio.

Sólidos Disueltos Totales (TDS): Presentaron una relación directa con la CE, manteniéndose entre 44.1 y 86.7 mg/L en El Limpio, Sabana del Rey, Dos Palmas y Arroyo Vuelta, valores de 119.8 a 276 mg/L en las demás zonas, lo cual indica que las primeras presentan aguas más “jóvenes” o de menor interacción con el medio rocoso.

Oxígeno Disuelto (OD): Los valores fueron similares entre las zonas, oscilando entre 4.19 y 7.96 mg/L, lo que refleja condiciones de buena aireación y bajo contenido orgánico. (Ver anexos 4)

Análisis del Nivel Freático

Los resultados obtenidos muestran variaciones significativas en la profundidad del nivel freático entre los diferentes sectores del Distrito municipal Zambrana Abajo. En las zonas de El Limpio, Zambrana y Jobo Claro, el nivel freático se presenta más profundo, lo que refleja una menor recarga natural y materiales de baja permeabilidad, asociados a la Formación Maimón, compuesta por rocas volcánicas compactas.

En contraste, en Tocoa, La Piñita, Dos Palmas, Sabana del Rey y Arroyo Vuelta, el nivel freático es más superficial, indicando una mayor recarga por infiltración pluvial y una porosidad más alta, vinculada a las rocas calcáreas y sedimentarias de la Formación Hatillo.

Estos resultados reflejan que las aguas subterráneas del sector sureste (El Limpio,) tienen menor mineralización y pH más bajo, probablemente debido a que los acuíferos se desarrollan sobre rocas volcánicas y sedimentarias de baja solubilidad, con recarga directa por lluvia.

Estas diferencias confirman la influencia directa de la litología, la topografía y las condiciones hidrogeológicas locales en el comportamiento del acuífero de Zambrana Abajo.

4.4 Interpretación Ambiental

Desde el punto de vista ambiental, los valores más bajos en CE, TDS y pH en El Limpio, Sabana del Rey, Dos Palmas y Arroyo Vuelta podrían estar relacionados con la influencia combinada de factores naturales y antrópicos.

En primer lugar, el ambiente geológico de baja permeabilidad y la presencia de materiales volcánicos limitan el intercambio iónico del agua con las rocas, lo que explica su baja mineralización.

En segundo lugar, el área de El Limpio, Zambrana Abajo y Zambrana Arriba se encuentran cercana a zonas de actividad minera, lo que puede influir en la acidez ligera

del agua por infiltraciones de aguas residuales con contenido metálico o la oxidación de sulfuros minerales.

Por otro lado, la recarga directa por lluvias frecuentes y la vegetación densa en El Limpio favorecen la entrada de agua con baja carga iónica y menor contenido de carbonatos, reforzando el carácter levemente ácido.

4.5 Discusión General

Los resultados obtenidos coinciden con estudios previos realizados por Lizárraga Mendiola (2003) y Hernández (2020), quienes documentaron valores bajos de conductividad y pH en acuíferos desarrollados sobre formaciones volcánicas y sedimentarias poco permeables.

De manera general, las aguas subterráneas del Distrito Municipal Zambrana Abajo son de buena calidad, aptas para uso doméstico y agrícola, aunque con una ligera tendencia a la acidez en ciertos sectores. Esto resalta la necesidad de monitorear periódicamente las variaciones en pH y conductividad, especialmente en áreas donde existen actividades mineras o de drenaje ácido potencial.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El estudio hidrogeológico realizado en el Distrito Municipal Zambrana Abajo, provincia Sánchez Ramírez, permitió caracterizar la calidad del agua subterránea y establecer su relación con las condiciones geológicas y ambientales de la zona. A partir de los resultados obtenidos durante las campañas de campo y los análisis fisicoquímicos realizados, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Condiciones geológicas: El área de estudio está dominada por las Formaciones Hatillo y Maimón, compuestas por rocas sedimentarias y volcánicas que influyen directamente en la composición química del agua subterránea. La baja permeabilidad y el tipo de litología de estas formaciones contribuyen a la escasa mineralización de las aguas en los sectores surestes.

Parámetros fisicoquímicos: Los valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (TDS) fueron más bajos en las zonas de El Limpio, Sabana del Rey, Dos Palmas y Arroyo Vuelta, donde el pH varió entre 5.58 y 6.90, la CE entre 105.1 y 196.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los TDS entre 44.1 y 86.7 mg/L. En contraste, las zonas de Tocoa, La Piñita y Jobo Claro mostraron valores mayores y dentro del rango neutro, reflejando un ambiente hidrogeoquímico más equilibrado.

Condiciones hidroquímicas: La ligera acidez observada en las aguas del sureste sugiere una recarga directa por lluvias y escasa interacción con los minerales del subsuelo, además de la posible influencia de la oxidación de sulfuros provenientes de actividades mineras en el entorno del Distrito Municipal Zambrana Abajo.

Aspecto ambiental: Aunque la calidad general del agua es aceptable para uso doméstico y agrícola, la presencia de valores ligeramente ácidos indica la necesidad de un control ambiental continuo, especialmente en zonas cercanas a operaciones mineras o donde existen flujos subterráneos potencialmente contaminados.

Valor científico y técnico: Los resultados obtenidos constituyen una base de información relevante para futuros estudios hidrogeológicos en la región, permitiendo la elaboración de modelos de flujo, monitoreo de calidad y gestión sostenible del recurso hídrico.

5.2 Recomendaciones

Monitoreo periódico: Implementar un programa de monitoreo trimestral que permita evaluar la evolución de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea, priorizando los sectores de El Limpio, Sabana del Rey, Dos Palmas y Arroyo Vuelta, donde se observaron valores más bajos.

Protección de zonas de recarga: Promover la reforestación y el manejo adecuado del uso del suelo en las áreas de recarga hídrica, con el fin de preservar la capacidad natural de filtración del acuífero y evitar la entrada de contaminantes.

Control ambiental en zonas mineras: Reforzar las medidas de control y vigilancia en torno a las operaciones mineras activas o pasivas, garantizando que los drenajes ácidos o lixiviaciones no afecten la calidad del agua subterránea.

Educación y sensibilización: Desarrollar programas de educación ambiental en las comunidades del Distrito Municipal Zambrana Abajo, orientados a la protección del recurso hídrico y el uso racional del agua.

Continuidad investigativa: Se recomienda la realización de estudios complementarios que incluyan análisis bacteriológicos y de metales pesados, así como la aplicación de modelos hidrogeológicos para determinar la dirección y velocidad del flujo subterráneo.

Referencias

- AQUAE. (20 de Septiembre de 2024). *Origen y formación del agua subterránea*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/como-se-forma-agua-subterranea/>
- Aquae., F. (21 de Septiembre de 2021). *Qué son las aguas subterráneas y cómo se forman*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/las-aguas-subterraneas/>
- Armadas. (2018). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Ecuador: Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 66-.
- Bernal. (2017). *Definición y características del agua*. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.
- Burgos, N. D. (2019). *Métodos y técnicas en la investigación cualitativa. Algunas precisiones necesarias*. Obtenido de Conrado vol.15 no.70 Cienfuegos sept.-oct. 2019 Epub 02-Dic-2019: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442019000500455
- Camargo-Calderón, D. (2015). *Evaluación de la permeabilidad horizontal en suelos granulares*. [Tesis de maestría, Universidad Católica]. Repositorio Institucional.
- Chapoñan Cayao, J. (2022). *Caracterización hidrogeoquímica de aguas subterráneas en el distrito de Jayanca*. Lambayeque, Perú: TESIS.
- Chapoñan Cayao, J. (2022). *Caracterización hidrogeoquímica de aguas subterráneas en el distrito de Jayanca*. Peru: TESIS.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (01 de Septiembre de 2020). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Obtenido de <https://es.geologyscience.com/geology-branches/hydrogeology/>
- Dominicana., C. N. (2010). *Ley No. 298-10 que crea el Distrito Municipal Zambrana Abajo*. Gaceta Oficial.
- Escobar, A. (2017). *Análisis hidrogeológico de aguas subterráneas en la región X*. Obtenido de Tesis de maestría, Universidad Autónoma: <https://repositorio.autonoma.edu/tesis>
- Francisco, J. e. (2016). *Determinación del comportamiento hidrogeológico en la periferia del espacio de disposición final de residuos sólidos en Cotuí*. Cotui: Trabajo de grado.

