

ESTUDIO GEOFÍSICO E HIDROGEOLÓGICO PROYECTO HATO MONTAÑA

CONTRATANTE
REGENTE HOLDING GROUP, S.A.

PANAMA RAINWATER, S.A



Mayo, 2024

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
PROYECTO HATO MONTAÑA – Macro Lote 2
CORREGIMIENTO DE JUAN DEMÓSTENES AROSEMENA, DISTRITO DE
ARRAIJÁN-PROVINCIA DE PANAMÁ OESTE**



VERSIÓN N.1.2

VIGENCIA DESDE 15/04/2025

ÍTEM	ELABORÓ	REVISÓ	VISTO BUENO
FECHA	15/04/2025	15/04/2025	15/04/2025
CARGO	Ingeniero Geólogo Licencia No. 2008-015-001	Ingeniera geóloga Jr./ Ingeniera geóloga Msc hidrogeología/Ingeniera Gerente de proyectos	Director General
NOMBRE	Enrique Arguelles	Natalia Gomez Amaya/ Michelle Ramirez Valencia/ Daphne Bósquez	Francisco De Arco
FIRMA			

CONTENIDO

1. RESUMEN	0
2. INTRODUCCION.....	1
3. ALCANCE	2
4. LIMITACIONES.....	3
5. OBJETIVOS	4
6. METODOLOGÍA.....	5
6.1. FASE 1: PREPARATORIA O DE GABINETE.	5
6.2. FASE 2: APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	5
6.3. FASE 3: REDACCIÓN DE INFORME FINAL.....	5
7. GENERALIDADES	6
7.1. LOCALIZACIÓN.....	6
7.2. PERSONAL Y EQUIPOS.....	9
8. CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	9
8.1. HIDROLOGÍA	9
8.1.1. Cuenca del río Caimito	11
8.1.2. Precipitación	11
8.1.3. Escorrentía	15
9. GEOLOGÍA	16
9.1. Descripción de afloramientos.	17
9.2. Estructuras y Fracturas.....	21
10. GEOMORFOLOGÍA.....	24
10.1. REGIONES MORFOESTRUCTURALES	24
10.2. DRENAJES.....	26
10.3. PENDIENTES	27
11. HIDROGEOLOGÍA	29
11.1. HIDROLOGEOLOGÍA GRUPO CAÑAZAS- FORMACIÓN TUCUÉ.....	31
11.2. HIDROGEOLOGÍA PANAMÁ FASE MARINA	32
11.3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	32
11.4. DEFINICIÓN LOCAL DE LOS SISTEMAS ACUIFERO	37
12. ZONAS CON POTENCIAL DE RECARGA.....	38

12.1.	Grupo de suelo hidrogeológico.....	43
12.2.	Cobertura/Uso de suelo.....	45
12.3.	Pendientes	47
13.	RESULTADOS	48
14.	PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	50
14.1.	ADQUISICIÓN	50
14.2.	PROCESAMIENTO	53
14.3.	INTERPRETACIÓN	55
15.	CORRELACIÓN Y CORTES GEOELÉCTRICOS	62
15.1.	PERFIL E	63
15.2.	PERFIL G	66
16.	CONCLUSIONES.....	70
17.	RECOMENDACIONES.....	71
18.	BIBLIOGRAFÍA	74
19.	ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio	6
Figura 2. Estaciones y puntos de control recorridos en campo para geología.	17
Figura 3. Mapa estructural regional.	22
Figura 4. Clasificación morfológica subdendrítica	26
Figura 5. Red de drenaje.....	27
Figura 6. Mapa de pendientes del área de estudio.	28
Figura 7. Mapa de puntos de agua inventariados.	33
Figura 8. Definición de unidades hidrogeológicas	38
Figura 9. Correspondencias para la obtención del número de curva CN.....	42
Figura 10. Cobertura/ usos del suelo	47
Figura 11. Clasificación pendientes CN.....	48
Figura 12. Mapa de potencial de recarga del acuífero.....	49
Figura 13. Sección de contribución de señal para Schlumberger	52
Figura 14. <i>Ajuste de los datos ruidosos en las curvas de SEVs</i>	54
Figura 15. Área de Interés y ubicación de los SEVS	56
Figura 16. Área de Interés y ubicación de los SEVS	62
Figura 17. Perfil geoeléctrico E.....	65
Figura 18. Interpretación geoeléctrica e hidrogeológica del perfil E	66
Figura 19. Perfil geoeléctrico G	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones cercanas a la zona de interés.....	12
Tabla 2. Estaciones y puntos de control visitados	18
Tabla 3. Datos estructurales recolectados en campo	23
Tabla 4. Fotografías aéreas del desarrollo inmobiliario Hato Montaña	25
Tabla 5. Rangos de pendientes según umbral geomorfológico.....	27
Tabla 6. Inventario de puntos de agua	34
Tabla 7. Capas utilizadas en ArcGIS para el cálculo de CN.....	40
Tabla 9. Coordenadas de los SEVS, UTM17N.	53
Tabla 11. Profundidad de los pozos propuestos en la finca Hato Montaña.	72

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Equipo GEOPHYSICAL WDDS – 2/2B.	52
--	----

ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico.....	76
Anexo 2. Datos geofísica	76
Anexo 3. Áreas propuestas para pozos.....	76
Anexo 4. Mapas	76

1. RESUMEN

El Ingeniero geólogo Enrique Arguelles en conjunto con Panamá Rainwater llevaron a cabo el estudio de prospección geoeléctrica con el fin de realizar una investigación en el subsuelo y conocer las condiciones de saturación de este para determinar los contrastes entre las litologías y establecer los niveles acuíferos de los cuales se pueda explotar agua mediante la construcción de un pozo profundo para el abastecimiento de los proyectos inmobiliarios de Hato Montaña el cual se encuentra segregado en cuatro (4) áreas denominadas Lotes. El presente informe incluye el estudio hidrogeológico realizado para el área determinada Lote#2 el cual se encuentra localizado en el corregimiento de Juan Demóstenes Arosemena del Distrito de Arraiján en la Provincia de Panamá Oeste

En el área del proyecto se desarrolló una investigación geoeléctrica, en la cual se llevaron a cabo nueve (9) sondeos Sondeos Eléctricos Verticales con un equipo de Geoeléctrica modelo WDDS -2/2B el cual cuenta con valores máximos de corriente, voltaje y Potencia de 3000mA, 1000V y 300W, respectivamente.

Para el procesamiento de los datos se hace uso del software IPI2Win. El análisis de los SEVs tuvo en cuenta información primaria recolectada en el sitio de interés, tal como geología superficial, niveles freáticos, coberturas vegetales, entre otros.

Finalmente se realiza la interpretación de los resultados obtenidos, iniciando por la definición del tipo de acuífero de la zona, un acuitardo¹, de extensión regional y local, de porosidad secundaria, baja productividad y de carácter libre en las zonas donde la roca está aflorando a semiconfinado en profundidad.

Finalmente se concluye que en el área del proyecto Hato Montaña, se pueden perforar tres (3) pozos distribuidos en el lote 2, con profundidades entre 200 y 250 m de acuerdo con los resultados de la geoeléctrica.

¹ Formación geológica que puede contener buenos volúmenes de agua, pero baja permeabilidad, lo que hace que sea difícil la circulación y la explotación.

2. INTRODUCCION

Panamá está ubicado dentro de los países que poseen desarrollo humano alto, con una puntuación de 0.795 en el año 2019, que lo ubica en el puesto 58 de 169 países, siendo el país con mejor desarrollo humano en América Central y el cuarto en América Latina (Batista Rios, 2021). El desarrollo inmobiliario de La ciudad de Panamá se ha concentrado sobre todo hacia los sectores de Panamá Oeste y Panamá Este, en donde se construyen cada día nuevos proyectos de vivienda, lo que dificulta el abastecimiento de agua por parte del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAA). Esto genera que los constructores deban realizar las adecuaciones propias necesarias para suplir la demanda requerida en cada proyecto inmobiliario. Con base en lo anterior, se contratan los servicios de Enrique Argüelles y Panama Rainwater SA para realizar una investigación del subsuelo con el fin de determinar los diferentes acuíferos presentes en la zona, posible calidad del agua subterránea y localización de una perforación para su explotación. El estudio pretende básicamente determinar las unidades acuíferas, almacenadoras del agua, su espesor, determinar los diferentes cortes para ubicar el sitio ideal para perforar estos acuíferos, mediante pozos profundos en diferentes lugares en aras de abastecer los diferentes desarrollos inmobiliarios.

Para explorar el subsuelo y contribuir con el conocimiento en profundidad de los materiales, se aplica geofísica, técnica indirecta que permite localizar o detectar la presencia de estructuras o cuerpos bajo la superficie de la Tierra y determinar su tamaño, forma y propiedades físicas. Para estudios geotécnicos, hidrogeológicos y ambientales se usa el método geoeléctrico, es un método activo que se basa en la observación de la distribución de las líneas de corriente y de potencial simultáneamente causados por el flujo de la corriente eléctrica introducida en el terreno para determinar la variación en la resistividad² del subsuelo. (Ibáñez-García & Porres-Benito, 2001). Dentro de la geoeléctrica hay varios métodos que son comúnmente utilizados para fines específicos. En este estudio se realizan nueve (9) sondeos Eléctricos Verticales (SEV), localizados en el corregimiento de Juan Demóstenes Arosemena, Distrito de Arraiján en la Provincia de Panamá Oeste. La identificación y número de los sondeos es tomada del documento de caracterización hidrogeológica para toda el área de Hato Montaña en donde se realizaron 35 SEV's.

² La resistividad está definida como la resistencia eléctrica específica de cada material para oponerse al paso de una corriente eléctrica. Se designa por la letra griega rho minúscula y se mide en ohmios por metro. Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor. (EDUCALINGO, 2019)

3. ALCANCE

El método de prospección geoelectrica, que es uno de los métodos geofísicos de mayor uso en la exploración de aguas subterráneas. Se utiliza como método indirecto para conocer de manera indirecta los distintos materiales del subsuelo y sus espesores. Estos materiales se diferencian a partir de la respuesta de los materiales al paso de una corriente eléctrica.

Este método consiste en aplicar corriente por conducción en el suelo a través de electrodos y medir la caída de potencial por medio de otros electrodos de corriente. Cualquier variación en conductividad en el suelo altera el flujo de corriente dentro de este, afectando a su vez la distribución del potencial eléctrico, el cual depende del tamaño, espesor, forma y conductividad de los materiales del subsuelo.

De acuerdo con lo anterior, a partir de un modelamiento matemático con ayuda de software especializado, se puede interpretar las distintas capas geo-eléctricas del subsuelo, su espesor y resistividad, determinadas por las medidas de potencial realizadas en superficie en el sitio de exploración y a la profundidad investigada a partir del levantamiento e interpretación de nueve (9) sondeos eléctricos verticales.

Con la información de las capas geo-eléctricas identificadas, conocimiento geológico del sector y los distintos valores de resistividad obtenidos se puede hacer una correlación con la litología de los materiales y su tamaño de grano para definir diferentes facies³, así como posibles relaciones con la saturación y calidad del agua según el contenido de sales minerales (salinidad) en el fluido del subsuelo.

El alcance total del área de interés es el levantamiento e interpretación de nueve (9) sondeos eléctricos verticales ubicados en el Lote#2 del proyecto Hato Montaña con el fin de identificar los niveles acuíferos del área en aras de proponer la ubicación de pozos de agua para el abastecimiento del desarrollo inmobiliario.

³ Conjunto de características de una roca o terreno consideradas desde el punto de vista de su formación.

4. LIMITACIONES

Una de las mayores fuentes de problemas de campo es la resistencia del contacto del electrodo. Todos los métodos de resistividad dependen de poder aplicar corriente al suelo, si la resistencia de los electrodos de corriente se vuelve anormalmente alta, la corriente aplicada puede caer a cero y la medición fallará. Esta situación podría ocurrir por una alta resistencia de contacto en la que los electrodos se encuentran sobre material como arenas, cantos o grava excesivamente secos. Una buena forma de superar esta situación es mojar los electrodos de corriente con agua o solución salina cavando un pequeño agujero en el suelo relleno con la solución implantando el electrodo en el agujero.

Las limitaciones topográficas son muy comunes, ya que un arreglo geoelectrico debe expandirse a lo largo de una línea recta. Si se curva significativamente y no se hace ninguna corrección, pueden ocurrir errores en la adquisición de datos debido a que se utilizan factores geométricos inexactos para calcular los valores de resistividad aparente. Por esta razón, las áreas con características lineales en el campo, como carreteras, caminos o senderos abiertos, son las ubicaciones ideales para implementar estos arreglos. En el área de estudio, el relieve es colinado, con notables diferencias en las pendientes y alturas de las colinas lo que debe ser tenido en cuenta para el análisis de los SEVS.

Los puntos de datos defectuosos son particularmente difíciles de resolver si se desconoce su causa. Incluso si la resistividad aparente se ha calculado correctamente con factores geométricos debidamente modificados, pueden surgir anomalías en los datos. Podría suceder debido a la presencia de tuberías, lentes de arena u otras características localizadas que puede afectar la calidad de los datos de campo reduciendo la efectividad de cualquier interpretación. Si hay una tubería conductora o una lente, cuando se aplica una corriente desde cierta distancia, las líneas de equipotencial se distorsionarán alrededor del lente y la línea de flujo de corriente se enfocará hacia la lente.

La resistividad aparente medida en campo es el promedio de las resistividades de los materiales o capas geológicas a través de las cuales circula la corriente en el subsuelo, por esta razón una capa geoelectrica puede estar conformada por la alternancia de varias capas litológicas como lo es la intercalación de paquetes de arenas y gravas intercalados, o limos y arcillas intercaladas.

Los cambios en las condiciones climáticas locales representan un limitante significativo, especialmente por las lluvias intensas que se produjeron durante algunos días de trabajo. Esta situación no solo dificulta la toma de medidas del sondeo, sino que también influye en los valores de resistividad de los materiales superficiales al saturar las capas superiores con agua, lo que resulta en una disminución de las resistividades registradas.

Es importante anotar que el criterio para la interpretación depende del consultor, sin embargo, lo que para el consultor puede ser una unidad o un rango de valores afines, para otro consultor puede significar otra unidad.

Finalmente se debe resaltar que la geofísica no deja de ser un método indirecto de investigación del subsuelo. Para determinar las características finales de los acuíferos de la zona se debe realizar una perforación exploratoria acompañada de una prueba de bombeo con el fin de conocer las propiedades hidráulicas de los sistemas acuíferos.

5. OBJETIVOS

Los objetivos del siguiente estudio geoelectrico e hidrogeológico son:

1. Exploración de campo (sondeos eléctricos verticales (SEV) del área de interés.
2. Interpretación y análisis de las curvas de SEVs y perfiles geoelectricos para la caracterización del espesor y profundidad de las diferentes capas geoelectricas.
3. Delimitación de las zonas saturadas de agua (nivel freático).
4. Delimitación de la base y el techo, cálculo de espesores y descripción de valores de resistividades de cada uno para la formulación del modelo geofísico del área.
5. Realizar la correlación entre las unidades geoelectricas con los posibles materiales del área.
6. Definición de la ubicación del mejor lugar para la perforación de los pozos necesarios para abastecer los proyectos del desarrollo inmobiliario en Hato Montaña.

6. METODOLOGÍA

El proceso metodológico para el desarrollo de este proyecto se subdividió en tres fases.

6.1. FASE 1: PREPARATORIA O DE GABINETE.

Consistió en la revisión del área a través de sistemas de información geográfica. Se estableció el plan de trabajo para la ejecución de los SEV con base en el análisis de la información técnica disponible de diferentes entidades considerando geología, geomorfología, hidrogeología, cuencas hidrográficas, y otros.

6.2. FASE 2: APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN.

La gira de campo se efectuó entre el 31 de julio y el 29 de agosto del año 2023. Para llevar a cabo en campo los arreglos geoelectricos con una distribución espacial que permita el mapeo de toda la zona de estudio con énfasis en el área de intervención del proyecto; los datos de los SEVs, y de posicionamiento son tomados mediante GPS garmin etrex 10. En esta etapa del trabajo se realizan los ensayos geofísicos por medio del equipo de resistividad eléctrica WDDS-2.

Además, se realizó:

- Estudio in situ de la geología y las características geomorfológicas que permiten comprender mejor las estructuras geológicas, la estratigrafía y el comportamiento de las cuencas.
- Inventario de puntos de agua dentro y fuera del área de estudio.

6.3. FASE 3: REDACCIÓN DE INFORME FINAL.

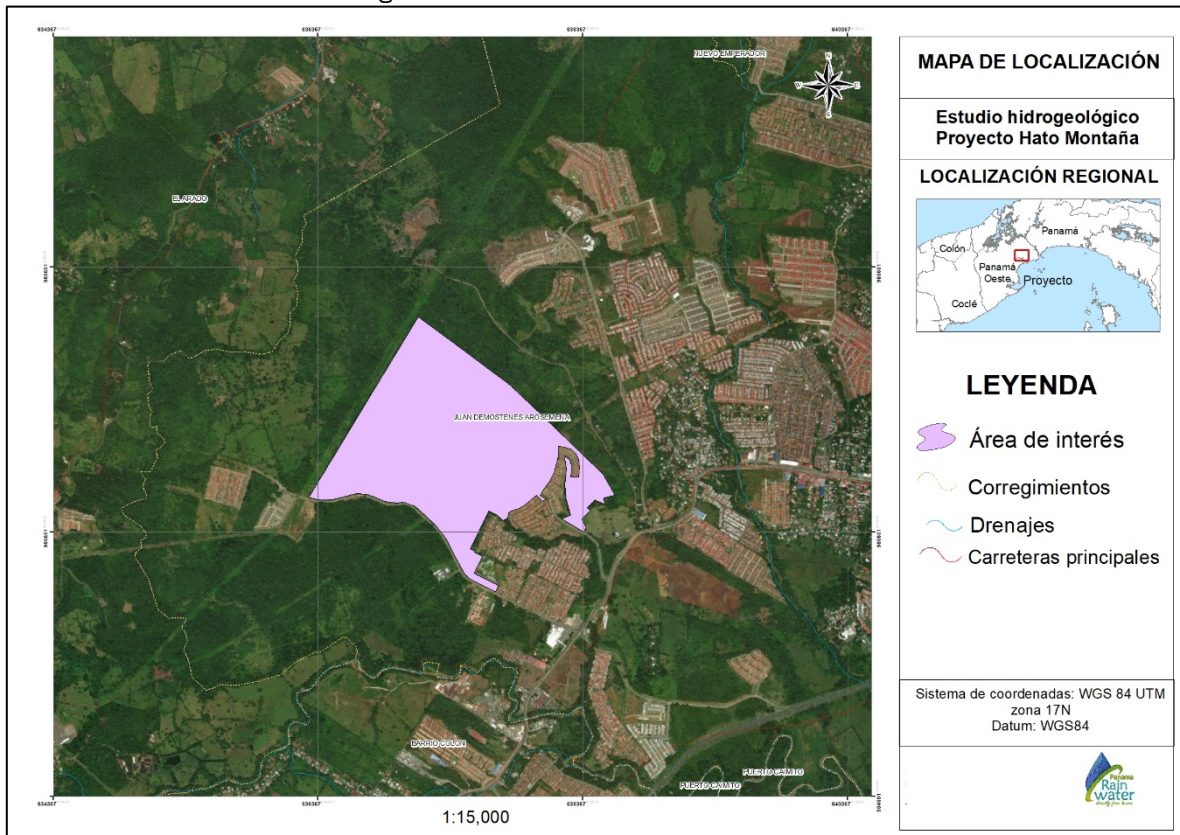
Esta fase incluye el análisis y procesamiento de la información y la preparación del informe final.

7. GENERALIDADES

7.1. LOCALIZACIÓN.

Para la distribución y ejecución de los SEVs se segregó el proyecto Hato Montaña en cuatro (4) áreas denominadas Macro Lotes. Cerca a estos macro lotes se identifican proyectos inmobiliarios como Verona, Piamonte, Siena y RoyalPark. El área de estudio se localiza en el corregimiento de Juan Demóstenes Arosemena, Distrito de Arraiján en la Provincia de Panamá Oeste. En la Figura 1 se encuentran delimitado el área de interés del macro Lote#2 correspondiente al presente estudio.

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: Panama Rainwater 2024

En la siguiente tabla, se presentan las coordenadas del Macro Lote #2 en el DATUM WGS 84

PUNTO	DISTANCIA	RUMBO	NORTE	ESTE
L1	1592.4	N31° 16' 22.16"E	986861.05	636293.26
L2	865.97	S53° 39' 00.00"E	988222.08	637119.90
L3	976	S46° 03' 23.56"E	987708.81	637817.36
L4	175.72	S28° 59' 27.73"E	987031.51	638520.11
L5	83.73	S76° 53' 46.50"W	986877.81	638605.27
L6	50.35	S5° 28' 27.36"E	986858.83	638523.73
L7	79	N64° 31' 40.10"W	986808.71	638528.53
L8	85.16	S45° 13' 16.20"W	986842.68	638457.20
L9	30.51	S43° 37' 51.78"E	986782.70	638396.75
L10	87.97	S45° 55' 09.40"W	986760.61	638417.81
L11	75.28	S26° 30' 45.29"E	986699.41	638354.61
L12	11.72	S18° 19' 33.66"W	986632.05	638388.21
L13	23.62	S27° 23' 16.46"W	986620.93	638384.53
L14	48.42	N64° 10' 10.91"W	986599.95	638373.66
L15	46.61	N58° 24' 28.25"W	986621.05	638330.08
L16	102.37	N57° 48' 15.66"W	986645.47	638290.38
L17	72.97	N69° 31' 42.91"E	986700.01	638203.75
L18	132.35	N16° 05' 30.29"W	986725.53	638272.12
L19	103.17	N4° 01' 31.66"W	986852.69	638235.43
L20	123.79	N6° 45' 30.90"E	986955.60	638228.19
L21	49.64	N3° 20' 11.08"W	987078.53	638242.76
L22	48.76	N17° 48' 16.15"W	987128.09	638239.87
L23	7.5	N7° 29' 17.58"W	987174.52	638224.96
L24	4.98	S78° 06' 27.08"E	987181.95	638223.98
L25	16.02	S65° 41' 07.08"E	987180.93	638228.86
L26	20.91	S43° 46' 44.08"E	987174.33	638243.45
L27	16.84	S29° 38' 31.74"E	987159.23	638257.92
L28	29.83	S19° 06' 35.26"E	987144.60	638266.25
L29	23.88	S8° 42' 55.44"E	987116.41	638276.02
L30	25.21	S6° 10' 03.51"W	987092.81	638279.64
L31	50.41	S6° 10' 03.51"W	987067.74	638276.93
L32	62.87	S86° 11' 22.64"E	987017.62	638271.51
L33	74.19	N6° 10' 03.51"E	987013.45	638334.25
L34	60.46	N9° 33' 04.15"W	987087.20	638342.22
L35	27.75	N19° 09' 08.85"W	987146.83	638332.18
L36	18.6	N30° 01' 39.51"W	987173.04	638323.08
L37	48.96	N44° 17' 17.17"W	987189.15	638313.77
L38	48.42	N69° 00' 33.08"W	987224.20	638279.58

PUNTO	DISTANCIA	RUMBO	NORTE	ESTE
L39	16.89	N80° 43' 06.72"W	987241.54	638234.37
L40	34.89	N86° 54' 27.20"W	987244.26	638217.71
L41	27.02	S0° 04' 33.35"E	987246.15	638182.86
L42	34.23	S5° 22' 35.43"W	987219.12	638182.90
L43	72.67	S11° 09' 03.63"W	987185.04	638179.69
L44	71.57	S17° 46' 13.12"W	987113.74	638165.64
L45	65.93	S25° 15' 38.92"W	987045.58	638143.79
L46	106.75	S35° 48' 44.96"W	986985.96	638115.66
L47	27.83	S19° 32' 15.21"W	986899.40	638053.20
L48	48.43	S57° 16' 50.64"E	986873.17	638043.89
L49	6.3	S45° 07' 09.14"W	986846.99	638084.64
L50	22.83	S70° 44' 31.48"W	986842.55	638080.17
L51	1.64	N28° 51' 38.19"W	986835.02	638058.62
L52	37.97	N41° 22' 11.19"W	986836.45	638057.83
L53	5.45	S49° 38' 44.07"W	986864.95	638032.74
L54	19.7	N40° 21' 15.93"W	986861.42	638028.58
L55	119.81	S50° 15' 40.46"W	986876.43	638015.83
L56	53.91	S61° 28' 14.00"W	986799.84	637923.70
L57	42.37	S73° 29' 15.61"W	986774.09	637876.33
L58	34.91	S63° 12' 10.15"W	986762.05	637835.71
L59	25.13	S13° 34' 21.08"W	986746.32	637804.56
L60	19.19	S4° 28' 17.44"W	986721.88	637798.66
L61	41.47	S65° 06' 02.29"W	986702.75	637797.16
L62	65.21	N48° 04' 21.00"W	986685.29	637759.55
L63	63	N64° 07' 00.00"W	986728.87	637711.03
L64	318.24	S25° 53' 00.00"W	986756.37	637654.35
L65	39	S64° 07' 00.00"E	986470.05	637515.43
L66	9.28	S25° 53' 00.00"W	986453.03	637550.52
L67	67.42	S64° 07' 00.00"E	986444.68	637546.46
L68	145.41	S25° 53' 00.00"W	986415.25	637607.12
L69	207.26	S64° 03' 40.22"E	986284.43	637543.64
L70	52.29	S27° 01' 36.44"W	986193.77	637730.02
L71	213.19	N64° 06' 03.51"W	986147.19	637706.26
L72	61.17	N45° 11' 03.82"W	986240.31	637514.49
L73	292.46	N27° 55' 29.56"W	986283.42	637471.09
L74	135.79	N37° 29' 27.44"W	986541.83	637334.13
L75	212.85	N47° 02' 03.05"W	986649.57	637251.48
L76	96.2	N71° 37' 38.32"W	986794.64	637095.73
L77	41.44	S82° 20' 06.19"W	986824.97	637004.43

PUNTO	DISTANCIA	RUMBO	NORTE	ESTE
L78	92.22	N83° 16' 16.39"W	986819.44	636963.37
L79	150.17	N68° 30' 36.87"W	986830.24	636871.78
L80	85.05	N88° 45' 46.26"W	986885.26	636732.05
L81	169.17	S75° 57' 18.66"W	986887.09	636647.02
L82	76.85	S85° 48' 23.49"W	986846.04	636482.91
L83	49.82	N85° 18' 22.26"W	986840.42	636406.26
L84	19.88	N78° 41' 10.24"W	986844.49	636356.61
L85	45.64	N73° 54' 04.43"W	986848.40	636337.11

7.2. PERSONAL Y EQUIPOS.

El personal asignado para este proyecto es el siguiente:

- Enrique Arguelles – Ingeniero Geólogo idóneo y líder de la investigación
- Michelle Ramírez Valencia– Ingeniera Geóloga, Msc Hidrogeología.
- Alis Carolina Echeverri – Ingeniera Geóloga Coordinadora del equipo geosférico
- Natalia Gómez Amaya – Ingeniera Geóloga Jr.
- Francisco De Arco – Director General de PRW
- Jaime Serrano – Ingeniero Ambiental – Especialista en recursos hídricos – Panama Rainwater
- Dos (2) auxiliares del área.

Los equipos utilizados en la ejecución del proyecto fueron los siguientes:

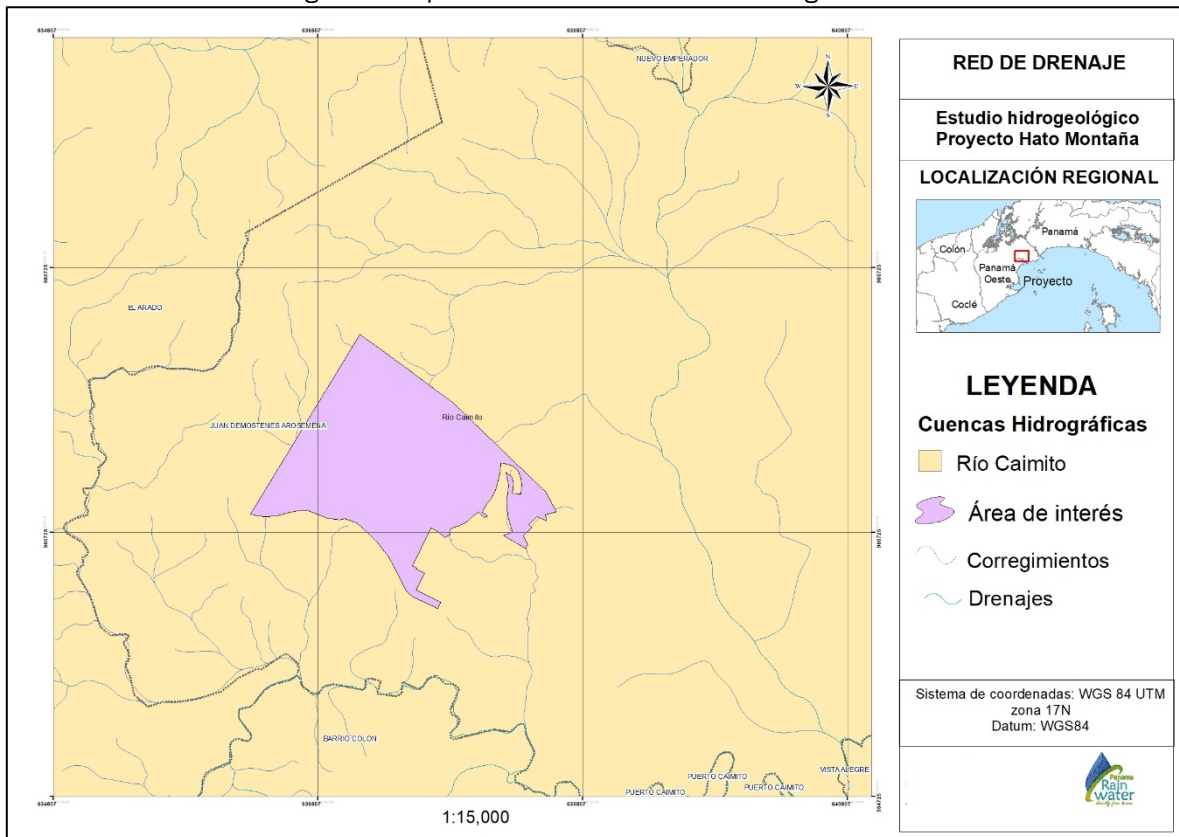
- Equipo GEOPHYSICAL WDDS – 2/2B.
- Unidad de potencia con miliamperímetro, convertidor y elevador de voltaje.
- Unidad de medida con Milivoltímetro y sistema de compensación de potencial espontáneo natural.
- Fuente de poder que consiste en 4 baterías de 12V-5A.
- 4 electrodos de corriente y potencial
- 2 carretes de 500 metros para electrodos de corriente AB
- Dos cables de 250 metros para electrodos de potencial MN
- Libreta de campo.

8. CONDICIONES CLIMÁTICAS

8.1. HIDROLOGÍA

La hidrología de Panamá está controlada por la geología, geomorfología y los usos del suelo, que influyen directamente en la longitud, pendiente y orientación de los drenajes. La divisoria principal de las cuencas nacionales es la cordillera central, la cual se extiende de oeste a este y marca dos vertientes significativas, la vertiente del Atlántico, por la cual corren el 30% de los drenajes con una longitud media de 56 Km y una pendiente media de 2,5%; y la vertiente del Pacífico, que abarca el 70% de los drenajes del país con longitudes medias de 106 Km y pendiente media de 2,27% (ETESA, 2009). En total hay 52 cuencas hidrográficas, 18 en la vertiente del Atlántico y 34 en la vertiente del Pacífico (SIAGUA, s.f). La zona de interés se encuentra en el límite occidental de la cuenca No 140 -río Caimito (ver Figura 2)

Figura 2. Mapa de ubicación de cuencas hidrográficas.



Fuente: Panama Rainwater 2024

8.1.1. Cuenca del río Caimito

La cuenca del río Caimito se encuentra ubicada en la provincia de Panamá Oeste, está limitada al norte con la cuenca No. 115: Canal de Panamá, al este con la cuenca No. 142: Ríos entre Caimito y el Juan Díaz, al sur con el océano pacífico y al oeste con las cuencas No. 115 (Canal de Panamá) y la No.138: Ríos entre Antón y Caimito. El área total de la cuenca es de 454.7km² y el río principal es el río Caimito, cuya longitud es de 72 km. (Sanchez, 2018) Los principales afluentes del Río Caimito son los ríos Aguacate, Bernardino, Congo y Copé, aunque es abastecido por 163 afluentes.

Dentro de los resultados analizados de índice de Calidad de Agua (ICA) que fueron realizados entre el 2005 y 2008 (Autoridad Nacional del Ambiente de Panamá, 2010), la cuenca del Río Caimito se encuentra identificada con las aguas más contaminadas junto a las cuencas C142 (entre el río Caimito y Juan Díaz) y la C144 (Río Juan Díaz y Pacora).

8.1.2. Precipitación

El control dominante sobre los patrones de precipitación en la república de Panamá está basado en la migración estacional de las masas de aire sub-tropical del Atlántico y tropical del Pacífico (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia, 2007). Estos cambios en los patrones durante el año sumados a la orografía local establecen áreas con totales anuales diferentes y da origen a regímenes de precipitación bien definidos (ETESA, 1999).

Para las mediciones de pluviosidad en Panamá, la Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA) tiene un total de 227 estaciones meteorológicas. En cuanto a la forma de recolección de información el 23.79% de las estaciones meteorológicas lo realiza de manera convencional, mientras que en las hidrológicas solo el 2.2% es convencional (ETESA, 2021)

Según el Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá 2010- 2030 el área de interés se encuentra ubicado en una zona donde el clima se caracteriza por ser tropical de sabana (Autoridad Nacional de Ambiente de Panamá, 2011) en el cual la precipitación anual es menor a 2500 mm y tiene una estación seca más prolongada en donde algunos meses puede tener lluvias menores a 60 mm. Para el área de interés del proyecto se identifican cuatro (4) estaciones cercanas, operadas por ETESA, sin embargo, se obtienen datos históricos solo para La Polvareda y Nuevo Emperador.

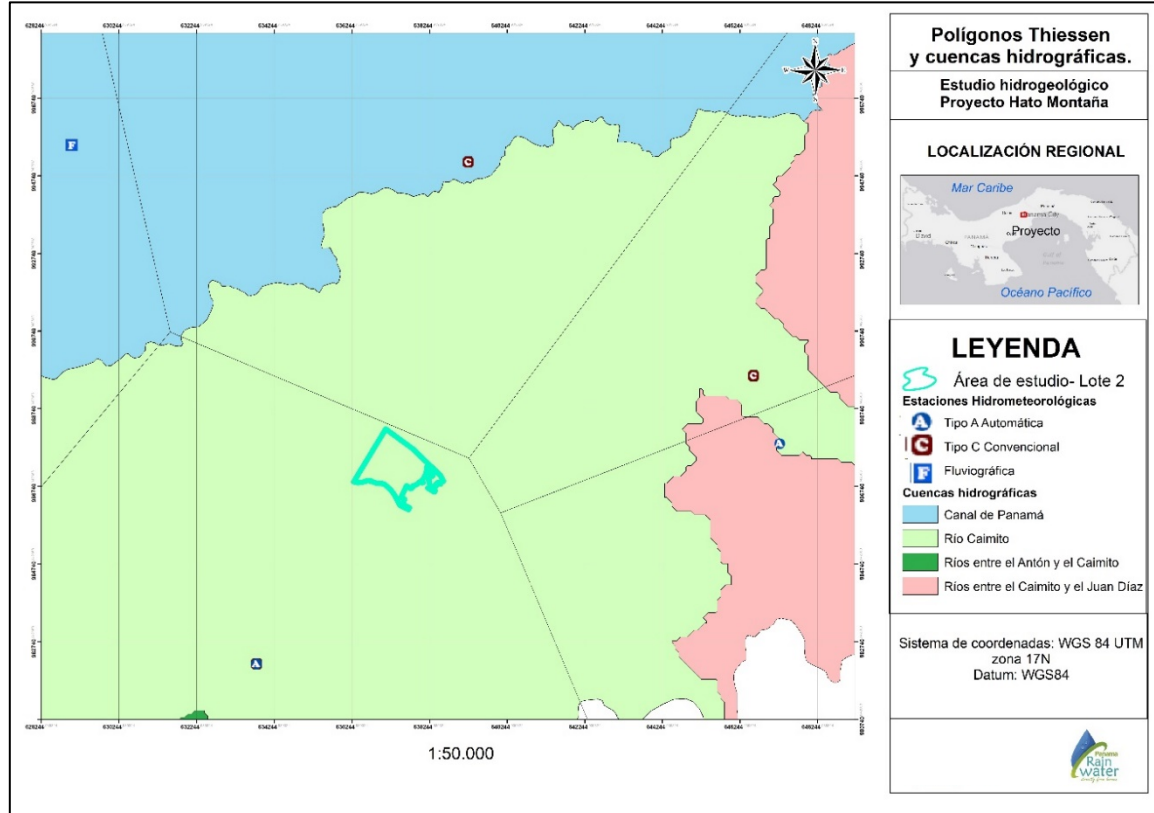
Tabla 1. Estaciones cercanas a la zona de interés.

ID	NOMBRE	TIPO	Coordenada Este	Coordenada Norte	COTA	FECHA INICIAL	FECHA FINAL
140-006	SE CHORRERA	Tipo A Automática	633780.89	982173.24	46	7/02/2003	
140-007	EL LLANO	Tipo C Automática	647263.05	987841.19	52	1/02/2008	
140-002	LA POLVAREDA	Tipo C Convencional	646584.72	989589.70		1/12/1970	1/03/1981
140-003	NUEVO EMPERADOR	Tipo C Convencional	639235.24	995092.97		1/12/1970	1/03/2000

Fuente: Modificado de IMHPA por Panama Rainwater, 2024.

Para determinar qué estación se ajusta al área de interés, se generan los polígonos de Thiessen, que permiten establecer zonas de influencia de estaciones meteorológicas sobre la base de la cercanía de distancias. Tal como se presenta en la Figura 3, se puede asumir que los datos históricos de las estaciones La Polvareda y Nuevo Emperador y los datos recientes obtenidos para la Chorrera y El Llano son suficientes para entender la dinámica de precipitación.