- García, R., & Pérez, M. (2022). *Fundamentos y avances en hidrogeología moderna*. Revista de Ciencias de la Tierra.
- González de Jiménez, M. (2015). *Caracterización geofísica e hidrogeológica preliminar del acuífero de Antón*. Panamá : Tesis.
- Grez Toloza, F. (2021). *Caracterización hidrogeológica de aguas subterráneas, análisis de vulnerabilidad y cartografía de riesgo del acuífero Biobío Medio*. Chile: TESIS.
- Iceebook. (2023). *¿Qué son las aguas subterráneas?* Obtenido de <https://iceebook.com/aguas-subterraneas-definicion-caracteristicas-formacion-tipos>
- Kennedy, A. (2007). *Structural evolution of Pueblo Viejo*. Internal Report. .
- Liriano, P. e. (2021). *Análisis de la calidad de las aguas subterráneas en el Municipio de Cotuí*. Cotui: Informe técnico.
- Martínez Estrada, A. (2023). *Caracterización hidrogeológica y determinación de áreas de recarga acuífera en la microcuenca del río Agua Caliente, Lago de Coatepeque*,. El Salvador: TESIS.
- Mejía, R. e. (2021). *Inventario actualizado de puntos de agua del municipio Cotuí y establecimiento de perímetros de protección*. Cotui: Proyecto de investigación.
- Mendizábal, G. &. (2010). El agua potable como derecho fundamental para la vida. *Revista de Derecho y Ciencias Sociales*, 3, 45-60.
- MEPyD. (28 de Abril de 2018). *Contexto actual del agua en la Republica Dominicana*. Obtenido de <https://mepyd.gob.do/wp-content/uploads/drive/Publicaciones/Contexto%20actual%20del%20agua%20en%20la%20Republica%20Dominicana.pdf?utm.com>
- MMARN. (2018). *Norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo*. Santo Domingo. Obtenido de <http://idard.org.do/wp-content/uploads/2018/11/Norma-Ambiental-sobre-Calidad-de-Aguas-Subterraneas-y-Descargas-al-Subsuelo.pdf>
- Molina, A. e. (2023). *Caracterización de recursos hídricos y modelo hidrogeológico de la microcuenca del río Colón, San Salvador*. El Salvador: Artículo.
- Montoya, S. (2025). *Conceptos básicos en hidrogeología [Material educativo]*. Obtenido de <https://saul-montoya->

2u8b.squarespace.com/s/Gidahatari_Curso_HeM_1c_Conceptos_Basicos_en_Hidrogeologia.pdf

- Nacional, S. G. (1984). *Hoja topográfica Cotuí (6173-II), escala 1:50,000*. Santo Domingo: SGN.
- Nacional, S. G. (2010). *MAPA GEOLÓGICO DE LA REPÚBLICA DOMINICANA ESCALA 1:50.000 FANTINO*. Obtenido de https://sgn.gob.do/images/docs/repo/memogeo50/MemoG_6173_III_Fantino.pdf
- Nacional., E. H. (2022). *Informe técnico del Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana*. Santo Domingo: Servicio Geológico Nacional.
- Nacional., S. G. (1988). *Actualización cartográfica y verificación de campo de la Hoja Cotuí (6173-II)*. Santo Domingo: SGN.
- Oliván Pociello, C. (2013). *Hidrogeología del acuífero kárstico de Sierra Gorda*. Obtenido de Tesis Doctoral, Universidad de Granada]. Repositorio Institucional.: <https://zaguan.unizar.es/record/12570/files/TESIS-2013-116.pdf>
- Parra Sáez, C. (2024). *Caracterización hidrogeológica del área de influencia del santuario de la naturaleza — desembocadura río Itata, Región de Ñuble*. Chile: Tesis.
- Peña, F. P., Matías Cobaisse Ibáñez, Sebastián Villagrán Pradena, & Ruben Alvarado. (6 de Noviembre de 2023). *Aspectos generales del uso de métodos mixtos para investigación en salud*. Obtenido de <https://www.medwave.cl/revisiones/metodinvestreport/2767.html>
- Pinos, J. A. (2020). Obtenido de Geología en la sociedad y territorio: <///C:/Users/Downloads/Dialnet-GeologiaEnLaSociedadYTerritorios-9657247.pdf>
- Rabi Misle, F. (2018). *Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de la cuenca del río Cauquenes, Región del Maule*. Chile: TESIS.
- República Dominicana, M. d. (2022). *Socialización Pacto Nacional del Agua 2021–2036 : el futuro del agua en República Dominicana : consultas territoriales enero - junio 2022*. Obtenido de <https://bvearmb.do/handle/123456789/1922>
- Reynoso, G. (Marzo de 2022). *Director Gabinete del Agua afirma: “Las aguas subterráneas son el petróleo de RD”*. Obtenido de https://mepyd.gob.do/director-gabinete-del-agua-afirma-las-aguas-subterraneas-son-el-petroleo-de-rd/?utm_source.com

- Ríos-Vásquez, M. C.-G.-C. (2023). *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas, Minas*. Lavalleja, Uruguay : Artículo.
- Rodríguez Morillo, F. &. (2006). *Hydrogeological potential of the Dominican Republic*. Republica Dominicana : INFORME.
- Rogers, A. D. (2021). *Hydrogeology: Principles and Practice*. *Journal of Hydrology*.
- Rosa, M. e. (2017). *Hidrogeología e hidrogeoquímica del Distrito Municipal de Boyá, Provincia Monte Plata*. Monte Plata: Informe.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación, 6ta edición*. Obtenido de <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Schleiger, M. H. (27 de Julio de 2024). *Abastecimiento de agua dulce y ciclo del agua*. Obtenido de Depositos de agua: [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_\(Ha_and_Schleiger\)/04%3A_Humans_and_the_Environment/4.02%3A_Water_Resources/4.2.01%3A_Fresh_Water_Supply_and_the_Water_Cycle](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_(Ha_and_Schleiger)/04%3A_Humans_and_the_Environment/4.02%3A_Water_Resources/4.2.01%3A_Fresh_Water_Supply_and_the_Water_Cycle)
- Somers, L. D., & Jeffrey M. McKenzie. (08 de Octubre de 2020). *Una revisión de las aguas subterráneas en entornos de alta montaña*. Obtenido de <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wat2.1475>
- Teixeira, L. e. (2021). *Caracterización estructural, hidrogeológica e hidroquímica de acuíferos de la Cuenca del Paraná*. Panama: Tesis.
- UNESCO. (2022). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: aguas subterráneas, hacer visible lo invisible*. París: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382894>
- USGS. (2020). *Groundwater Basics*. *United States Geological Survey*. Obtenido de <https://www.usgs.gov>
- USGS. (2023). *Flujo de agua subterránea* . Obtenido de <https://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>
- Water G. (2025). *que es el agua subterranea?*

Anexos

Anexos 1. Cuestionario aplicado a la comunidad

INVENTARIO DE POZOS PARA CAPTACION DE AGUA SUBTERRANEAS					
Provincia				Municipio	
Dist Mun				Seccion	
Paraje				Datum WGS-84	
Coordenadas	UTM/mE/mN	mE		mN	
DESCRIPCION DEL POZO					
Fecha en que se realizo el pozo			Dias	Mes	Año
Profundidad del pozo			Mts		
Si se ha secado algunas vez			SI		NO
Pruebas de capacidad /Gl			Cantidad Gl		
Intalacion de Bomba			SI		NO
Calidad del agua		Buena		Regular	
		Mala		Pesada	
Se corta con el jabon			SI		NO
Relacion del pozo con arroyos sercano			Nombre el arroyo		
Nivel de agua en relacion a superficie		Mts			
OBSERVACIONES DEL LUGAR EN RELACION A LAS ROCAS O SUELOS DONDE ESTA UBICADO EL POZO					
Dia		Mes		Año	

Anexos 2: Fotografías realizadas en zona de estudio

Foto 1: Administración del cuestionario. Fuente



Foto 2: Trabajo de campo durante la verificación de ubicación y levantamiento de información.