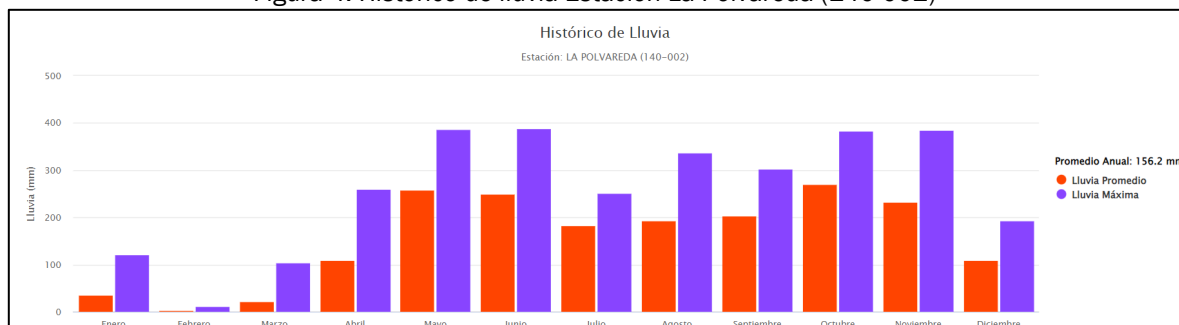
Figura 3. Mapa de polígonos de Thiessen.



Fuente: Panama Rainwater, 2024.

La estación La Polvareda tiene 11 años de registros, en los cuales el promedio de lluvia anual es de 156.2 mm (ver Figura 4), siendo mayo, junio, octubre y noviembre los meses con mayores valores de precipitación, llegando a valores por encima de 383 mm en el mes de octubre. Los meses de menor precipitación son febrero y marzo (ETESA, 2023)

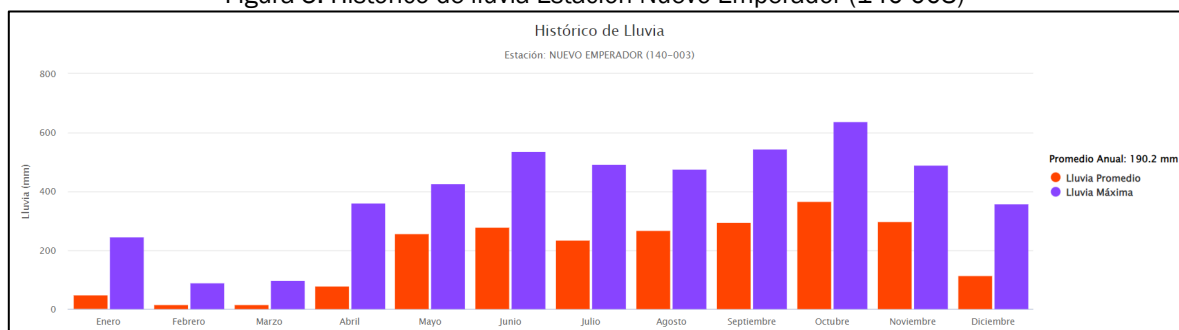
Figura 4. Histórico de Lluvia Estación La Polvareda (140-002)



Fuente: Modificado de IMHPA por Panama Rainwater, 2023.

La estación Nuevo Emperador tiene 30 años de registros, en los cuales el promedio de lluvia anual es de 190.2 mm (Figura 9), siendo junio, julio, septiembre y octubre los meses con mayores valores de precipitación, llegando a valores por encima de 639 mm en el mes de octubre. Los meses de menor precipitación son febrero y marzo. (ETESA, 2023)

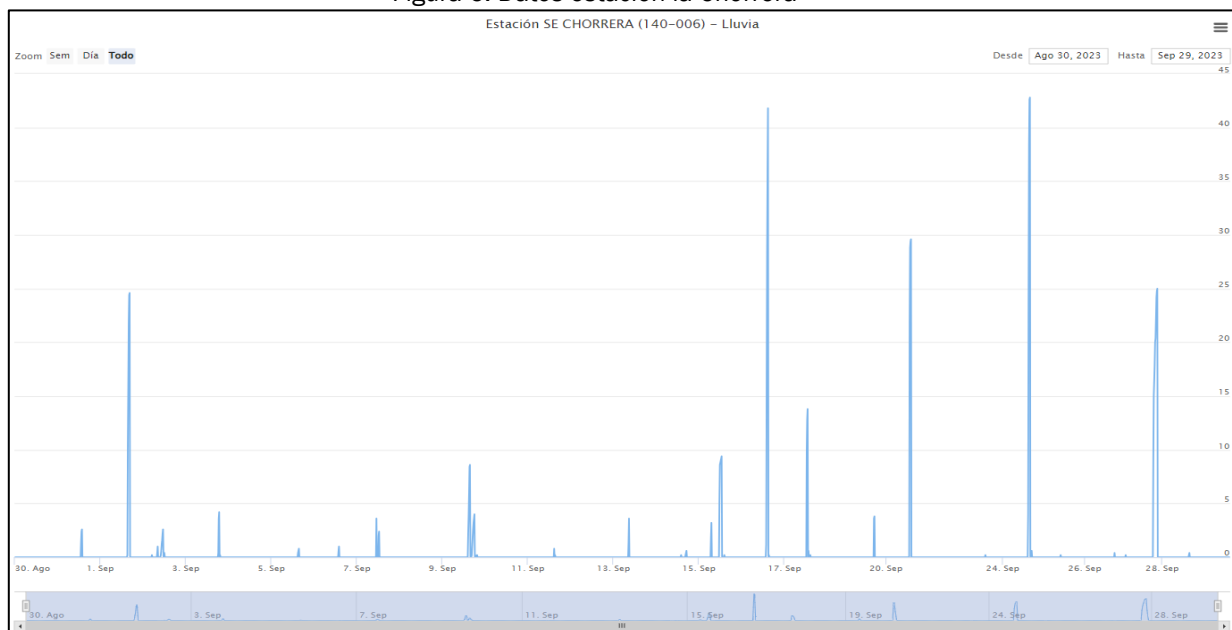
Figura 5. Histórico de Lluvia Estación Nuevo Emperador (140-003)



Fuente: Modificado de IMHPA por Panama Rainwater, 2023.

Adicionalmente se presentan los datos para el último mes obtenidos en las estaciones La Chorrera y El Llano, en donde se puede ver que en la estación la Chorrera (140-006) se reporta una lluvia acumulada en las últimas 24 horas de 0.4mm y la mayor precipitación presentada entre el 30/AGO/2023 y el 28/SEP/2023 fue de 42.6 mm el 24 de septiembre (ETESA, 2023).

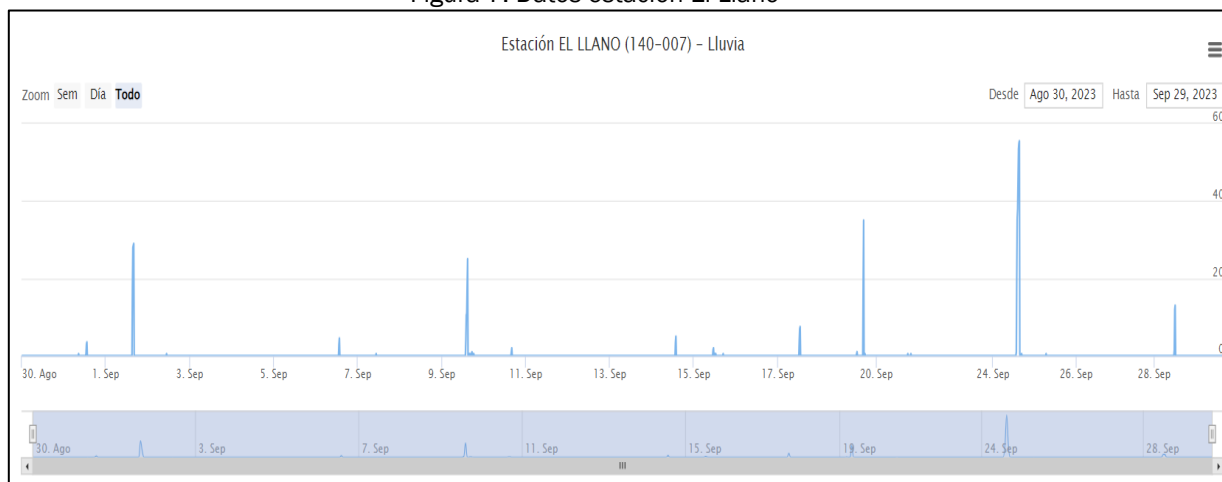
Figura 6. Datos estación la Chorrera



Fuente: Modificado de IMHPA por Panama Rainwater, 2023.

Para la estación El Llano (140-007) se reporta una lluvia acumulada en las últimas 24 horas de 0.4mm y la mayor precipitación presentada entre el 30/AGO/2023 y el 28/SEP/2023 fue de 53.5mm el 24 de septiembre (ETESA, 2023).

Figura 7. Datos estación El Llano

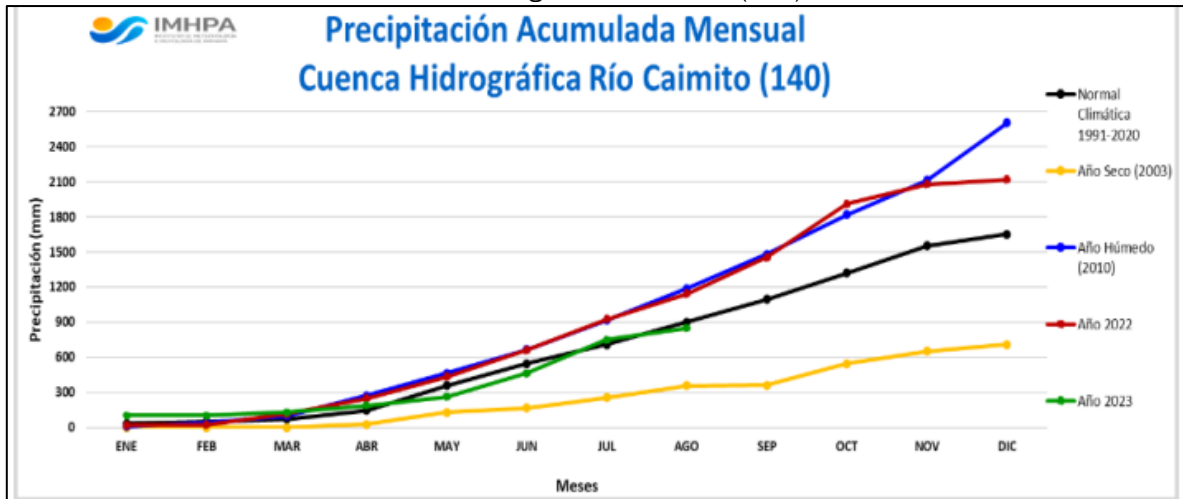


Fuente: Modificado de IMHPA por Panama Rainwater, 2023.

Finalmente, del informe “Comportamiento de las lluvias en las cuencas hidrográficas en Panamá, período: desde el año 2022 hasta agosto 2023. Se encuentra que para la

cuenca 140- Río Caimito hasta el año 2023 las lluvias se han comportado similar a la línea negra (Normal climática entre 1991 y 2020). El 2022 se comportó muy parecido a la línea azul que corresponde al año más húmedo (2010) y este si estuvo alejado de la normal climática. (Panama, 2023)

Figura 8. Comparativo de la Normal Climática, Año Seco, Año Húmedo y Años 2022-2023, para la cuenca hidrográfica río Caimito (140)



Fuente: Modificado de IMHPA por Panama Rainwater, 2023.

8.1.3. Escorrentía

La escorrentía, en general, está definida como la circulación de agua producida en un cauce superficial. Se define, además, como escorrentía superficial como la cantidad de agua que se escapa de la infiltración y de la evapotranspiración y que circula por la superficie (Universidad Jaime I de Castellón, 2007).

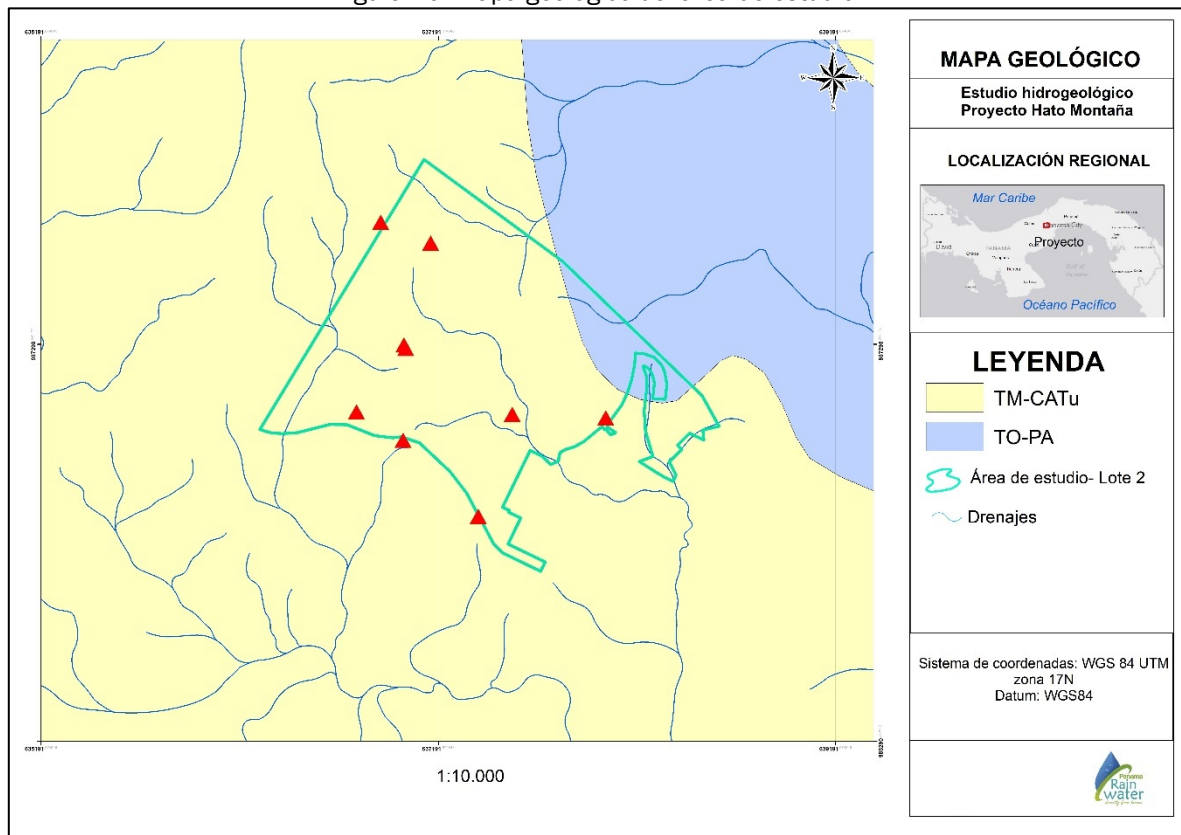
De acuerdo con Vega Cervera (2012), la escorrentía promedio anual en todo el territorio de Panamá es de 1764 mm (133,2 km³), lo que equivale a 4,222 m³/s, con un coeficiente de escorrentía de 60,3 %. Para el área de estudio del proyecto Hato Montaña, conforme al mapa de escorrentía promedio anual publicado por ETESA (2007a) en el cual se toman datos desde 1971 hasta el año 2002, el valor de escorrentía promedio anual se clasifica entre 251 y 500 mm, valor que se encuentra considerablemente por debajo de la media.

9. GEOLOGÍA

El Istmo de Panamá surgió hace unos 3 ó 4 millones de años atrás, a partir del lento desplazamiento de las placas tectónicas del Pacífico y del Caribe que, producto de la presión y del calor causado por esta colisión tectónica, llevó a la formación de un arco de islas de origen volcánico que luego de miles de años se cubrió y relleno de sedimentos, para conformar así la actual configuración geológica y tectónica de Panamá” (Autoridad Nacional del Ambiente de Panamá, 2010).

En el área de estudio se identifican dos unidades litoestratigráfica (Figura 10). Del terciario se encuentran la Formación Tucué (**TM-CATu**): formada por lavas, tobas, basaltos, andesitas y plugs, aglomerados; y la Formación (**TO-PA**) que está conformada por areniscas tobáceas, material piroclástico como aglomerado y ceniza volcánica, lutita tobácea y caliza algacea y foraminífera.

Figura 10. Mapa geológico del área de estudio



Fuente: modificado de Ministerio de Comercio e Industrias, Dirección General de Recursos Minerales (1990)

Es esencial enfatizar que, a pesar de que el mapa geológico muestra la presencia de dos formaciones geológicas, teniendo en cuenta que la escala del mapa es 1:1'000.000 lo que significa que la definición de límites de las unidades no es tan detallada. Para el

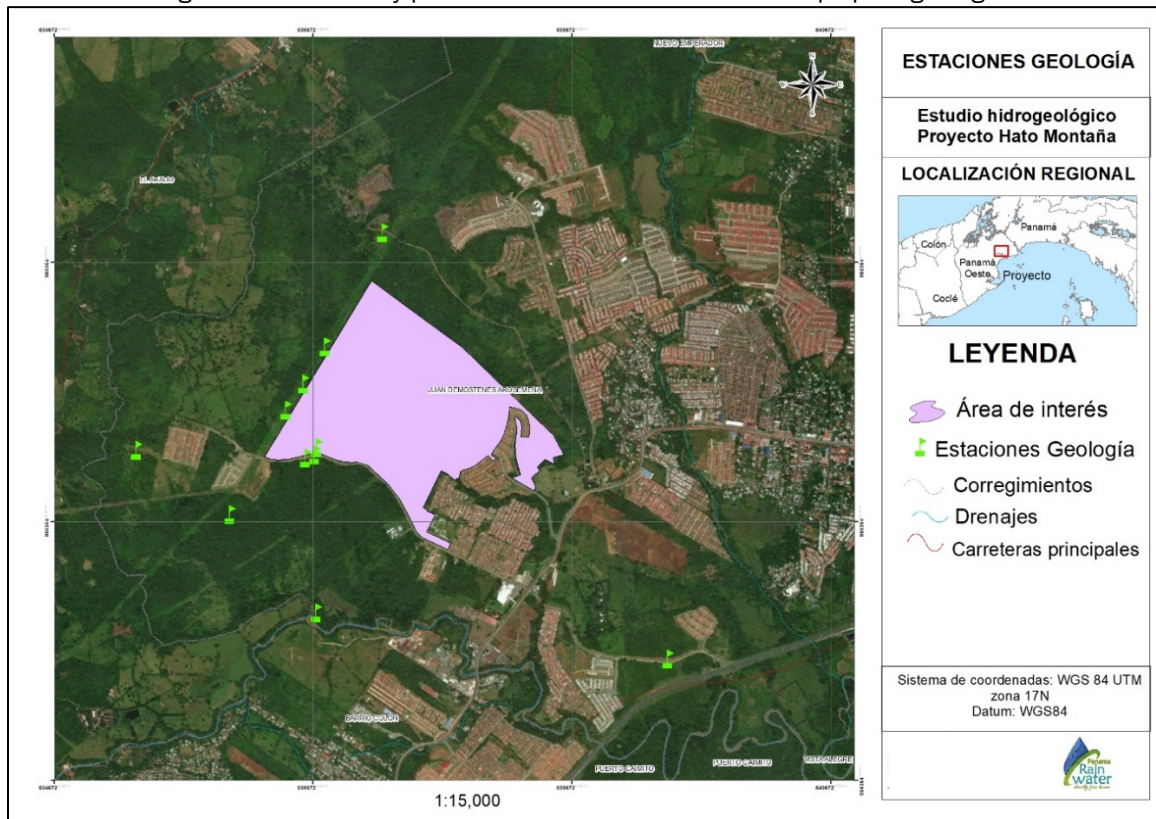
área de estudio la información recolectada presenta un nivel de detalle mayor donde se encuentran los afloramientos que se correlacionan principalmente con la formación Tucué y depósitos aluviales del río Caimito los cuales están conformados por sedimentos de origen continental y marino.