Foto 3: Ubicación de pozos de abastecimiento:

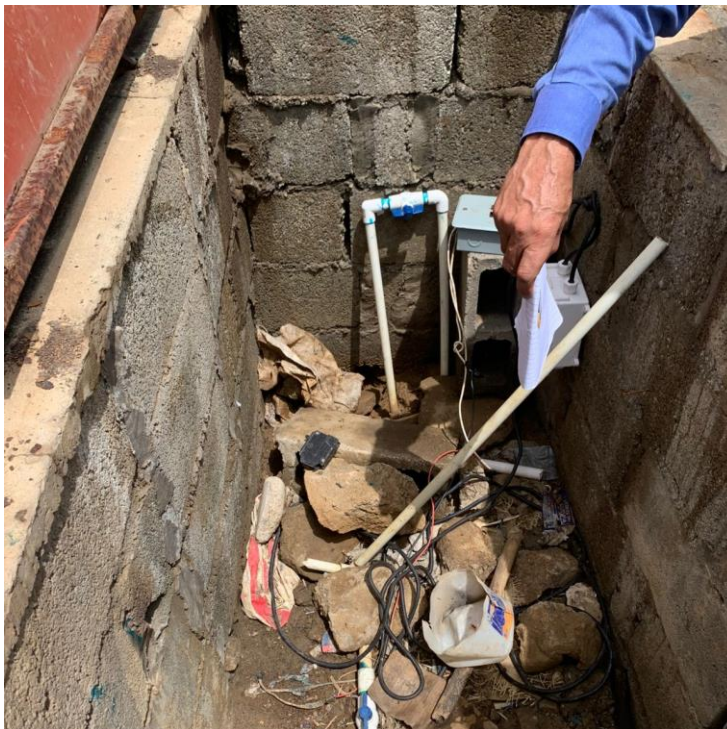


Foto 4: Ubicación de pozos de abastecimiento:



Foto 5: Ubicación de pozos de abastecimiento:



Foto 6: Ubicación de pozos de abastecimiento:



Foto 7: Batista, Baudilio y Mendoza junto al equipo de laboratorio para realizar medición de profundidad de pozo de abastecimiento



Foto 8: Equipo de medición del nivel de agua



Foto 9: Medición de la profundidad estática del pozo mediante cinta piezométrica.



Foto 10: Medición de la profundidad estática del pozo mediante cinta piezométrica.



Foto 11: Equipos utilizados para la medición de parámetros fisicoquímicos del agua.