9.1. Descripción de afloramientos.

La estratigrafía local fue realizada teniendo en cuenta las características litológicas de las unidades geológicas descritas anteriormente. Con las actividades de campo dentro de la zona de estudio, fue posible establecer que aflora una sola unidad que se conforma por un saprolito con fracturas heredadas de la roca parental (tobas y andesitas) y tobas muy alteradas pertenecientes a la formación Tucué (TM- CATu).

A continuación, se muestran algunas fotografías tomadas en los recorridos de campo que ilustran los afloramientos identificados. Es importante destacar que estos afloramientos son relativamente escasos en la zona de estudio debido a la predominancia de áreas densamente cubiertas por vegetación o la presencia de depósitos de arcillas limosas de espesores significativos. Adicionalmente en la Figura 9 se presenta la localización de las estaciones y puntos de control que se visitaron.

Figura 9. Estaciones y puntos de control recorridos en campo para geología.



Fuente: Panama Rainwater, 2024.

Tabla 2. Estaciones y puntos de control visitados

FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
	<p>Coordenadas: E636688 N986877 H:101 m</p> <p>Afloramiento de 3 metros de altura que varía hasta 5 metros. Está conformado por tobas muy alteradas e intercaladas con arcillas de colores rojizos y anaranjados. Este afloramiento se extiende por 145m a lo largo de la vía en dirección hacia la carretera panamericana.</p>
	<p>Detalle del afloramiento en donde se muestra el alto grado de fracturamiento de la roca y una muestra de toba de color crema con patina de oxidación y alteración de sus minerales.</p>
	<p>Coordenadas: E636618 N986856 H:86m</p> <p>Afloramiento donde se evidencia materiales con patinas negras y anaranjadas por oxidación. En esta foto el patrón de las diaclasas o fracturas es más claro y organizado que en otras partes de este afloramiento (Se encuentra dentro de la extensión de los materiales descritos anteriormente)</p>

FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
	<p> Coordenadas: E636707 N986934 H=116 Afloramiento ubicado al otro costado de la vía en dirección al proyecto Verona. A diferencia de los afloramientos descritos anteriormente, esta capa presenta bloques de composición basáltica embebidos dentro del saprolito de rocas tobáceas, que se encuentran muy alteradas, y con presencia de arcillas de color crema y fracturas. Los bloques encontrados son subangulares a subredondeados y tienen diámetros hasta de 70 cm. En la imagen de abajo se puede observar una meteorización del material color crema alrededor de los bloques en forma concéntrica y en capas. </p>
	<p> Coordenadas: E636034 N986418 H=82 m. Afloramiento de 4 metros de altura encontrado dentro del proyecto Siena. Se caracteriza por la transición entre saprolito arcilloso y rocas volcánicas tobáceas de colores que varían entre tonalidades cremas, naranjas y rojizos con violeta. Se observan algunos cristales de plagioclasa alterados. El afloramiento se encuentra altamente fracturado. </p>

FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
	<p>Coordenadas foto 1: E636769 N987711 H:114m. Coordenadas foto 2: E636601 N987426 H:100m.</p> <p>Durante el recorrido por las líneas eléctricas se pueden observar algunos afloramientos y caminos destapados que permiten correlacionar las litologías con las vistas en la zona en donde se encuentran transiciones entre saprolito arcillosos de color naranja y rocas tobáceas muy alteradas con presencia de bloques de basalto.</p> <p>Para la segunda foto se encuentran las rocas tobáceas de un color más grisáceo y con menos presencia de bloques. Los afloramientos presentan también fracturas.</p>

FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
	<p>Coordenadas: E635310 N986915 H:67m.</p> <p>Dentro del predio en donde se está construyendo el proyecto Verona se encuentran afloramientos que muestran las espesas formaciones arcillosas. El afloramiento que se muestra varía entre 3 a 5 m de altura y se caracteriza por la presencia de arcillas de colores anaranjados con bloques gabroides de hasta 1 m de diámetro.</p>

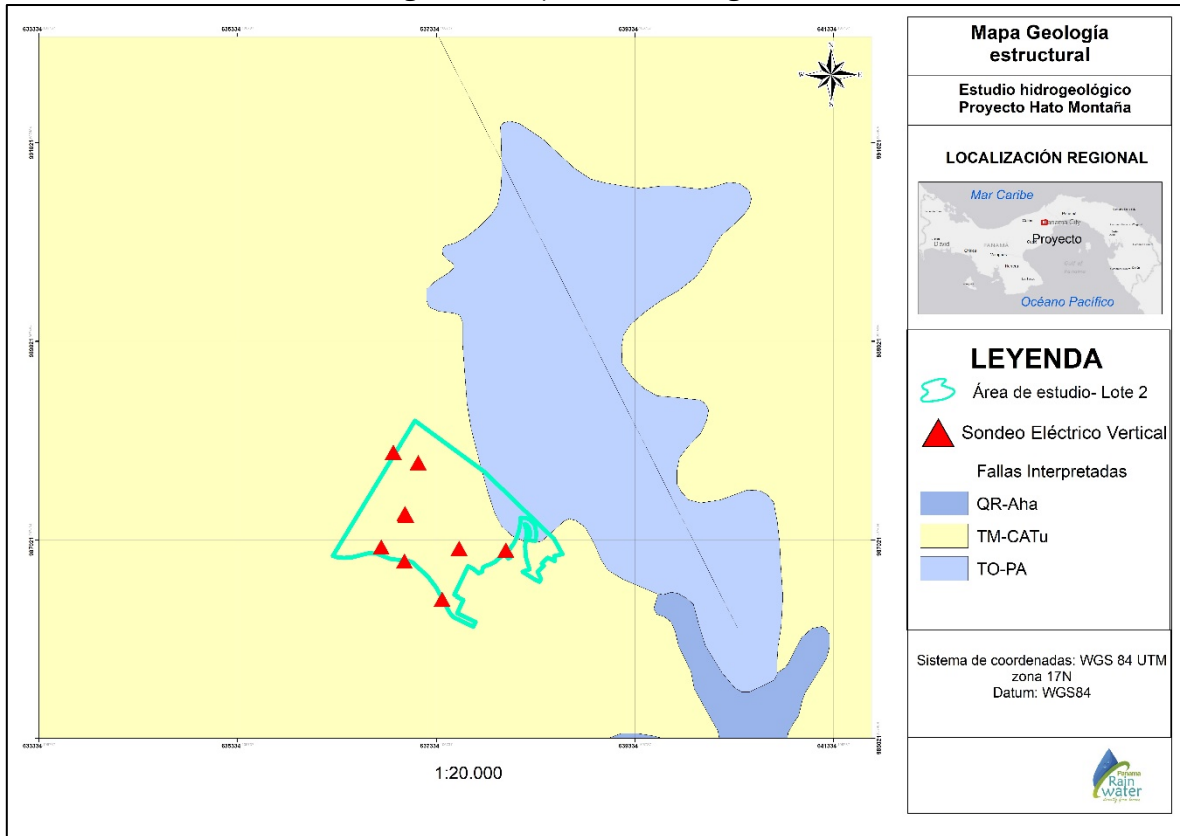
El registro fotográfico completo de los afloramientos visitados en campo se encuentra en el ANEXO 2: REGISTRO FOTOGRÁFICO.

9.2. Estructuras y Fracturas.

Regionalmente el área de estudio puede estar influenciada por una falla que ha sido interpretada por el Ministerio de Comercio e Industrias, Dirección General de Recursos Minerales para la elaboración del mapa geológico de Panamá (Ministerio de Comercio e Industrias, 1990) mediante el uso de imágenes LANDSAT Y fotografías aéreas la cual se puede observar en la Figura 10; esta falla presenta una dirección NW-SE. Localmente se identifican afloramientos altamente fracturados en donde no se ve un patrón claro de fracturamiento en algunos puntos mientras que en otros sí. Los datos estructurales consignados en campo se presentan en la (Tabla 3. Datos estructurales recolectados en campo Tabla 33) y se puede concluir que las tendencias más repetitivas son en direcciones N-W con buzamientos que varían entre 60° y 80° y en dirección y en

dirección N-E con buzamientos entre 65° y 90° . El fracturamiento intenso de las rocas dan lugar a una porosidad secundaria propia de la formación Tucué.

Figura 10. Mapa estructural regional.



Fuente: modificado de Ministerio de Comercio e Industrias, Dirección General de Recursos Minerales (1990)

Tabla 3. Datos estructurales recolectados en campo

Ubicación	Datos estructurales
E636688 N986877	N55W/80NE N60W/70NE N10E/60NW N40E/80NW N20W/60SW EW/30S
E636618 N986856	N40W/75NE N45W/87NE N50E/75SE N45W/85SE
E0636707 N0986934	N80E/80SE N50E/87SE NS/87E N50W/87SW N20E/80NW N15W/65NE
	N32E/70NW N10E/65NW N80E/70SW
E636601 N987426	EW/75N N60E/87SE N70E/80SE
E636769 N987711	N30W/85NE EW/87S
E636034 N986418	N35W/75SW N80W/85SW N90E/85SE N30W/60SW

Fuente: Panama Rainwater, 2024.

10. GEOMORFOLOGÍA

10.1. REGIONES MORFOESTRUCTURALES

La configuración geográfica de Panamá entre los océanos Atlántico y Pacífico divide al país en dos vertientes geomorfológicamente muy marcadas: la vertiente del caribe al norte y la vertiente del pacífico al sur, limitadas entre sí por la cadena montañosa denominada Cordillera Central, cuyas alturas alcanzan hasta 3475 m.s.n.m. en el volcán Barú (ETESA, 1999). La Cordillera Central está desarrollada paralelamente a la línea del litoral y forma parte de la cadena volcánica de Centro América, la cual tuvo origen en las eras secundaria y terciaria, relacionado con el ciclo orogénico Alpino (Autoridad Nacional del Ambiente de Panamá, 2010). Según ETESA (1999), en Panamá se definen 3 regiones morfo estructurales, individualizadas por la topografía (altitud y pendiente) geología estructural y la evolución geológica:

- Las regiones de montañas: estrechamente ligadas con la formación de rocas volcánicas y plutónicas, a excepción de las áreas bocatoreñas del Teribe y Changuinola, que son de origen sedimentario.
- Las regiones de cerros bajos y colinas: donde las cotas oscilan entre 400 y 900 m.s.n.m. y predomina un paisaje accidentado con laderas convexas en las partes superiores y cóncavas en las inferiores.
- Las regiones bajas de planicies y litorales: asociadas a cuencas sedimentarias del Terciario constituidas por rocas sedimentarias marinas ubicadas en zonas deprimidas con topografía ondulada aplanada a poco ondulada con declives que oscilan entre muy débil a débil (ETESA, 1999).

El área de estudio está enmarcada dentro de las regiones de cerros bajos y colinas las cuales se pueden definir como una elevación pequeña del terreno que se destaca aisladamente sobre el territorio que la rodea y de altitudes entre 150 y 350 m.s.n.m. Dentro de estas se encuentran colinas de origen volcánico que irregularizan el paisaje plano. Y las regiones bajas y planicies litorales que son las planicies que se encuentran cerca a los ríos y que se constituyen de materiales sedimentarios continentales y marinos como los que se encuentran en cercanías al río Caimito. En las siguientes figuras (ver Tabla 4) se muestran unas fotografías tomadas con un DRON, lo cual permite entender la configuración del paisaje colinado en el área de interés.

Tabla 4. Fotografías aéreas del desarrollo inmobiliario Hato Montaña

FOTOGRAFÍA	DESCRIPCIÓN
	<p>Fotografía tomada desde el proyecto Siena. A lo lejos se puede ver como se pasa de una zona relativamente plana en contraste con las montañas que se encuentran al fondo.</p>
	<p>En esta fotografía se observan los cambios de las pendientes que en el área. Mostrando una región colinada, u ondulada con altitudes variables.</p>
	<p>Hacia la parte superior de la imagen se puede observar el relieve característico del área de interés representado por colinas cubiertas por bosques nativos y zonas desprovistas de vegetación arbórea, con presencia tan solo de pastos.</p>

10.2. DRENAJES

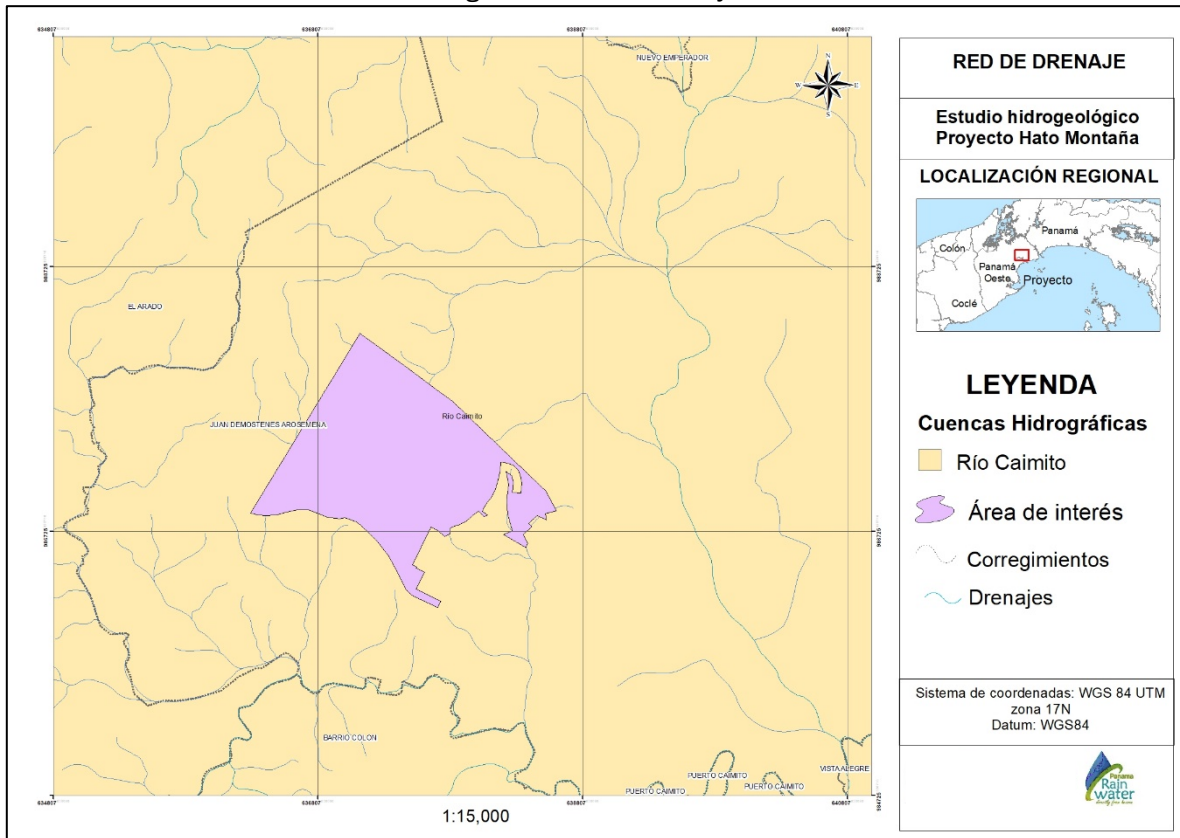
La forma que adoptan los ríos o quebradas en una determinada región se conoce como drenaje y el diseño depende de la topografía principalmente, con influencia de factores tales como: declives originales, diferencia de dureza en las rocas, controles estructurales (tales como fallas o pliegues geológicos), diastrofismo reciente, y la historia geomórfica de la cuenca. Los patrones de drenaje se describen en términos descriptivos. En el área de estudio, de manera regional, se identifican patrones de drenaje desarrollados bajo cierto control estructural cuya morfología se clasifica como subdendrítica. Estos desarrollan en áreas en donde el curso principal fluye en una zona en la que la pendiente y el control estructural son distintos a los de la zona por la que se desarrollan los tributarios. El área drenada por los tributarios estará cubierta probablemente con sedimentos relativamente resistentes, ofreciendo un control más fuerte que aquel de la zona donde corre el curso principal (Servicio Geológico Colombiano, 2016). Como se puede ver en la Figura 12, el patrón de drenaje se acomoda al ejemplo que es presentado en la Figura 11.

Figura 11. Clasificación morfológica subdendrítica



Fuente: modificado de Servicio Geológico Colombiano (2016)

Figura 12. Red de drenaje



Fuente: Panama Rainwater 2023

10.3. PENDIENTES

La clasificación de las pendientes en el área se hizo con base en Araya – Vergara y Borgel (1972); Ferrando (1992) y Young (1977) en el trabajo de Fernández-Torres (2006) y se puede observar en la siguiente tabla:

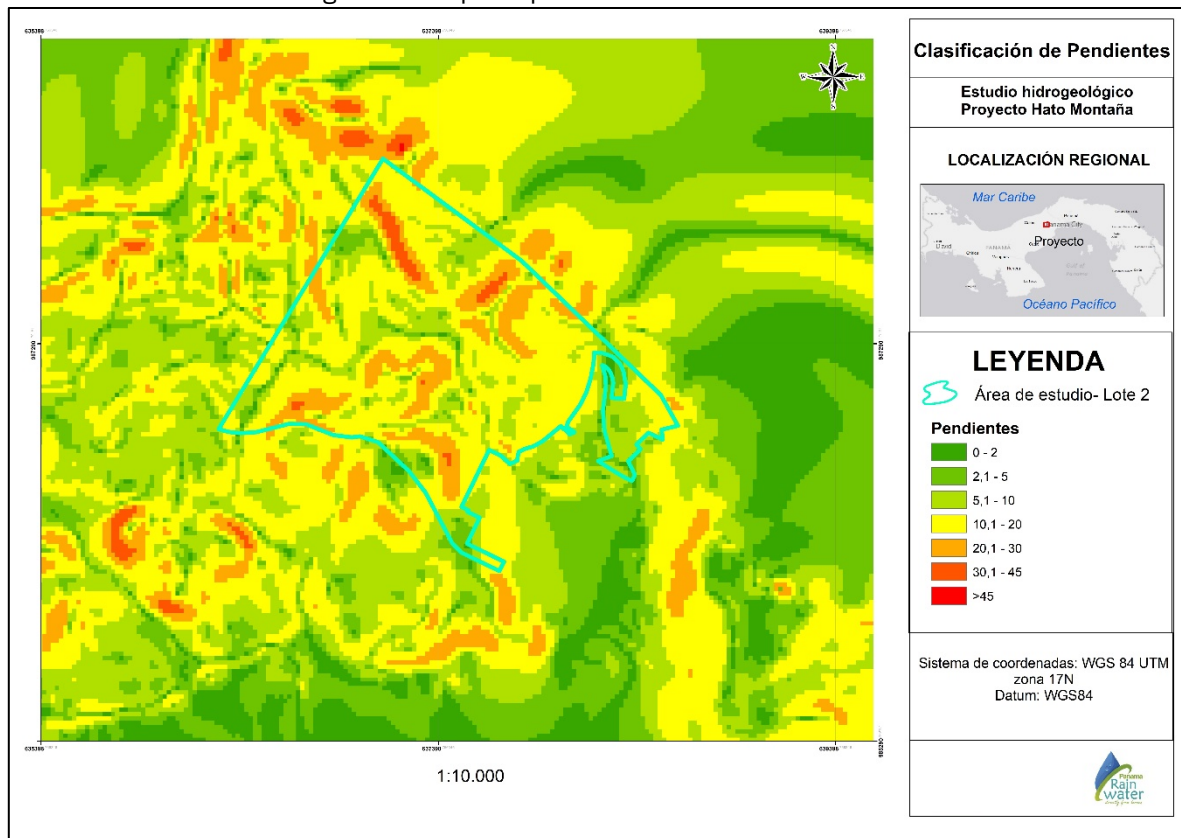
Tabla 5. Rangos de pendientes según umbral geomorfológico.

Grado de pendiente	Tipo de pendiente	Umbral geomorfológico	Grado de Erodabilidad
0° a 2°	Horizontal	Erosión nula o leve	Bajo
2,1° a 5°	Suave	Erosión débil, difusa.	Bajo
5,1° a 10°	Moderada	Erosión moderada a fuerte.	Medio
10,1° a 20°	Fuerte	Erosión intensa, cárcavamiento	Alto
20,1° a 30°	Moderadamente escarpada	Cárcavas frecuentes, movimientos en masa, reptación.	Alto
30,1° a 45°	Muy escarpada	Coluviamiento	Muy alto
>45°	Acantilada	Desprendimientos, derrumbes	Muy alto

Fuente. Fernández-Torres (2006).

Las superficies con pendientes moderadas, fuertes y moderadamente escarpadas exhiben un nivel de erodabilidad medio y alto. Estas pendientes predominan en el sitio de interés, como se ilustra en la Figura 13, Dado el umbral geomorfológico y el tipo de material predominante en la zona (arcillas) y rocas altamente meteorizadas y fracturadas, se observa un grado de erosión medio-alto, caracterizado por la formación de cárcavas y algunos movimientos en masa de pequeña magnitud. Además, en la región, se pueden encontrar colinas con pendientes que varían de moderadas a escarpadas. A medida que se avanza en dirección noroeste-sureste en el mapa, se nota una disminución progresiva de las pendientes, hasta alcanzar áreas con pendientes horizontales.

Figura 13. Mapa de pendientes del área de estudio.



Fuente: Panama Rainwater (2023).

11. HIDROGEOLOGÍA

El Departamento de Hidrometeorología de ETESA en 1999 publicó el mapa hidrogeológico nacional, como producto de una recopilación exhaustiva de información: hidrogeológica, geológica, topográfica, hidrológica y cartográfica, la cual ha sido interpretada y sintetizada en un mapa, en su primera edición, a pequeña escala (1:1,000,000), con la finalidad de mostrar algunas características hidrogeológicas de las diferentes formaciones geológicas de Panamá. En este documento se definió que la determinación y clasificación de los acuíferos depende de varios factores como las características físicas de las rocas en las diferentes formaciones geológicas, partiendo como base de que “los sedimentos aluviales deben conformar una capa acuífera; las rocas ígneas y las calizas fracturadas constituyen redes acuíferas; mientras que las rocas ígneas, macizas y no fracturadas, no contienen aguas subterráneas” (ETESA, 1999).

Según ETESA (1999) las rocas se pueden clasificar como coherente e incoherentes, donde las coherentes son las rocas compactas que pueden o no estar fisuradas; y las incoherentes aquellas cuya fase sólida estuviese constituida por granos de naturaleza petrográfica, forma y dimensiones muy diversas. Dentro de las rocas coherentes fisuradas se pueden encontrar basaltos, andesitas y calizas compactas agrietadas pues contienen fisuras que permiten el paso o la contención de agua; por otro lado, las no fisuradas las componen las rocas ígneas y metamórficas en las que los poros no tienen interconexión unos con otros.

Con base en las consideraciones anteriormente mencionadas, el mapa hidrogeológico en Panamá consta de tres grupos principales de ocurrencia de aguas subterráneas:

- Acuíferos predominantemente fisurados intergranulares (continuos, generalmente no consolidados): se diferencian con base en la permeabilidad de la siguiente manera:
 - **Permeabilidad media a variable:** se consideran acuíferos productivos cuyos caudales son de 10 a 50 m³/h. Se describen como acuíferos libres de extensión regional limitada, constituidos por aluviones, sedimentos marinos no consolidados y deposiciones tipo delta de granulometría variable, en los cuales predominan secciones arenosas, limosas y arcillosas. La calidad química de las aguas es generalmente buena. Las unidades geológicas que están en esta clasificación son: Formación Las Lajas (QR - Ala) y Formación Boca de Chucará (QR - Abch).
 - **Permeabilidad variable:** se consideran acuíferos moderadamente productivos cuyos caudales son de 3 a 10 m³/h y se distinguen dos unidades hidrogeológicas, bien caracterizadas por los materiales geológicos que la conforman. La unidad hidrogeológica 1 se describe como: Acuíferos de extensión variable, libres,

constituidos por productos volcánicos fragmentarios de granulometría variable, sobrepuestos a flujos lávicos indiferenciados. La calidad química de las aguas es generalmente buena y está constituida por las siguientes formaciones geológicas: Barú (QPS-BA), El Valle (TMPL-VA). La unidad hidrogeológica 2 se describe como acuíferos de extensión variable, libres o confinados, constituidos por sedimentos clásticos, consolidados y poco consolidados y depósitos costeros, La calidad de las aguas subterráneas es generalmente buena, aunque es posible captar aguas salobres en ciertas áreas cerca de la costa. Esta unidad hidrogeológica está constituida por la formación geológica **Río Hato (QR-Aha)**.

- Acuíferos predominantemente fisurados (discontinuos): están conformados en su mayoría por rocas ígneas, sin embargo, hay excepción en este grupo lo constituyen la unidad hidrogeológica conformada por rocas sedimentarias compactas fisuradas como las calizas y areniscas. La permeabilidad es variable y en este grupo se encuentran acuíferos de productividad moderada a baja (Caudales de 3 a 10 m³/h). Se diferencian cuatro (4) unidades hidrogeológicas que se describen a continuación:
 - Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, conformados por una mezcla de rocas volcánicas fragmentarias, consolidadas y poco consolidadas, sobrepuestas a rocas ígneas consolidadas. Los pozos más productivos se localizan en las zonas fracturadas. La calidad química de las aguas es generalmente buena. Las formaciones geológicas que componen esta unidad son: Grupos Macaracas (TO-MAC) y **Panamá fase Volcánica (TO-PA)**.
 - Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, comprenden un conjunto de volcanitas (lavas y aglomerados), las lavas son masivas y los aglomerados se encuentran compactos. Los pozos más productivos se localizan en las zonas fracturadas. La calidad química de las aguas es generalmente buena. Las formaciones geológicas que componen esta unidad son: Cerro Picacho (QPS-P), Cerro Viejo (PI/PS-CV), Playa Colorada (TM-PC); Grupos: La Yeguada (TM-Y), **Cañazas (TM-CA)**, en el cual se encuentra la **formación Tucué**.
 - Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, comprenden un conjunto de rocas efusivas, en su mayoría básicas y ultrabásicas, cuyas fisuras han sido en muchos casos selladas por la deposición de minerales secundarios. La calidad química de las aguas es generalmente buena. Las formaciones geológicas que componen esta unidad son las Perlas (TOM-LP), Soná (TEO-SO), Tribique (TEO-TRI), El Piro (TE-PI), Dacitas Loma Montuoso (K-LMda), Quebro (K-QUE); Grupos: San Pedrito (TM-SP), Majé (TO-MA), Playa Venado (K-VE).
 - Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, ampliados en ciertos tramos debido a la presencia de grietas, ensanchadas por efecto secundario de disolución por el agua a lo largo de los planos de estratificación. La calidad

química de las aguas es generalmente buena. La formación geológica que compone esta unidad es el Grupo geológico Changuinola.

- Áreas con acuíferos locales (intergranulares o fisurados) de productividad limitada o poco significativa: En este grupo se ubicaron todas las formaciones intrusivas, metamórficas y sedimentarias que se consideran con permeabilidad desde baja a muy baja. Se identifican tres (3) unidades hidrogeológicas:
 - Acuíferos constituidos por depósitos marinos generalmente de naturaleza clástica, con secciones ocasionales de origen bioquímico (calizas). Son acuíferos de permeabilidad baja y en ella se encuentran acuíferos locales continuos o discontinuos de productividad limitada (Caudal de 3 a 5 m³/h) La granulometría predominante de estos materiales es del orden de limos y arcillas. En estas formaciones se encuentran intercalaciones de basaltos y andesitas, Se puede obtener cierta producción en pozos individuales. La calidad química de las aguas es variable. Las formaciones geológicas asociadas son: Grupos: La Boca (TM-LB), Panamá fase Marina (TO-PA), Senosri-Uscari (TOSEus), Tonosí (TEO-TO); Formaciones Santiago (TM-SA), Culebra (TM-CU), Gatuncillo (TE-G).
 - Acuíferos locales constituidos por volcanitas, depósitos marinos y lacustres consolidados y no consolidados. La permeabilidad aquí se caracteriza por ser baja a muy baja, con acuíferos de baja producción (Caudal de 1 a 3 m³/h). Las zonas meteorizadas pueden funcionar como acuitardos. La calidad química de las aguas es variable desde, buenas hasta aguas salobres. Las unidades geológicas de esta categoría son los Grupos: Gatún (TM-GA), Caimito (TO-CAI), Chigüirí (TPA-CHI), Paraguito (K-PAR); Formaciones: Topaliza (TOM-TZ), Capetí (TO-CP), Chagres (TPL-Ch), Chucunaque (TPL-Chu), Charco Azul (TMPL-Chaz), Pedro Miguel (TM-PM), Cucaracha (TM-C), Las Cascadas (TM-CAS), Cuango (K-CG).
 - Acuíferos prácticamente ausentes, constituidos por intrusiones múltiples de composición variable, con una estructura masiva, afectada por una serie de fallas y una fisuración poco desarrollada. La ocurrencia de agua subterránea está limitada a la zona de meteorización o fracturación de las rocas sanas subyacentes. La calidad química de las aguas es buena. Los acuíferos acá son de muy baja producción (Caudal menor a 1 m³/h). Las unidades geológicas dentro de esta categoría son: Grupos: Tabasará (TMPL-TA), Colón (K-CO); Formaciones San Cristóbal (TPLCRI), Petaquilla (TO-PQ), Valle Riquito (TEO-RIQ), Loma Montuoso (K-LM), Armila (K-AR), Lovaina(K-LO).

11.1. HIDROLOGEOLOGÍA GRUPO CAÑAZAS- FORMACIÓN TUCUÉ

La formación Tucué hace parte del grupo Cañazas, el cual se extiende en gran parte del país y está conformado por basaltos fisurales en la parte más baja de la columna estratigráfica, seguida por andesitas, brechas y tobas, estos últimos están cubiertos o

intercalados con depósitos piroclásticos conformados por tobas arcillificadas y aglomerados rojizos con intercalaciones de rocas volcano-sedimentarias provenientes del continente.

Estos tipos de roca se caracterizan por ser compactas y masivas, además la alteración da como resultado capas arcillosas que varían de espesor. Por esta razón los acuíferos se limitan a las zonas que se encuentran fracturadas. La permeabilidad es variable y son moderadamente productivos, con un caudal entre 3-10 m³/h. (Autoridad Nacional del Ambiente de Panamá, 2010)

La calidad química de las aguas es generalmente buena. Con un promedio de sólidos disueltos de 138ppm, una conductividad eléctrica de 164 microhm y una temperatura de 25 °C. (ETESA, 1999)

11.2. HIDROGEOLOGÍA PANAMÁ FASE MARINA

El grupo geológico Panamá Fase marina que se originó durante el terciario está compuesto principalmente por depósitos marinos clásticos con algunas secciones marinas de origen bioquímico. Las rocas más comunes son calizas, conglomerados, lutitas, tobas y areniscas.

Los acuíferos se caracterizan por ser locales con una productividad limitada (Q= 3-5 m³/h). Según (ETESA, 1999) los pozos que fueron inventariados en el Grupo Panamá Fase Marina se reportan como improductivos ya que en promedio el caudal era de 4 m³/h. La calidad química de las aguas es variable.

11.3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

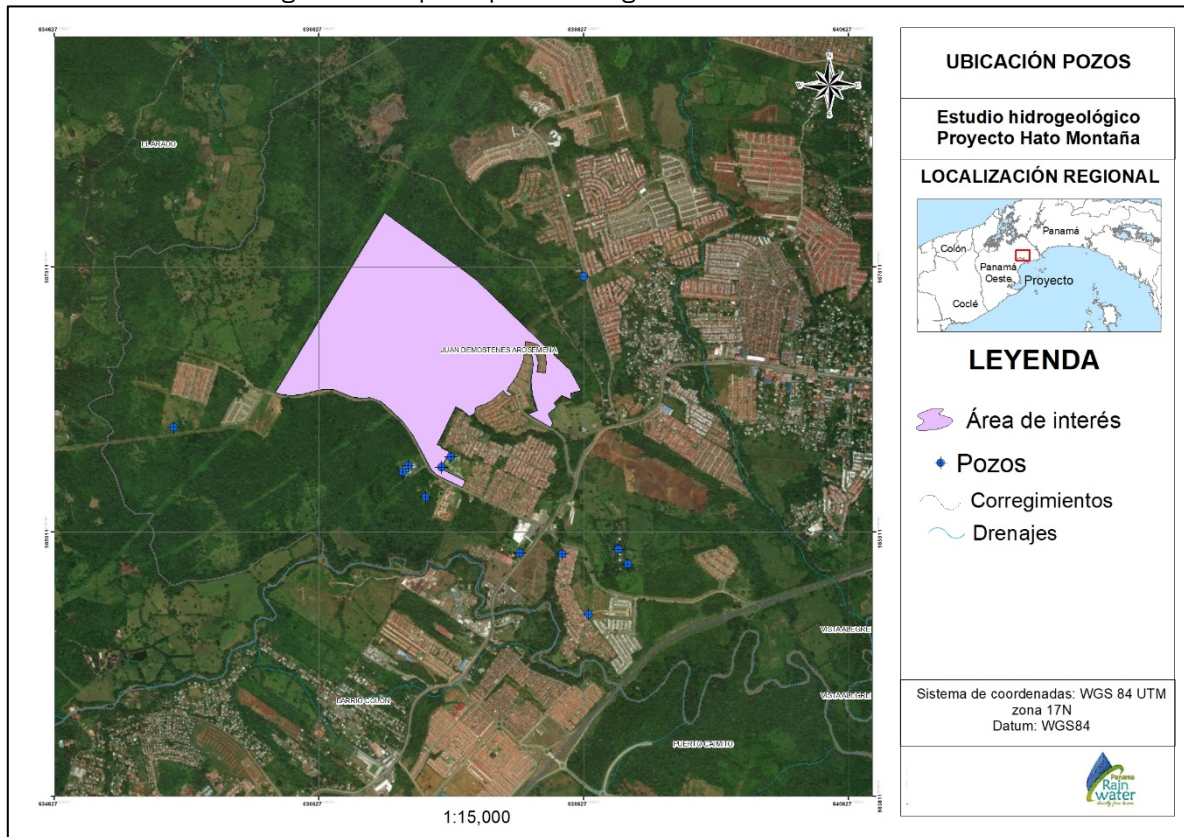
El conocimiento del recurso hídrico subterráneo de un acuífero o un sistema acuífero tiene como línea base el análisis hidrogeológico en un tiempo y espacio específico de las diferentes estructuras hidráulicas de captación (pozos profundos, aljibes o piezómetros) o el análisis de las surgencias naturales (manantiales) que aprovechan las aguas subterráneas. Para el presente estudio se realizó un recorrido dentro del área del proyecto Hato Montaña y áreas adyacentes al proyecto. El análisis de los datos recolectados tanto en campo en conjunto con información geológica y geofísica permite plantear de forma preliminar el funcionamiento de los acuíferos en la zona de estudio.

Se realizó entonces el inventario de puntos de agua de acuerdo con el Formulario Único Nacional para Inventario de Puntos de Agua Subterránea (FUNIAS) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia, que integra la ubicación geográfica de los puntos, profundidad del nivel estático, características constructivas de pozos o aljibes (profundidad, diámetro, diseño de construcción en el caso de pozos, columna litológica, método de explotación, características de la bomba,

etc), información que se encuentra gráficamente en la Figura 14, las generalidades de los puntos se pueden observar en la Tabla 66, con su respectivo anexo fotográfico.

Cabe notar que algunos de los puntos presentados a continuación no se encuentran dentro del área de estudio del Lote 2, sin embargo, hacen parte del estudio completo y son utilizados para los análisis pertinentes.





Figura 14. Mapa de puntos de agua inventariados.






Fuente: Panama Rainwater 2023

Tabla 6. Inventario de puntos de agua

Consecutivo	Tipo de punto	Coordenad a Norte	Coordenad a Este	Cauda l (ml/s)	Nivel (m)	Fotografía
POZO 1 (VERONA)	Pozo	986599	635531	605.7		
POZO 2 (PIAMONTE)	Pozo	986073	637434	2384.8	12.2	
POZO 3 (ROYAL PARK)	Pozo	985188	638665	946	6.1	

Consecutivo	Tipo de punto	Coordenad a Norte	Coordenad a Este	Cauda l (ml/s)	Nivel (m)	Fotografía
POZO 4 (Colegio Academia Latina)	Pozo abandonado	986263	637264	-	-	
POZO 5 (Colegio Academia Latina)	Pozo abandonado	986312	637304	-	3.5	
POZO 6 (Colegio María Auxiliadora)	Pozo	986299	637554	-	-	
POZO 7 (Colegio María Auxiliadora)	Pozo	986376	637627	-	-	

Consecutivo	Tipo de punto	Coordenad a Norte	Coordenad a Este	Cauda l (ml/s)	Nivel (m)	Fotografía
POZO 8 (Cerca Machetazo)	Pozo abandonado	985650	638146	-	-	
POZO 9 (Barriada las Villas)	Pozo abandonado	987741	638632	-	-	
POZO 10 (Finca Hato Montaña)	Pozo	985567	638965	-	-	
POZO 11 (Finca Hato Montaña)	Pozo abandonado	985677	638892	-	-	

Consecutivo	Tipo de punto	Coordenad a Norte	Coordenad a Este	Cauda l (ml/s)	Nivel (m)	Fotografía
POZO 12 (Detrás de Royal Park)	Pozo abandonado	985643	638466	-	-	

Fuente: Panama Rainwater, 2023.

11.4. DEFINICIÓN LOCAL DE LOS SISTEMAS ACUIFERO

Las unidades hidrogeológicas son, por definición, las formaciones geológicas que funcionan hidrogeológicamente como un conjunto en la entrada, salida y balances hidráulicos (Sanchez San Roman, SF). Para la caracterización de las unidades hidrogeológicas se utilizó la información primaria recolectada in situ, e información secundaria. La definición de cada unidad hidrogeológica se realiza considerando su capacidad para almacenar y permitir el flujo de agua subterránea, con el fin de identificar la presencia de acuíferos, de acuerdo con su potencial, y diferenciarlos de las unidades impermeables conforme una metodología adoptada en Colombia por el **Servicio Geológico Colombiano** a través de la metodología de zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia desde la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (ver Figura 15).