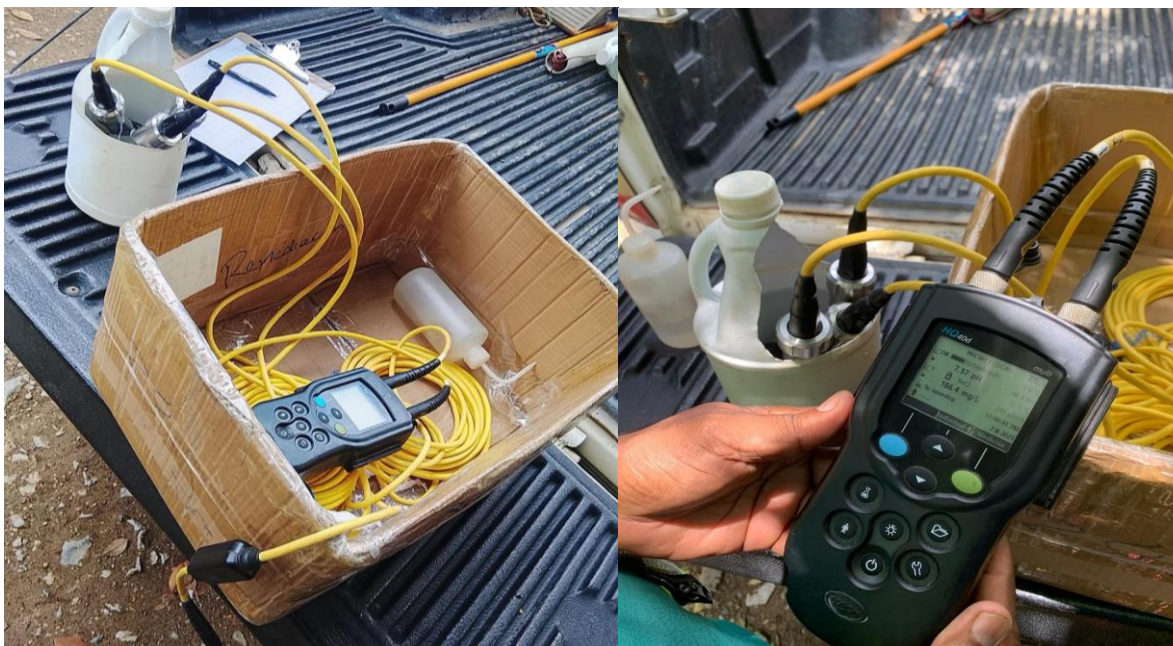


Foto 12: Preparación y calibración del equipo multiparámetro previo al muestreo



Foto 14: Realización de multiparámetro

Anexos 3: Fotografías en las formaciones y miembros de la zona de estudio

Foto 1: Formación los Ranchos y miembro Quita Sueño



Foto 2: Formación Hatillo



Foto 3: Contacto entre toba y basalto

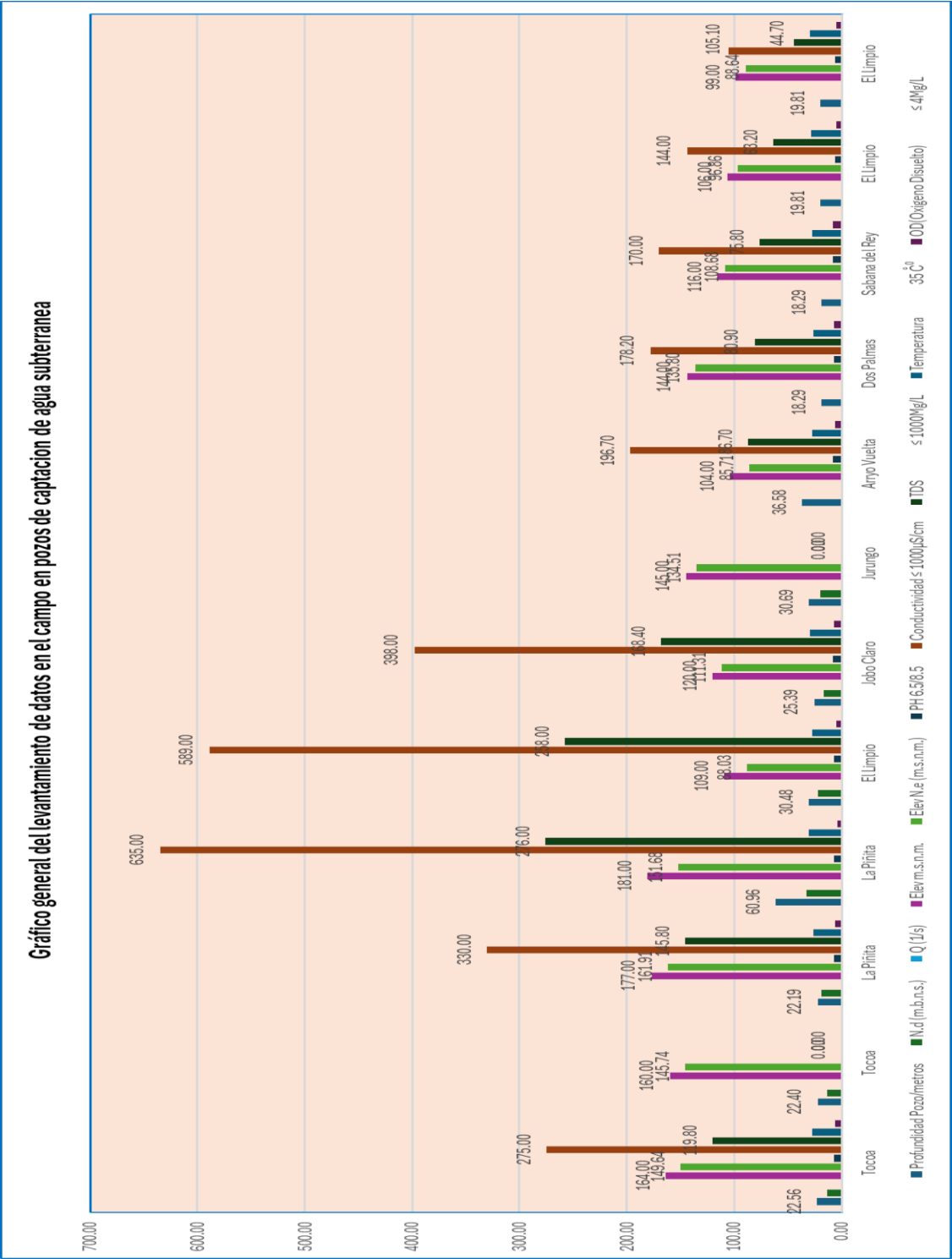


Foto 4: Miembro Quita Sueño de la formación Los Ranchos

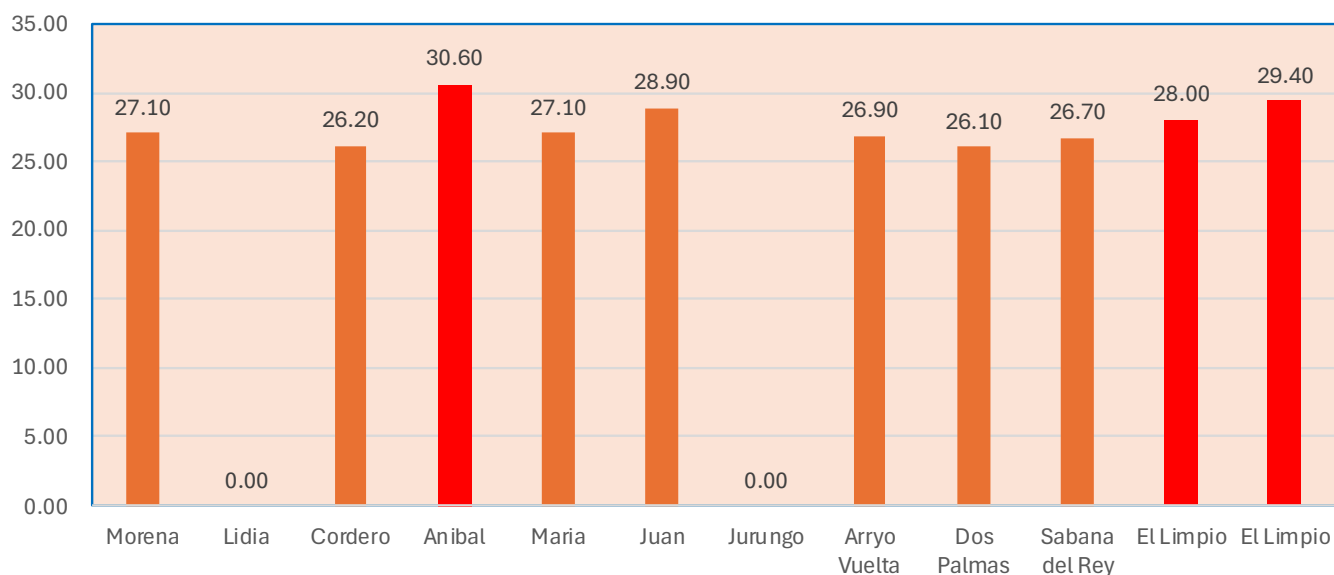


Anexos 4: Gráficos de resultados:

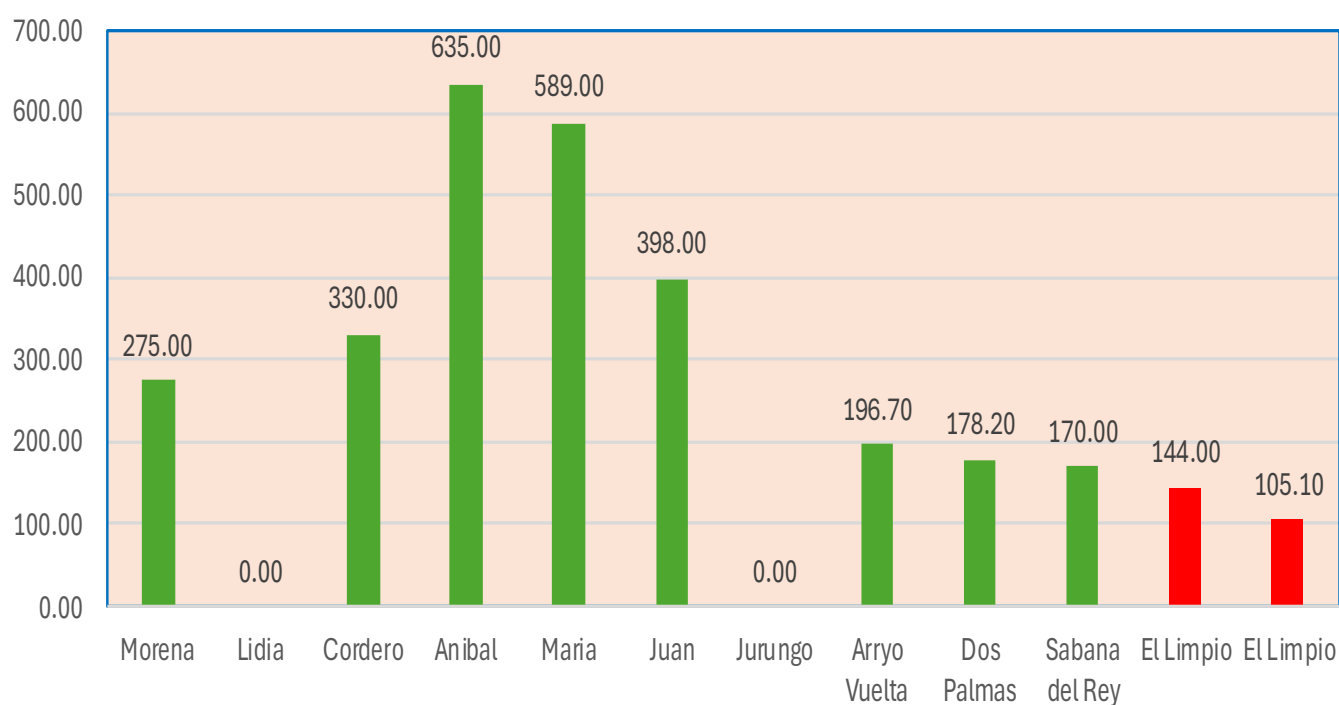
Gráfico 1: Tabla 4



Temperatura de las aguas en los pozos de captacion de las aguas subterranas medida en $^{\circ}\text{C}$



Conductividad Electricas de las aguas en los pozos de captacion de aguas suterraneas.



Anexos 5: Imagen de referencias

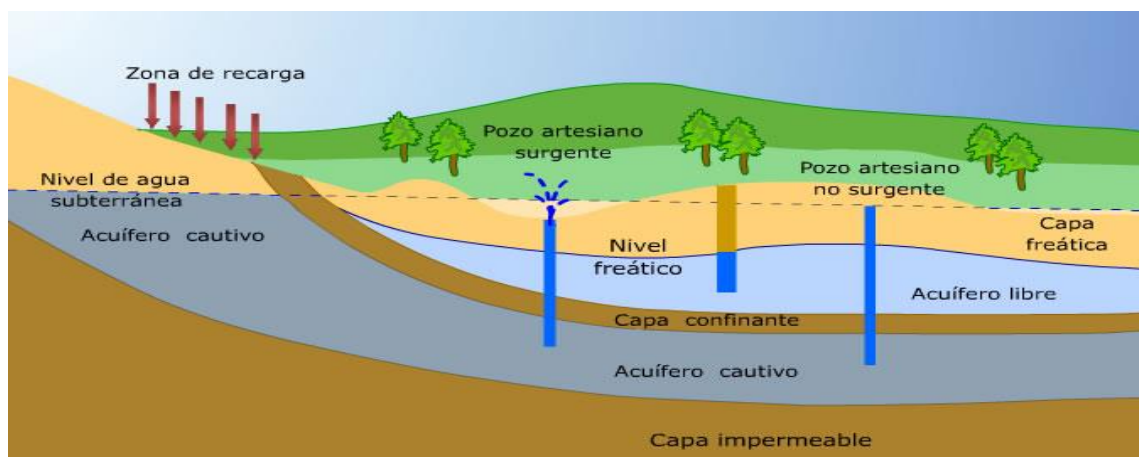


Imagen 1: Recarga de un acuífero



Imagen 2: Esquema del flujo de agua subterránea y nivel freático

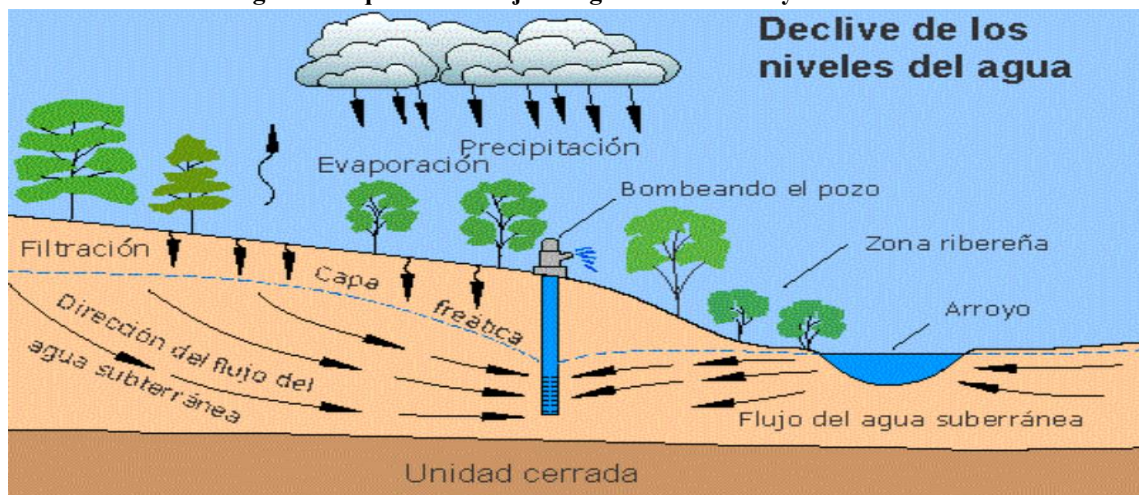
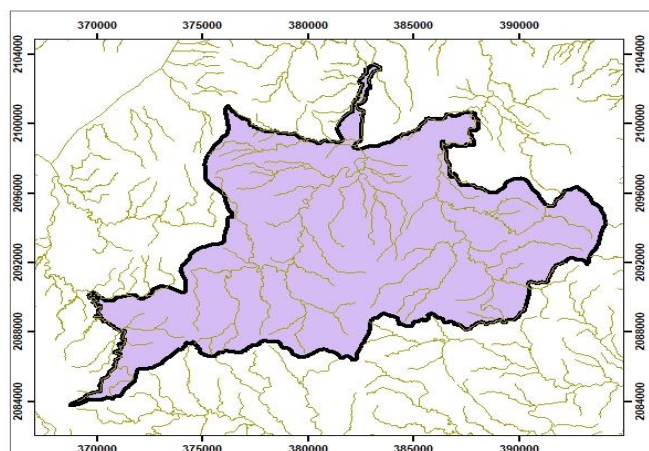
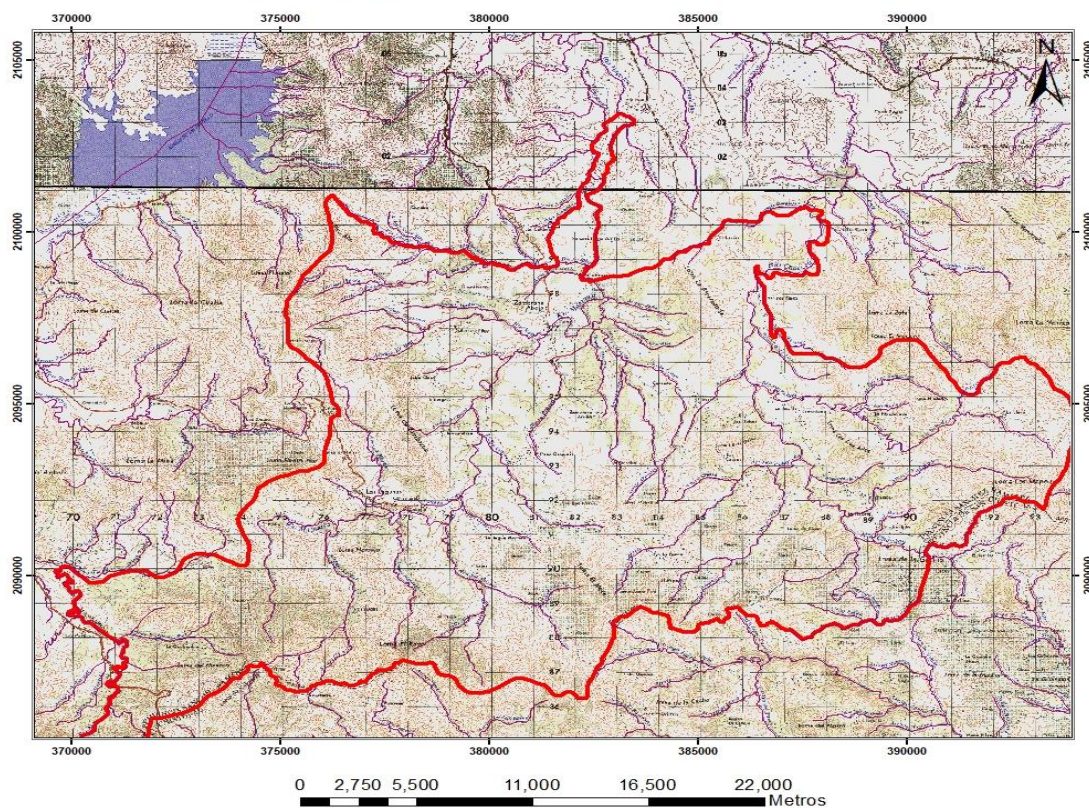


Imagen 3: Declive de los niveles del agua.