Figura 15. Definición de unidades hidrogeológicas

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS		
A. SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR.		
CONVENCIONES	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA PROMEDIO (L/S/M)
A1	Acuíferos continuos de extensión regional, de muy alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial. Acuíferos libres y confinados con agua generalmente de buena calidad química.	Muy Alta Mayor de 5.0
A2	Acuíferos continuos de extensión regional, de alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial, glaci-fluvial, marino y volcanoclastico. Acuíferos libres y confinados con agua de buena calidad química.	Alta Entre 2.0 y 5.0
A3	Acuíferos continuos de extensión regional de mediana productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial, glaci-fluvial, marino y volcanoclastico. Acuíferos generalmente confinados con agua de buena calidad química.	Media Entre 1.0 y 2.0
A4	Acuíferos discontinuos de extensión local de baja productividad, conformados por sedimentos cuaternarios y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente aluvial, lacustre, coluvial, eólico y marino marginal. Acuíferos libres y confinados con agua de regular calidad química.	Baja Entre 0.05 y 1.0
B. ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE Y A TRAVÉS DE FRACTURAS (ROCAS FRACTURADAS Y/O CARSTIFICADAS).		
CONVENCIONES	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA PROMEDIO (L/S/M)
B1	Acuíferos discontinuos de extensión regional de muy alta productividad, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas cretácicas, consolidadas de ambiente marino. Acuíferos generalmente confinados con agua de buena calidad química.	Muy Alta Mayor de 5.0
B2	Acuíferos continuos de extensión regional de mediana productividad, conformados por rocas sedimentarias y volcánicas piroclásticas de ambiente marino continental. Acuíferos libres y confinados con aguas de buena calidad química. Con frecuencia se encuentran fuentes termales asociadas a la tectónica.	Media Entre 1.0 y 2.0
B3	Acuíferos discontinuos de extensión regional y local, de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias y volcánicas, terciarias a paleozoicas consolidadas, de ambiente marino y continental. Acuíferos generalmente confinados con aguas de buena calidad química.	Baja Entre 0.05 y 1.0
C. SEDIMENTOS Y ROCAS CON LIMITADOS A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.		
CONVENCIONES	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA PROMEDIO (L/S/M)
C1	Complejo de sedimentos y rocas con muy baja productividad, constituidos por depósitos cuaternarios no consolidados de ambientes lacustres, deltaicos y marinos y por rocas sedimentarias terciarias a cretácicas poco consolidadas a muy consolidadas, de origen continental o marino. Almacenan aguas de regular a mala calidad química, aislada en las regiones costeras.	Muy Baja Menor de 0.05
C2	Complejo de rocas ígneo-metamórficas con muy baja a ninguna productividad, muy compactas y en ocasiones fracturadas, terciarias a precámbricas. Almacenan aguas de buena calidad química. Con frecuencia se encuentran fuentes termales asociadas a la tectónica.	Muy Baja a ninguna Menor de 0.05

Fuente: modificado de Servicio Geológico Colombiano, 2023

De acuerdo con la Figura 15, La formación Tucué que pertenece al grupo Cañazas en el área de interés se clasifica dentro de la Unidad Hidrogeológica B: rocas con flujo esencialmente y a través de fracturas (rocas fracturadas y/o karstificadas).

La subunidad hidrogeológica es la B3, ya que se considera que la Formación Tucué en el área de interés da origen a un acuitardo⁴, de extensión regional y local, porosidad secundaria, baja productividad y de carácter libre en las zonas donde la roca está aflorando a semiconfinado en profundidad.

12.ZONAS CON POTENCIAL DE RECARGA

⁴ Formación geológica que puede contener buenos volúmenes de agua, pero baja permeabilidad, lo que hace que sea difícil la circulación y la explotación.

La recarga de agua subterránea puede definirse como los ingresos o flujo de agua desde la zona no saturada hacia la zona saturada por debajo del nivel freático. La estimación de esta recarga se ha basado en metodologías que consideran diversos factores, como topografía, litología, cobertura del suelo, pendiente, estructuras geológicas, porosidad, espesor del suelo, patrón de drenaje y clima, entre otros. Sin embargo, estimar la recarga en cuencas hidrogeológicas sin estaciones o instrumentos de medición representa uno de los desafíos fundamentales en la hidrogeología aplicada. Por esta razón, para áreas extensas, se suelen utilizar métodos simples, como modelos de cálculo del balance hídrico.

El proceso para calcular el balance hídrico comienza con la definición de la zona de aplicación y sus límites, pudiéndose entonces calcular para una capa específica de un acuífero, para el sistema acuífero completo o para el sistema acuífero junto con la red de aguas superficiales, entre otros. También es esencial considerar las fronteras temporales, es decir, el inicio y la finalización del período al que se aplica el balance.

Dado que la precipitación se considera la materia prima para el ciclo hidrológico, es importante comprender los procesos que ocurren cuando el agua precipita:

Escorrentía superficial: El agua fluye libremente bajo la influencia de la gravedad, pudiendo tomar diferentes caminos, como evaporarse desde la superficie de cuerpos de agua como ríos, lagos y embalses. Retenerse en forma de nieve o hielo en lagos o embalses (escurrimiento superficial diferido) o fluir rápidamente hasta el mar (escurrimiento superficial rápido).

Evaporación: El agua que alcanza la superficie se evapora desde el suelo o el follaje de los árboles (intercepción). Cuando ocurren lluvias de corta duración en zonas boscosas, la "intercepción" puede devolver una parte significativa del agua precipitada a la atmósfera sin llegar al suelo.

Infiltración: Cuando el agua se infiltra, puede seguir varios caminos:

Evaporación: el agua se evapora directamente desde el suelo húmedo, el agua no interactúa con la vegetación que se ubica sobre él.

Transpiración: el agua que se infiltra es absorbida por las raíces de la vegetación. Una parte se retiene para su beneficio y la mayor cantidad es transpirada.

Escurrimiento subsuperficial: sucede cuando parte del agua infiltrada vuelve a la superficie antes de llegar a la zona saturada.

Escurrimiento subterráneo cuando el agua no se retiene ni se evapora, siendo llevada por la gravedad hasta la zona saturada.

La siguiente fórmula relaciona los procesos involucrados en la precipitación:

$$PP=ES+ETR+I$$

PP: Precipitación. **ES:** Escorrentía Superficial. **ETR:** Evapotranspiración real. **I:** Infiltración.

Cada parámetro está condicionado por diversos factores. Para el caso de la escorrentía superficial, es esencial comprender la intensidad de la precipitación y las propiedades del subsuelo, lo que se conoce como "Umbral de Escorrentía". Esto se debe a que un evento de precipitación podría no resultar en la generación de escorrentía. El umbral de escorrentía se refiere a la cantidad de precipitación a partir de la cual el suelo ya no puede absorber más agua, llevando a que esta fluya de manera dispersa sobre la superficie.

El método del número de la curva CN (Curve number) fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS, actualmente Natural Resources Conservation Service - NRCS) de Estados Unidos es un método con larga tradición hidrológica que todavía sigue vigente. El modelo se basa en calcular valores de retención potencial de humedad de los suelos previa a un aguacero, el cual corresponde al almacenamiento en milímetros (mm) que deber ser llenado por la precipitación incidente (**abstracción inicial**) antes de que se empiece a producir **escorrentía superficial**. Es también una manera indirecta de calcular la precipitación neta al restar a la precipitación incidente la cantidad de agua que debe almacenarse en el suelo. ((SCS), 1964)

Cuando se grafican los datos de precipitación acumulada, escorrentía de larga duración e intensidad de la lluvia sobre pequeñas cuencas, se puede demostrar que la escorrentía solo comienza después de que se ha acumulado algo de lluvia, y que la curva de precipitación acumulada se aproxima asintóticamente a una línea recta cuando el suelo se ha saturado, es decir ha alcanzado su máximo potencial de retención. El método de la curva se basa en estos dos fenómenos. La acumulación inicial de lluvia representa la intercepción y la infiltración antes del inicio de la escorrentía y se denomina **abstracción inicial**.

Para obtener los valores se combinan tres conjuntos de información básica y fundamental en la modelización y caracterización como son los usos del suelo o las coberturas superficiales, la topografía y las características de drenaje de los suelos. Con esta caracterización se calculan los valores de retención potencial de humedad de los suelos antes de un aguacero.

En este estudio se usa el número de la curva bajo las condiciones hidrogeológicas definidas por el grupo de suelo hidrogeológico, la cobertura o uso de suelo definido en la zona de estudio y las pendientes del terreno (Tabla 7), con el fin de hallar la recarga potencial de la unidad hidrogeológica presente en área definida. El valor CN (número de la curva del SCS) se obtiene haciendo coincidir el conjunto de clases correspondiente con cada valor de CN establecido por el SCS de acuerdo con la Figura 16.

Tabla 7. Capas utilizadas en ArcGIS para el cálculo de CN.

Capa	Tipo de capa
------	--------------

Curvas de nivel del área donde vaya a realizar el estudio o modelo de elevación digital.	Vectorial o raster
Usos del suelo	Vectorial
Tipos de suelo	Vectorial
Correspondencias para el uso de la tierra según el modelo CN	Excel

Fuente: Panama Rainwater, 2023.

Después de calcular el valor CN, se puede obtener el valor de la retención potencial máxima (S) mediante la siguiente ecuación.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

S: Abstracción inicial (retención potencial de humedad). **CN:** Número de curva.

Figura 16. Correspondencias para la obtención del número de curva CN.

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Barbecho R	≥ 3	77	68	89	93
Barbecho N	≥ 3	74	82	86	89
Barbecho R/N	< 3	71	78	82	86
Cultivos en hilera R	≥ 3	69	79	86	89
Cultivos en hilera N	≥ 3	67	76	82	86
Cultivos en hilera R/N	< 3	64	73	78	82
Cereales de invierno R	≥ 3	63	75	83	86
Cereales de invierno N	≥ 3	61	73	81	83
Cereales de invierno R/N	< 3	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres R	≥ 3	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres N	≥ 3	64	75	82	86
Rotación de cultivos pobres R/N	< 3	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos R	≥ 3	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos N	≥ 3	54	69	78	82
Rotación de cultivos densos R/N	< 3	52	67	76	79
Pradera pobre	≥ 3	68	78	86	89
Pradera media	≥ 3	49	69	78	85
Pradera buena	≥ 3	42	60	74	79
Pradera muy buena	≥ 3	39	55	69	77
Pradera pobre	< 3	46	67	81	88
Pradera media	< 3	39	59	75	83
Pradera buena	< 3	29	48	69	78
Pradera muy buena	< 3	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	≥ 3	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	≥ 3	39	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	≥ 3	33	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	< 3	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	< 3	35	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	< 3	25	50	67	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy clara		56	75	86	91
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) clara		46	68	78	83
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) media		40	60	69	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) espesa		36	52	62	69
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy espesa		29	44	54	60
Rocas permeables	≥ 3	94	94	94	94
Rocas permeables	< 3	91	91	91	91
Rocas impermeables	≥ 3	96	96	96	96
Rocas impermeables	< 3	93	93	93	93

Fuente: SCS, 1994

Dado que la retención potencial máxima (S) puede teóricamente variar entre cero e infinito, la ecuación muestra que el número de la curva (CN) puede oscilar desde cien hasta cero. En casos de áreas pavimentadas, donde S es cero, indica la ausencia de retención para esa cobertura de tierra y CN alcanza 100, señalando que cualquier cantidad de lluvia acumulada se transformará en escorrentía. En contraste, para suelos planos y altamente permeables, S asume valores altos, y CN tiende a cero, indicando que la mayor parte de la lluvia se infiltrará, y solo una fracción será escorrentía.

La aplicación de la ecuación que relaciona el número CN con la retención máxima potencial S permite generar un mapa que ilustra la capacidad del suelo para retener agua de lluvia antes de saturarse y convertirse en escorrentía. La saturación del suelo posibilita que parte de esta agua recargue el acuífero. Sin embargo, es importante notar que aunque la retención máxima potencial S se expresa en milímetros, no implica necesariamente que el valor de recarga del acuífero sea constante; este también depende de la cantidad total de lluvia anual y de tres factores adicionales del suelo: la capacidad de campo (CC), que indica la cantidad de agua que el suelo puede retener después de saturarse y drenarse libremente, evitando la evapotranspiración hasta que el potencial hídrico se estabilice (después de 24 a 48 horas de la lluvia); el punto de marchitez (PM), que señala el punto donde las plantas pierden la capacidad de succión y continúan perdiendo agua mediante la transpiración y, por último, el espesor radicular, que representa la profundidad de las raíces de las especies en la región de interés. La diferencia entre CC y PM determina el volumen de agua disponible para las plantas, es decir, la cantidad que puede ser evapotranspirada; cuanto mayor sea esta diferencia, menor será la cantidad de agua que se infiltrará en el acuífero.

12.1. Grupo de suelo hidrogeológico

Las características del suelo desempeñan un papel crucial en la generación de escorrentía y, en la infiltración del recurso hídrico en el acuífero. Este parámetro se divide en cuatro grupos, los cuales conforman la base cualitativa para la clasificación de todos los suelos, por ejemplo, los suelos arcillosos influyen significativamente en la capacidad de retención del agua. La distribución de los suelos guarda una estrecha relación con la topografía; encontrándose depósitos de suelo delgados y aislados en las zonas montañosas, mientras que, en áreas relativamente planas, los depósitos de suelo son más gruesos y están mejor desarrollados. Sin embargo, la acumulación densa de depósitos de suelo fino granular puede reducir la tasa de percolación.

En la tabla 8 se listan los cuatro tipos de suelos según sus parámetros hidráulicos.

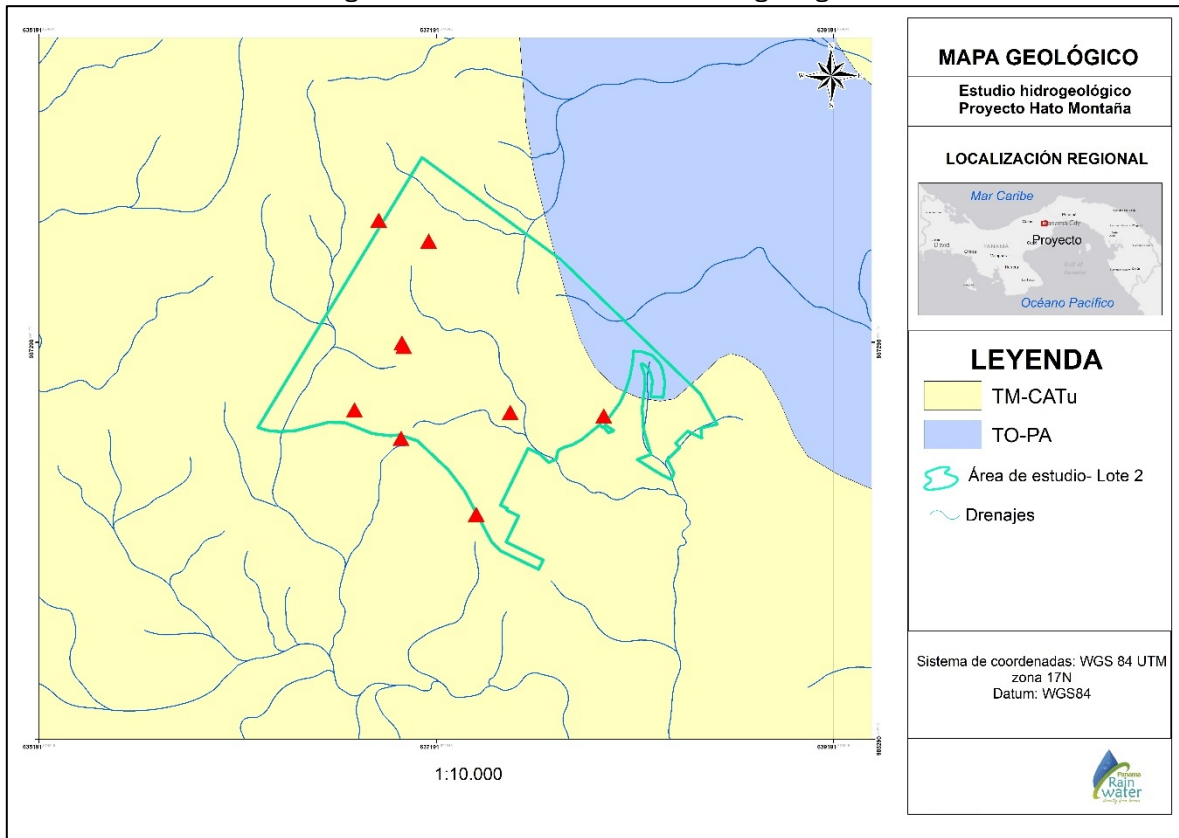
Tabla 8. Tipos de suelo hidrogeológico.

Tipo de suelo	Características
A	Suelos en los que el agua se infiltra rápidamente, aun cuando estén muy húmedos. Profundos y de texturas gruesas, son suelos con materiales pedregosos, arenosos o areno-limosos: están excesivamente drenados.
B	Suelos con mezcla de materiales finos y muy finos como arenas y arcillas y con textura franco-arenosa, franca, franco-arcillosa o franco-limosa. Están bien o moderadamente drenados.
C	Suelos con predominio de materiales muy finos (arcillas y limos) aunque pueden ir mezclados con otros materiales algo más gruesos (arenas). Su textura es franco-arcillosa, francoarcillo-limosa o arcillo-arenosa. Son suelos con poca profundidad lo que los hace que sean imperfectamente drenados.
D	Son suelos con mucho contenido de materiales muy finos (arcillas y limos) de muy poca profundidad o con rocas aflorantes. En esta categoría se incluyen las láminas de agua terrenos encharcados (marismas, etc.) y zonas con superficies impermeables (ciudades, carreteras).

Fuente: SCS, 1994

Según el mapa geológico de Panamá, escala 1:250.000 hay una unidad geológica presente en el área de interés. Se definen así un acuífero y una unidad hidrogeológica: Grupo Cañazas- Formación Tucué y Panamá Fase Marina definidas como rocas con flujo esencialmente y a través de fracturas (rocas fracturadas y/o karstificadas), y clasificadas como Unidad hidrogeológica B3. Teniendo en cuenta esto la Unidad hidrogeológica B3 se clasifica como suelo hidrogeológico C ya que el material es una mezcla entre materiales finos y muy finos.

Figura 19. Clasificación de suelo hidrogeológico



Fuente: Panama Rainwater, 2023

12.2. Cobertura/Uso de suelo

El uso de la tierra representa las condiciones de la superficie y está relacionado con el grado de cobertura, así como con el tratamiento de la tierra. Se aplica principalmente a usos agrícolas, incluye prácticas mecánicas como terraceo, y prácticas de manejo como rotación de cultivos, control de pastoreo o quema.

La cobertura vegetal y usos del suelo del área de interés desempeñan un papel importante en la regulación del ciclo hidrológico, y a su vez en la recarga de los acuíferos. La presencia de asentamientos humanos constituye una forma de cobertura terrestre que afecta el proceso de recarga, generando un impacto negativo al ralentizar dicho proceso. Las infraestructuras construidas por el hombre, como terraplenes, edificaciones y carreteras crean un terreno compactado que sella la superficie del suelo, obstaculizando la recarga natural del agua. Por otro lado, la presencia de vegetación afecta positivamente la tasa de infiltración al suelo y, por ende, la recarga de agua a los acuíferos.

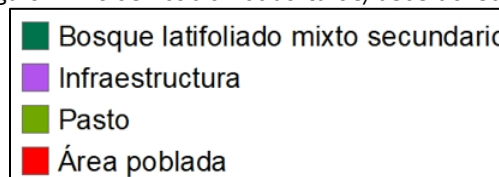
El SCS (1964) dice que una mayor cobertura vegetal conlleva beneficios como una mayor tasa de evapotranspiración, lo que reduce las posibilidades de percolación hacia capas subsuperficiales. Sin embargo, existen procesos contradictorios como:

- La alteración bioquímica de las superficies del terreno ya sea suelo o roca, causada por las raíces y organismos.
- Retención de agua debajo de la zona vegetal evitando su evaporación directa.
- La capacidad que tienen las plantas para mantener el suelo en su lugar, previniendo la erosión ante el aumento del flujo de agua superficial.

En resumen, la cobertura vegetal se considera un factor positivo para mejorar la tasa de recarga de acuíferos.