Anexos 6: Mapas realizados en el estudio:

MAPA TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO DISTRITO MUNICIPAL ZAMBRANA ABAJO

Mapa Topografico de la Zona de Estudio



Leyenda

TOPOGRAFIA

DM_Zambrana Abajo

Limites del area de estudio

HIDROGRAFIA

Rios_wgs84

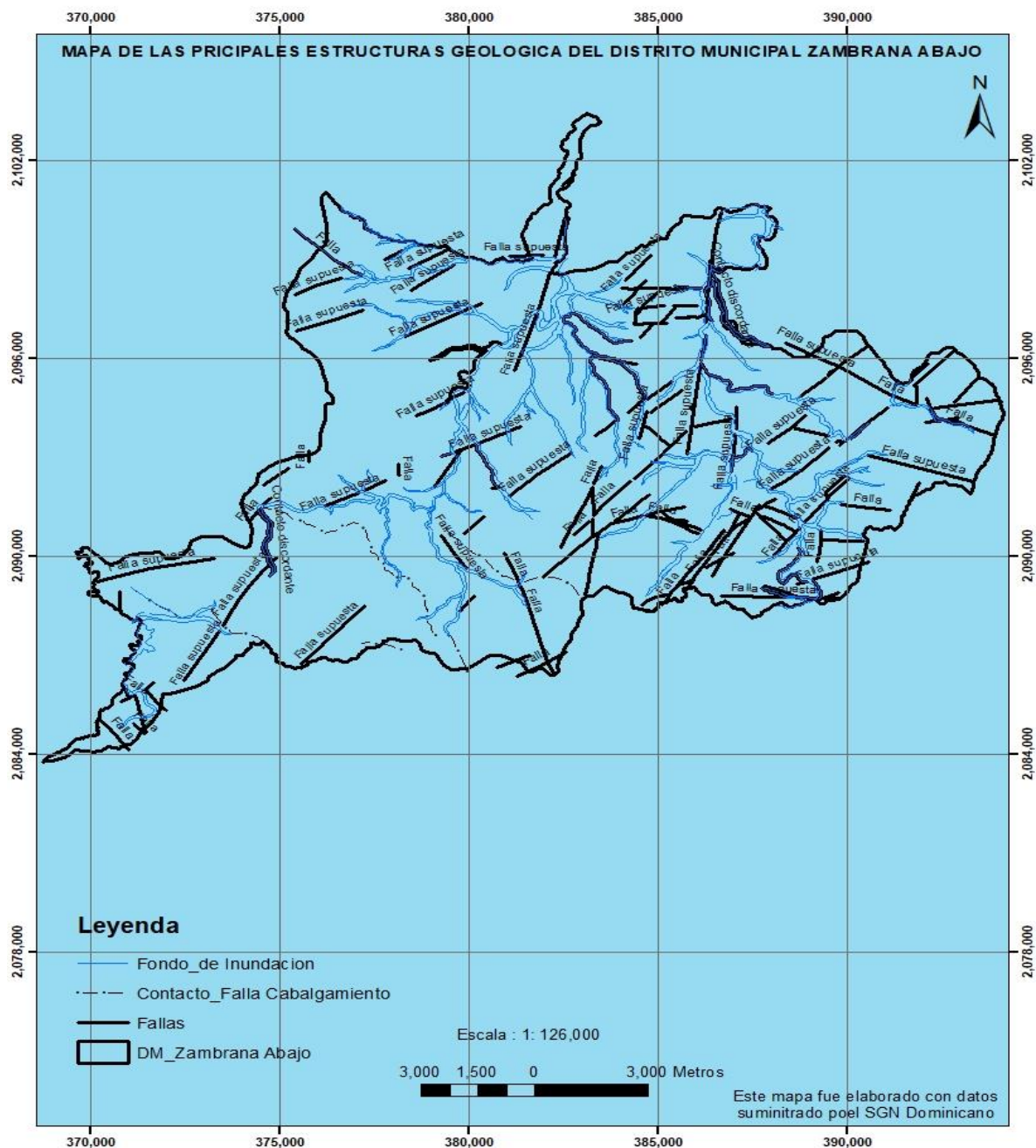
Mapa topografico y ubicacion del Distrito Municipal Zambrana Abajo

Datum UTM WGS 84

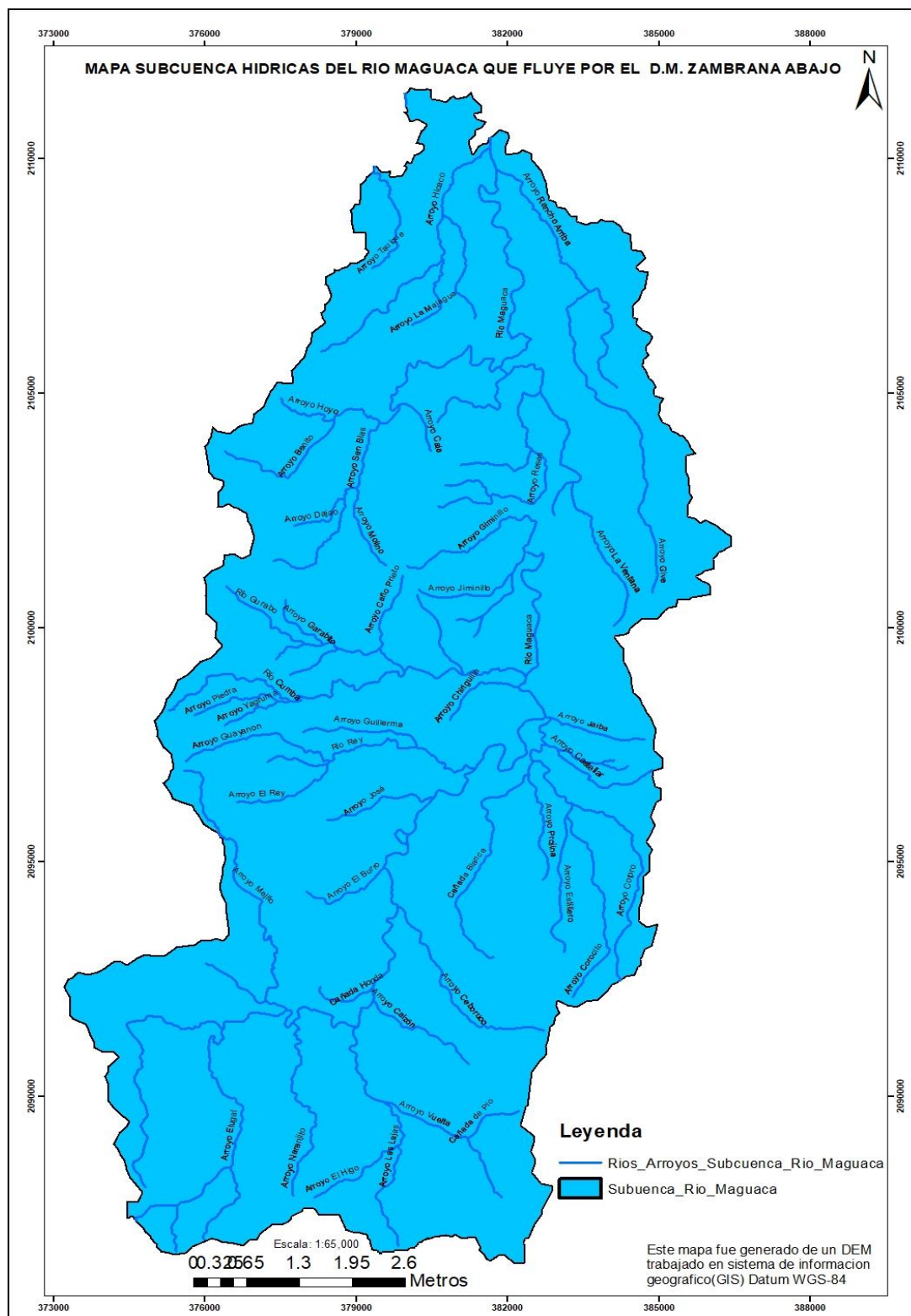
Escala 1: 100,000

Basado en el mapa topografico escala 1: 50,000 del Instituto Cartografico Militar

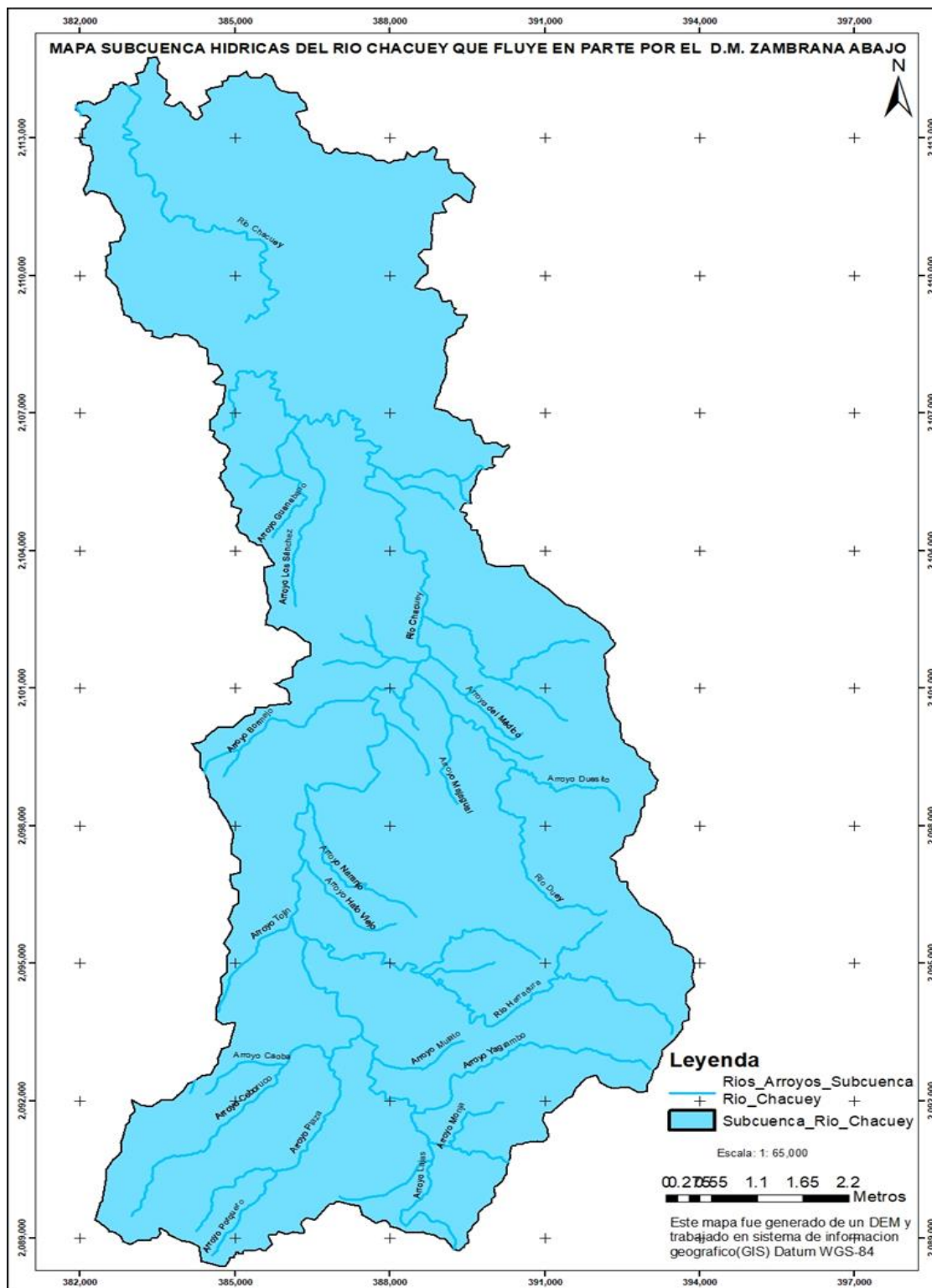
MAPA DE LAS PRINCIPALES ESTRUCTURAS DEL MUNICIPIO DE ZAMBRANA ABAJO.