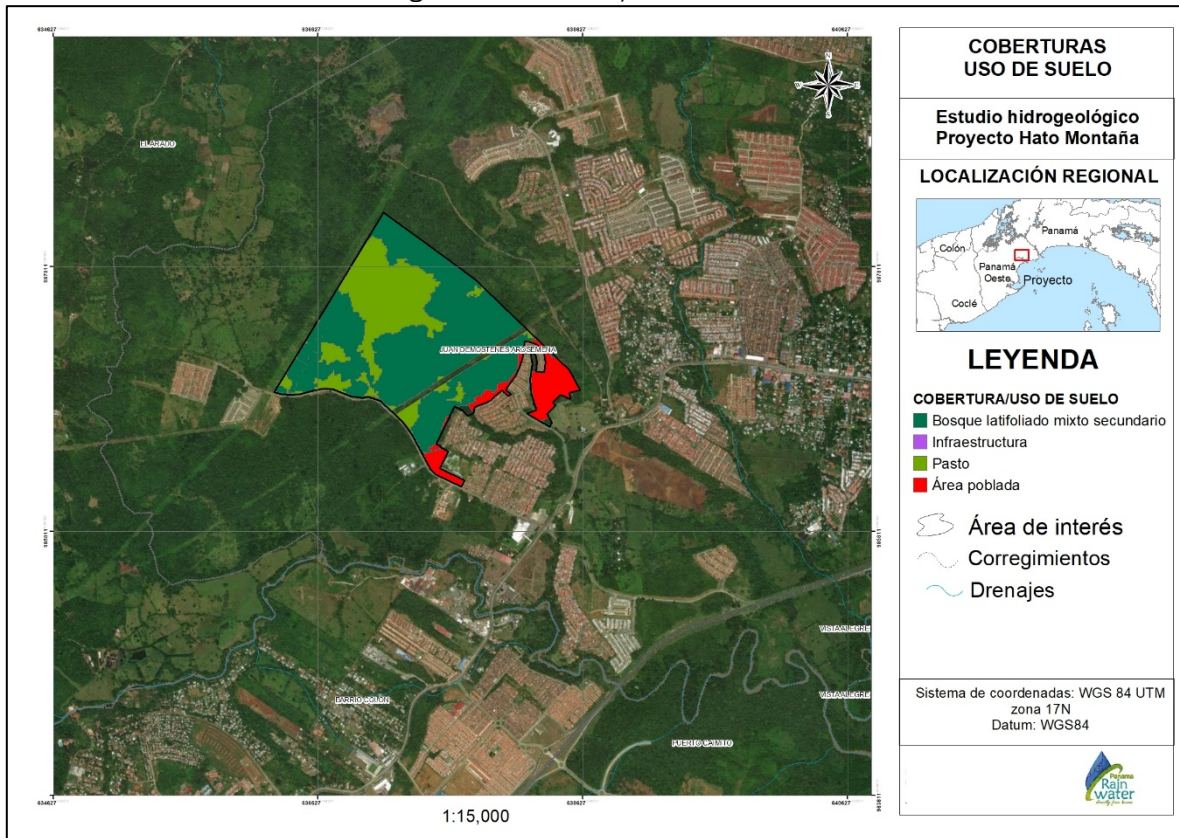
Las coberturas identificadas en el área de estudio fueron tomadas del mapa disponible en ArcGIS “Panama Forest Cover and Land Use 2021” (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2021). La Figura 17 y Figura 18 muestran la clasificación que se tiene para el área de estudio.

Figura 17. Clasificación coberturas/ usos del suelo.



Fuente: Ministerio de Ambiente de Panamá, 2021

Figura 18. Cobertura/ usos del suelo



Fuente: Adaptador por Panama Rainwater del Ministerio de Ambiente de Panamá, 2021.

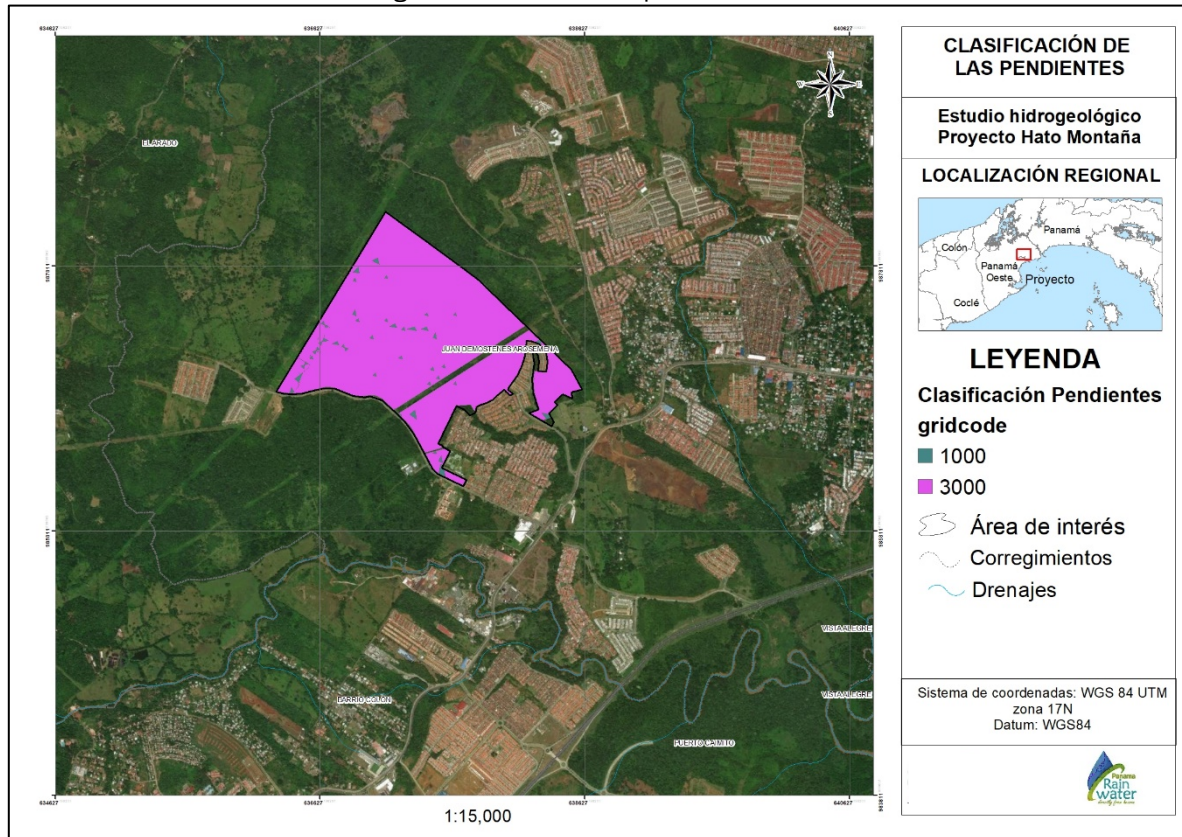
12.3. Pendientes

La clasificación de las pendientes del terreno es importante ya que influencia directamente el movimiento y la distribución del agua por el suelo. La infiltración es uno de los aspectos que cambia según la pendiente, ya que en terrenos con mayor inclinación el agua fluye más fácil y no tiene casi tiempo para infiltrarse, mientras que en terrenos planos hay más tiempo para que el agua pueda infiltrarse. Las pendientes también controlan la dirección en la que se mueve el agua ya que estas influyen los patrones de drenaje y así mismo pueden dirigir el agua a lugares de recarga. Finalmente, en terrenos con mayor inclinación la susceptibilidad a la erosión y a la ocurrencia de procesos en masa es mayor, con esto la capacidad del suelo puede disminuir y así mismo su capacidad para retener el agua.

Para las condiciones americanas, la SCS relacionó el valor de CN con varios complejos de Cobertura Hidrogeológica del Suelo. Todos los modelos anteriores para determinar Números de Curvas tienen en común que la pendiente no es uno de los parámetros. La razón es que, en Estados Unidos la tierra cultivada en general tiene pendientes inferiores al 5%, y este rango no influye en gran medida en el valor de la curva, sin embargo, en

las condiciones colombianas, las pendientes varían mucho más. Para esto las pendientes son calculadas en porcentaje y se reasigna un valor de 1000 para pendientes menores al 3% (<3%) y un valor de 3000 para las pendientes mayores a un 3% (>3%).

Figura 19. Clasificación pendientes CN.



Fuente: Panama Rainwater, 2023.

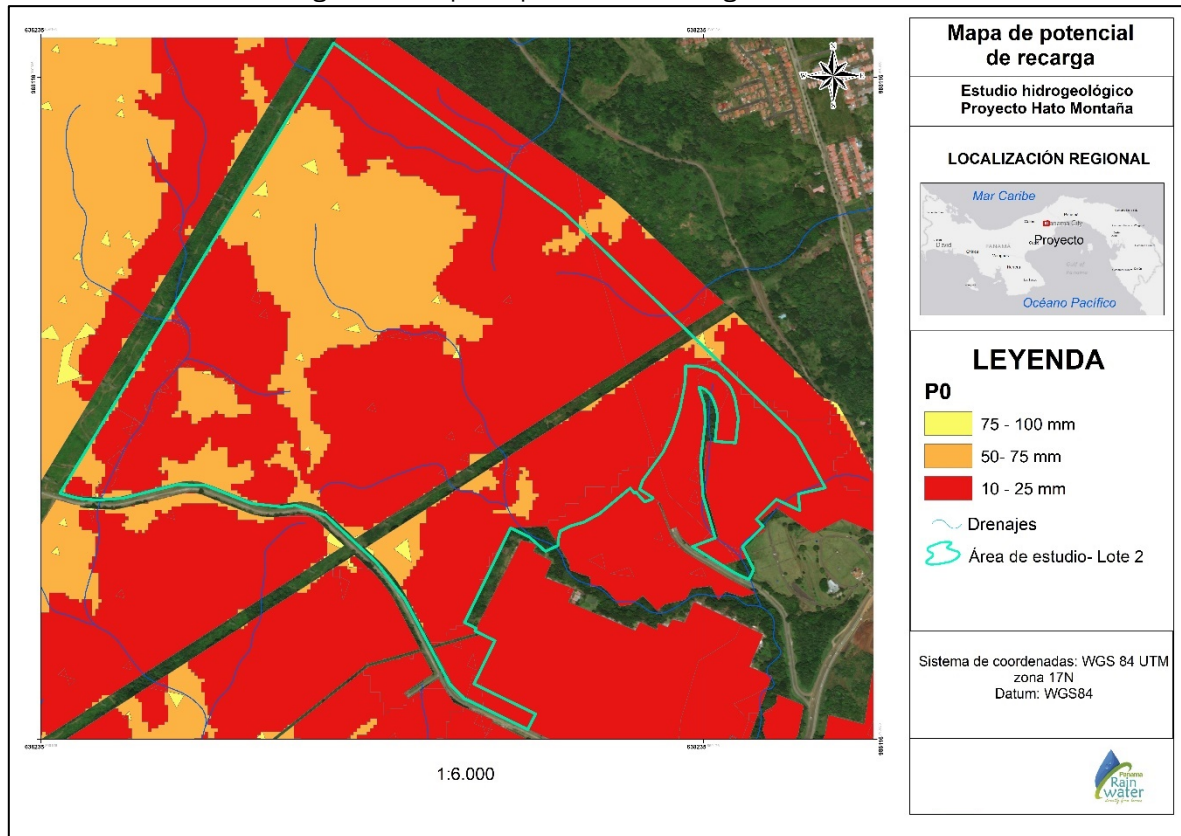
Para el área del proyecto se puede observar que la mayor extensión de área las pendientes son mayores a 3%. Como se explicó en el capítulo de GEOMORFOLOGÍA la característica principal de esta zona son las colinas de pendientes inclinadas y suelos poco desarrollados. Mientras que las pendientes bajas se concentran en cercanías del Río Caimito.

13.RESULTADOS

Para el área de estudio se encuentra en la subunidad hidrogeológica B3, correspondiente a la Formación Tucué, estos suelos son clasificados como tipo C, los cuales están conformados por materiales finos y muy finos que generan un suelo imperfectamente drenado, adicionalmente las coberturas en estas zonas son área pobladas (construcciones de viviendas o colegios) o están conformadas por bosques

mixtos secundarios con pendientes altas y pastos. Los valores se encuentran más altos de acumulación se encuentran entre 50 y 100 mm, los cuales se relacionan directamente con la cobertura de pastos, encontrándose los valores mas altos (75-100 mm) en los lugares en donde las pendientes son menores al 3%. Los valores más bajos se encuentran distribuidos en zonas en donde hay construcciones o la cobertura es clasificada como bosque secundario mixto (10-25mm)

Figura 20. Mapa de potencial de recarga del acuífero.



Fuente: Panama Rainwater, 2023

14. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Todas las técnicas de análisis geofísicas intentan identificar o reconocer los espesores y las composiciones de las formaciones geológicas que se encuentran en profundidad, mediante algún parámetro físico. Para el caso de este estudio, se realizó la obtención de esta información a través de la medición de la resistividad de los materiales. Para tal fin, existen diversas técnicas geofísicas eléctricas que miden la resistividad de los materiales, entre ellas, los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), siendo uno de los más utilizados por su sencillez y la relativa economía de los equipos para su aplicación. El objetivo que se pretende alcanzar con esta técnica consiste en delimitar las múltiples y/o diferentes capas en el subsuelo, obteniendo sus espesores y resistividades; para luego realizar la interpretación, en donde se identifica el tipo de roca que constituyen las capas del subsuelo de acuerdo con su valor de resistividad.

14.1. ADQUISICIÓN

El método geoeléctrico más utilizado hasta el día de hoy por su simplicidad y costo es el Sondeo eléctrico Vertical (SEV), el cual se aplicó en la campaña de campo; en donde se realizaron nueve (9) SEVs dentro del área de interés del proyecto; los cuales se ubicaron estratégicamente para abarcar un área representativa y determinar los espesores de las unidades en el subsuelo y los estados de saturación de estas. Todos los SEVs fueron georreferenciados con GPS, coordenadas UTM 17 Norte, y se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Dirección de los arreglos geoeléctricos **perpendiculares a los drenajes del área** en las zonas donde la vegetación lo permitió.
- Zonas amplias donde se pueda tener aperturas totales de electrodos de hasta 1.000 metros lineales.
- En lo posible, zonas planas o donde no hubiera más de 20 m de desnivel entre electrodos de corriente, para que el método tuviera más precisión, sin embargo, este punto no se pudo cumplir debido a las pendientes del terreno.
- Cubrir el área de interés general.

El método de resistividad eléctrica trabaja a través de la medida de diferencia de potencial en puntos sobre la superficie de la tierra. Estas diferencias son producidas por flujo de corriente directa a través del subsuelo y el grado al cual el potencial en superficie es afectado depende del tamaño, geometría, localización y conductividad del material que conforma la sección investigada. La corriente es inyectada al subsuelo por medio de dos electrodos y se mide la diferencia de potencial entre un segundo par de electrodos colocado en línea entre los primeros. A partir de los valores de diferencia de

potencial, la corriente aplicada y también la separación de electrodos, se puede calcular una cantidad denominada “Resistividad Aparente”.

En un suelo homogéneo ésta corresponde a la verdadera resistividad, y en un suelo heterogéneo usualmente representa una especie de promedio de las resistividades de todas las formaciones a través de las cuales la corriente pasa. Es la variación de esta resistividad aparente con el cambio en la posición o espaciamiento de los electrodos, la que proporciona información acerca de las variaciones en la estructura del subsuelo.

Siguiendo la Ley de Ohm para un circuito eléctrico la resistencia está dada por $R = V/I$, donde V e I son la diferencia de potencial a través de un resistor y la corriente pasando a través de este, respectivamente. Esto puede ser escrito alternativamente en términos de la fuerza del campo eléctrico (E; volts/m) y la densidad de la corriente (J; amps, m²) como:

$$\rho = \frac{VA}{IL} (\Omega m) \quad \rho = E / J (\Omega m)$$

Donde:

ρ : es la resistividad eléctrica

A: Es el área transversal al flujo de corriente

L: Es la distancia entre electrodos de corriente

V: Es la diferencia de voltaje

I: Flujo de corriente eléctrica

Para un arreglo de dos electrodos de corriente en un suelo homogéneo, los cuales generan un circuito eléctrico, la corriente fluirá del electrodo positivo al negativo. Si AB es la distancia entre el electrodo A y el electrodo B (ambos de corriente), podemos medir la diferencia de potencial entre dos puntos M y N ubicados en superficie mediante un voltímetro. Siendo AM, BM, AN y BN la distancia entre los electrodos.

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

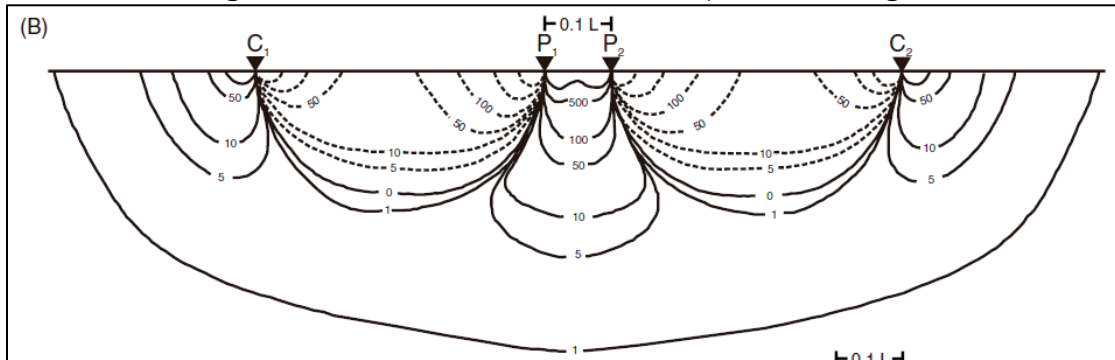
Despejando la resistividad:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}$$

Se eligió el arreglo de Schlumberger en el trabajo de campo para la adquisición, con 2 electrodos de corriente AB y otros dos electrodos de potencial MN estos últimos ubicados entre AB formando un arreglo lineal. El arreglo tipo Schlumberger tiene una

resolución vertical casi tan alta, pero la forma de la contribución de la señal en profundidad es cóncava hacia arriba con una mejor penetración de profundidad (ver Figura 21). El registro fotográfico se presenta en el ANEXO 2: Registro fotográfico.

Figura 21. Sección de contribución de señal para Schlumberger



Fuente: Reynolds, (2011).

Los datos de campo fueron tomados con un equipo geofísico versátil (Fotografía 1) de acuerdo con una configuración simétrica de electrodos tipo Schlumberger debido a su flexibilidad en campo lo que permite modificar la separación de los electrodos AB de corriente dejando en el mismo sitio los electrodos MN de potencial, lo cual agiliza el trabajo en campo.

Fotografía 1. Equipo GEOPHYSICAL WDDS – 2/2B.



Fuente: Panama Rainwater, 2023.

Las aperturas para los electrodos de corriente AB/2 se iniciaron con una separación de 1.5 metros y se incrementó progresivamente la distancia de separación hasta 500

metros AB/2 en el mejor de los casos, para poder asegurar una profundidad de investigación de 400 metros. La separación inicial de electrodos de potencial MN utilizada fue de 0.5 m y la máxima de 50 metros. Los voltajes medidos entre MN tienden a disminuir debido al progresivo decrecimiento del gradiente de potencial con el incremento de la separación de los electrodos de corriente, por esta razón se debe cumplir que la apertura entre los electrodos de potencial MN debe ser menor a 1/5 de AB/2 pero mayor a 1/20 de AB/2 (Reynolds, 2011). En la Tabla 8 se muestran ubicados por coordenadas UTM WGS 84 zona 17N los 9 SEVs.