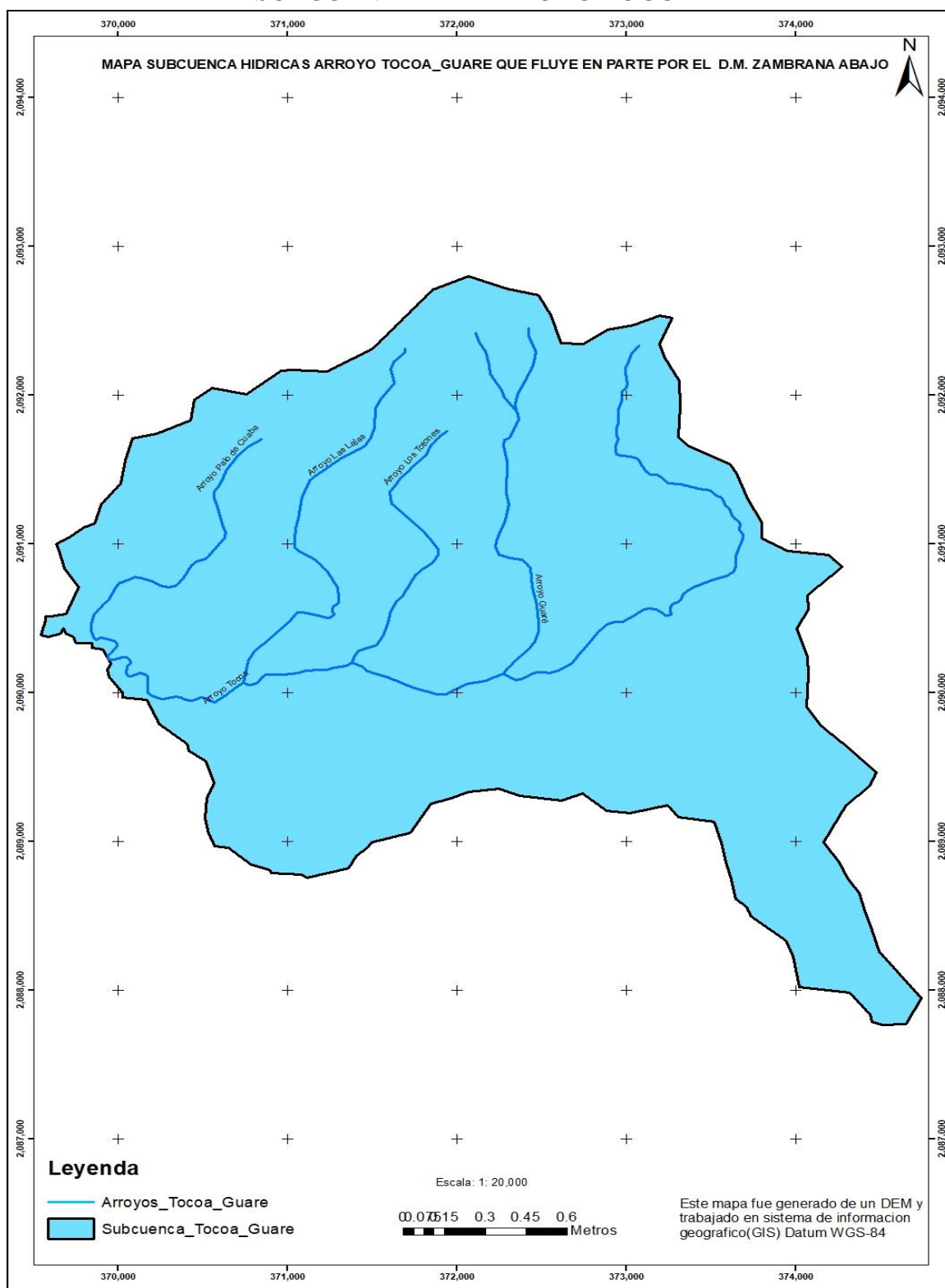
SUBCUENTA DEL RIO MAGUACA

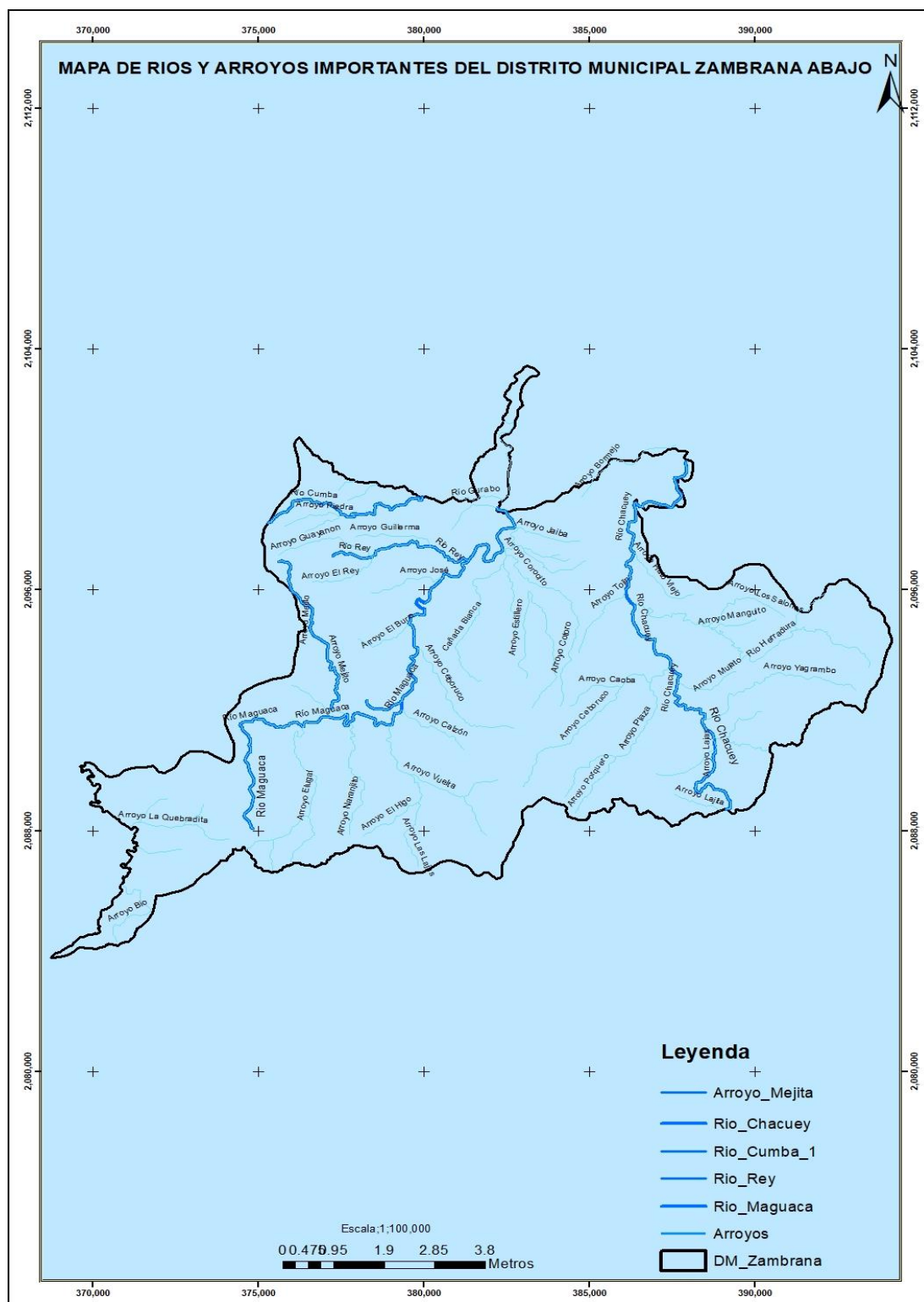


SUBCUENTA DEL ARROYO CHACUEY (CONOCIDO COMO RIO)

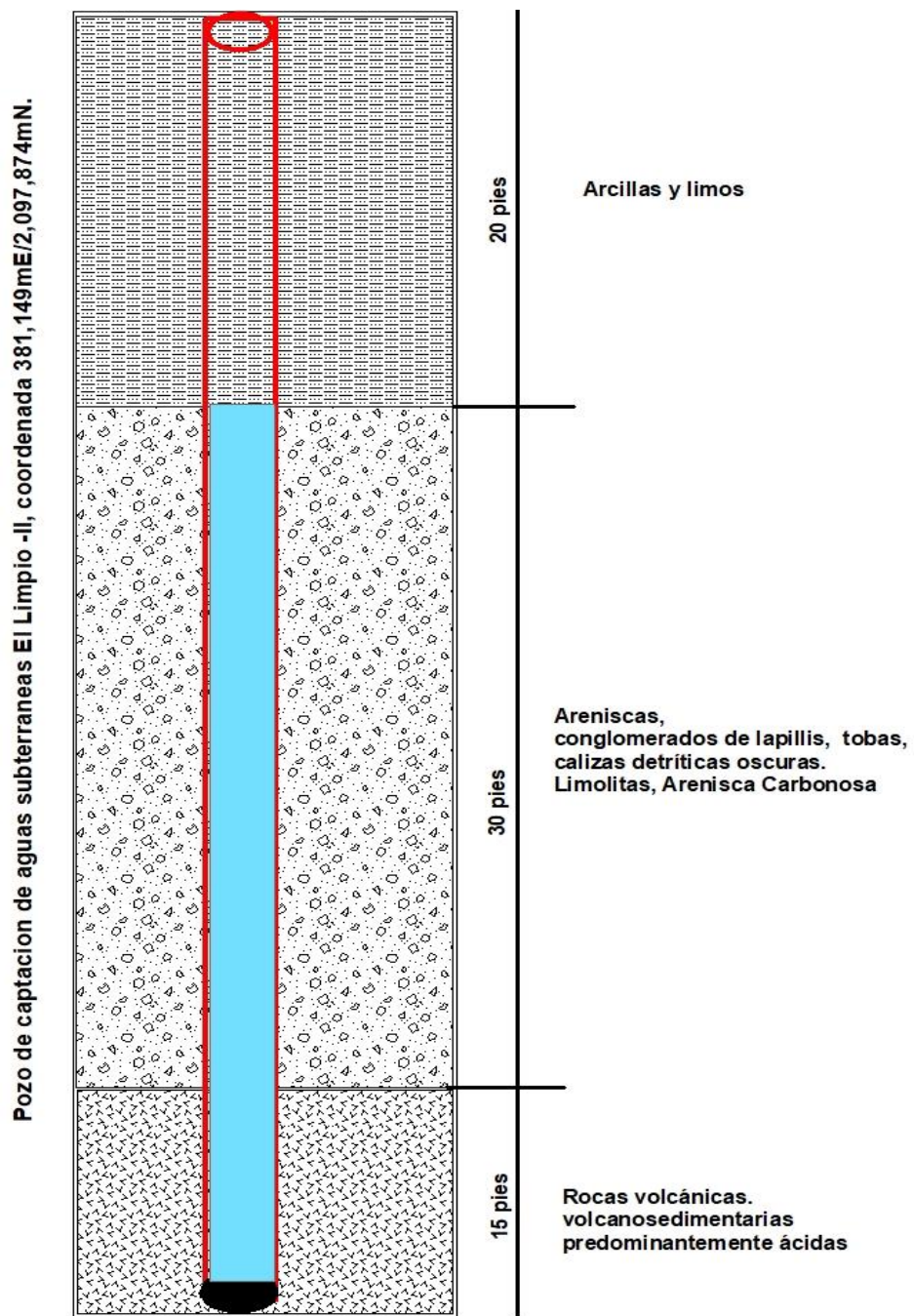


SUBCUENTA DEL ARROYO TOCOA





COLUMNA ESTRATIGRAFICA DEL POZO DE CATACION EL LIMPIO-II



Los mapas presentados en los anexos de este documento pertenecen a Batista, De la Cruz, Baudilio y Mendoza (2025) y se utilizan exclusivamente con fines académicos dentro del marco de esta investigación.