Tabla 8. Coordenadas de los SEVS, UTM17N.

Punto	Norte	Este	Altura	Dirección	AB/2
SEV 03	986808	637015	107	N95W	300
SEV 06	987906	636902	118	N20E	350
SEV 10	986424	637393	75	N15W	400
SEV 19	986920	638035	47	N50E	300
SEV 21	986946	636769	127	N90W	500
SEV 26	986938	637564	68	N50E	350
SEV 32	987270	987270	95	N3E	500
SEV 33	987288	637019	98	E-W	500
SEV 34	987801	637154	118	N50W	400

Fuente: Panama Rainwater, 2023.

14.2. PROCESAMIENTO

De manera general, el procesamiento de los SEVs requiere los siguientes pasos:

a) Almacenamiento de datos

Después de la adquisición de los datos en campo, se almacenan en un disco duro para posteriormente ser procesados en el software Ipi2win®.

b) Revisión de datos

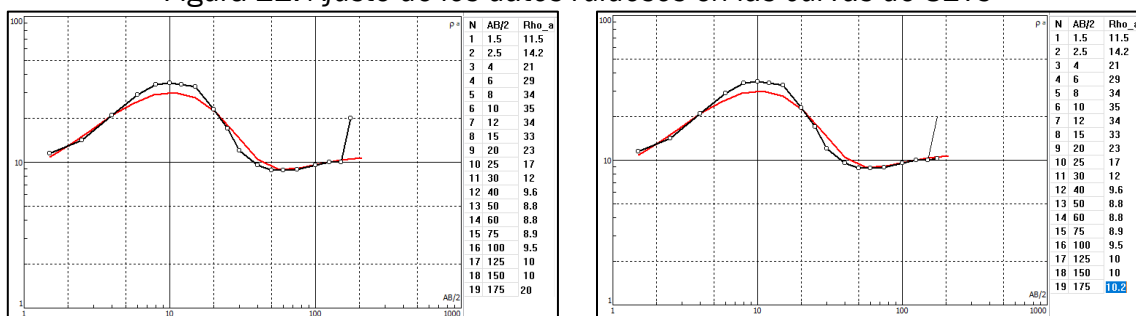
A partir de los datos obtenidos en campo, y sin ningún tipo de tratamiento, se procede a verificar la información en el software de procesamiento. No obstante, se puede realizar una revisión casi instantánea al momento en el que se están corriendo los sondeos, basta con ir graficando los valores de resistividad que se van obteniendo (curva de campo).

Los datos fueron analizados en el software Ipi2win, en el cual se grafican los puntos de resistividad aparente en una gráfica log-log para ambos ejes, el eje x corresponde a la distancia AB/2, y el eje Y corresponde a la resistividad en Ohm-m.

c) Eliminación de puntos erróneos

El primer paso es analizar la curva de campo de los valores de resistividad aparente. Debe ser una curva suave para el caso de más de una capa, ya que la resistividad aparente a cualquier profundidad $AB/2$ es la resistividad promedio de todas las capas por las que pasa la corriente. Los datos ruidosos se pueden reconocer fácilmente ya que los puntos de datos incorrectos no se ajustan a la curva suavizada. Estos puntos de datos anómalos se pueden correlacionar con los datos normales, para que se ajusten adecuadamente a la curva patrón (ver Figura 22).

Figura 22. Ajuste de los datos ruidosos en las curvas de SEVs



Fuente: GeoAndes Consulting, 2023.

d) Obtención de resultados

Una vez ajustados todos datos, el siguiente paso es realizar la inversión de los puntos de datos, proceso ejecutado por alguien que haya estado en el área de estudio, específicamente en el sitio donde tuvo lugar cada SEV, debido a que podría haber decenas de modelos que se ajusten a la misma forma de la curva. Básicamente, hay tres formas de interpretar los SEVs: cualitativamente, analizando la forma de las curvas; semicuantitativamente, con curvas maestras o ábacos; y cuantitativamente, con modelado por computadora.

El primer paso de cualquier interpretación de las curvas de resistividad aparente es observar la forma de la curva. Se puede inferir que el número mínimo de capas identificadas es igual al número de puntos de inflexión en la curva más uno. La presencia de puntos de inflexión indica interfaces subterráneas, por lo que el número de capas reales debe ser uno más que los límites entre ellas. Sin embargo, las coordenadas de los puntos de inflexión de ninguna manera indican la profundidad del límite o la resistividad verdadera. Solo a partir de la forma de la curva, se puede estimar el número mínimo de capas horizontales y las magnitudes relativas de las respectivas resistividades.

Después de este primer enfoque cualitativo, y la primera estimación del número de capas y resistividades, el siguiente paso es la comparación de curvas por computadora, donde existe un método de convolución que calcula curvas maestras para sondeos eléctricos verticales. Este método se conoce como "filtro lineal digital". Las curvas de campo y modelo se muestran simultáneamente produciendo parámetros estadísticos, como el error RMS para describir la proximidad del ajuste. Es importante resaltar que no siempre el modelo con menos error es el modelo real, ya que hay que tener en cuenta el contexto geológico. Los datos de cada SEV se presentan en el ANEXO 3: Datos geofísica.

e) Conversión de datos y generación fichas técnicas de la información

Finalmente, se exportan las imágenes en los formatos que se requirieron para su posterior análisis e interpretación, y se genera el modelo de presentación final de la información.

14.3. INTERPRETACIÓN

Para la interpretación geofísica de cada SEV, se tuvo en cuenta la división realizada por lotes en donde para el área de interés realizaron 9 sondeos.

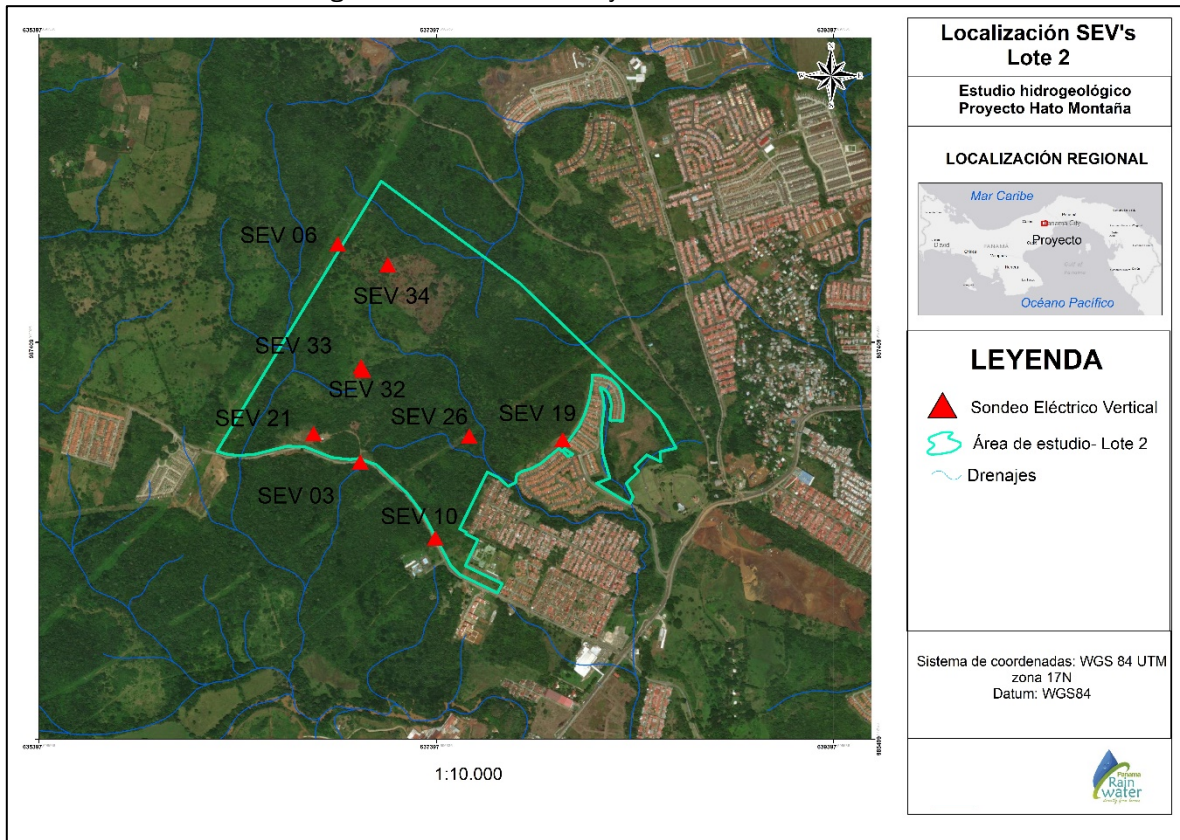
Los SEVs se analizan bajo el supuesto de que cuanto más cercano sea el SEV, mayor es la probabilidad de tener una capa geoeléctrica similar debido al hecho de que las unidades geológicas tienen una extensión regional en el espacio, y no deberían variar en gran manera para distancias relativamente cercanas.

A continuación, se presenta el análisis de los resultados realizado para cada lote teniendo en cuenta cada sev realizado y su correlación. El ANEXO 3: DATOS GEOFISICA presenta todos los datos recolectados en campo y los resultados interpretados a partir de los sevs.

Área de Interés

Para el área de interés realizaron nueve (9) sondeos, tal y como se puede ver en la Figura 23.

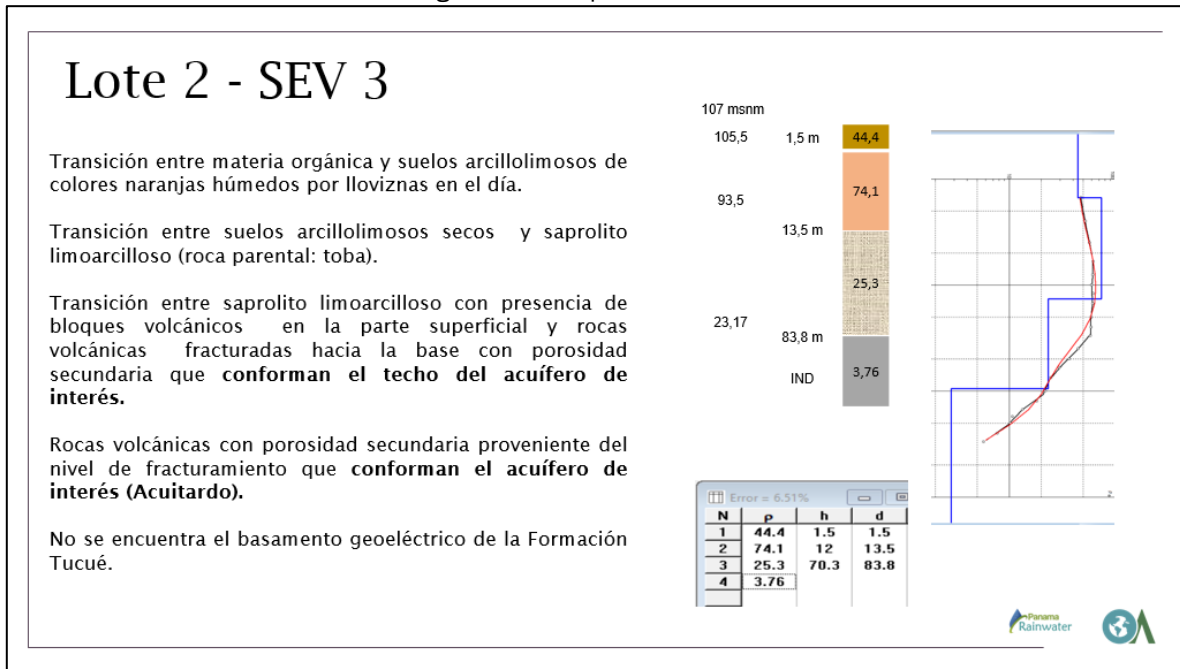
Figura 23. Área de Interés y ubicación de los SEVS



Fuente: Panama Rainwater, 2023.

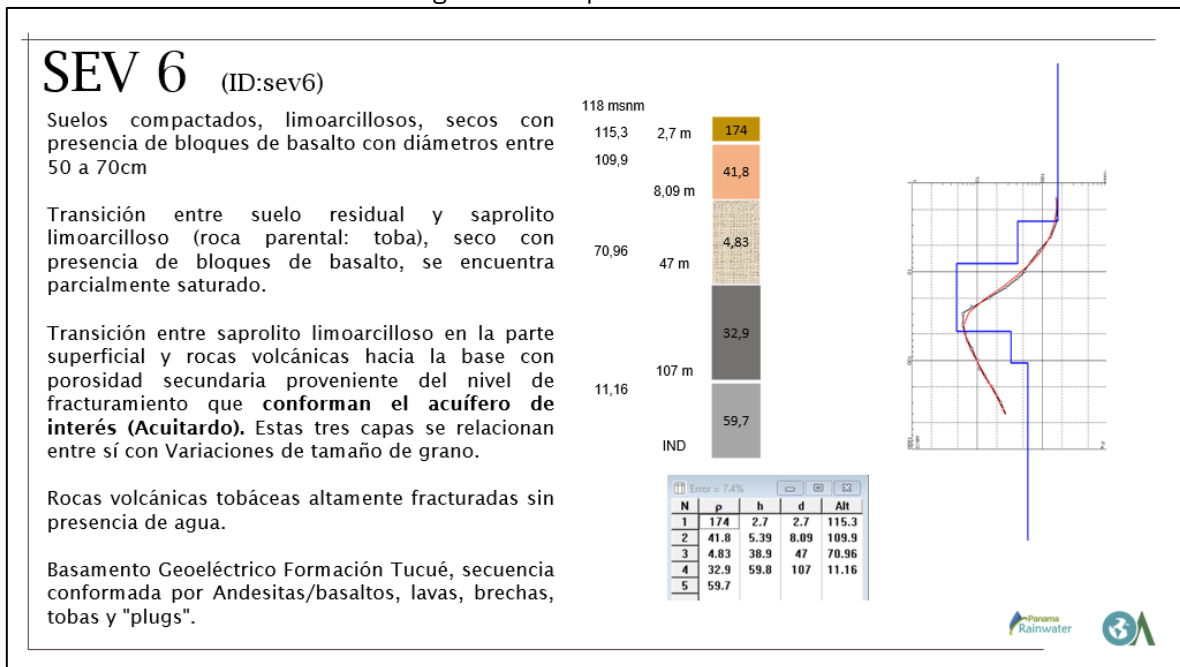
A continuación, se presenta la descripción de las capas que fueron encontradas en cada uno de los SEVs analizados.

Figura 24. Interpretación SEV 3



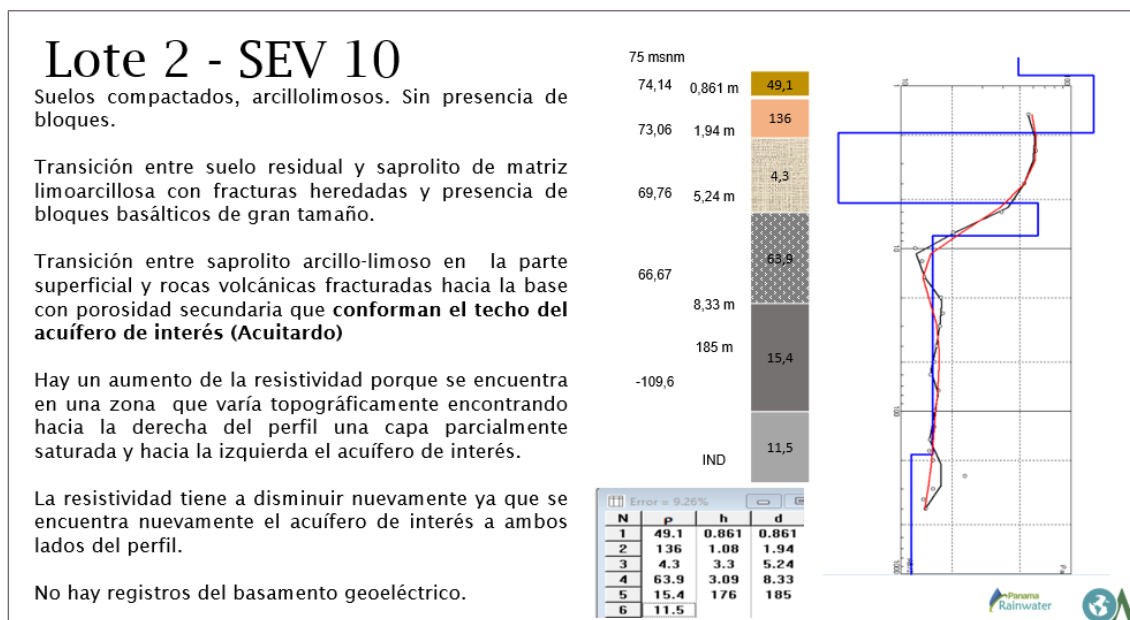
Fuente: Panama Rainwater, 2023.

Figura 25. Interpretación SEV 6.



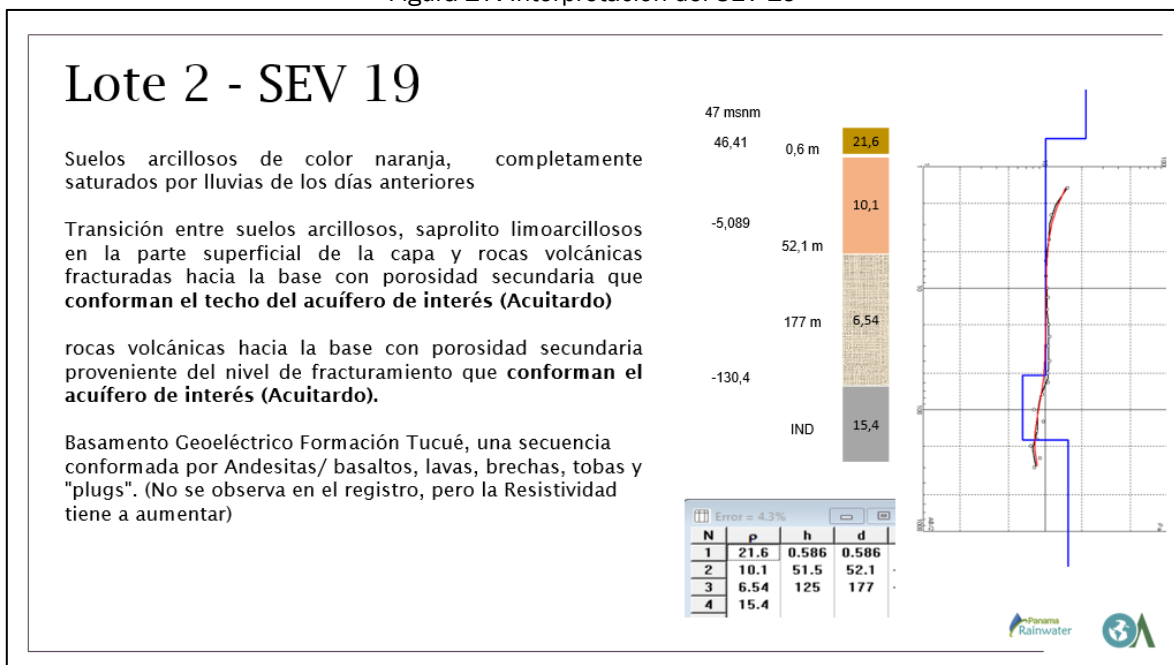
Fuente: Panama Rainwater, 2023.

Figura 26. Interpretación SEV 10



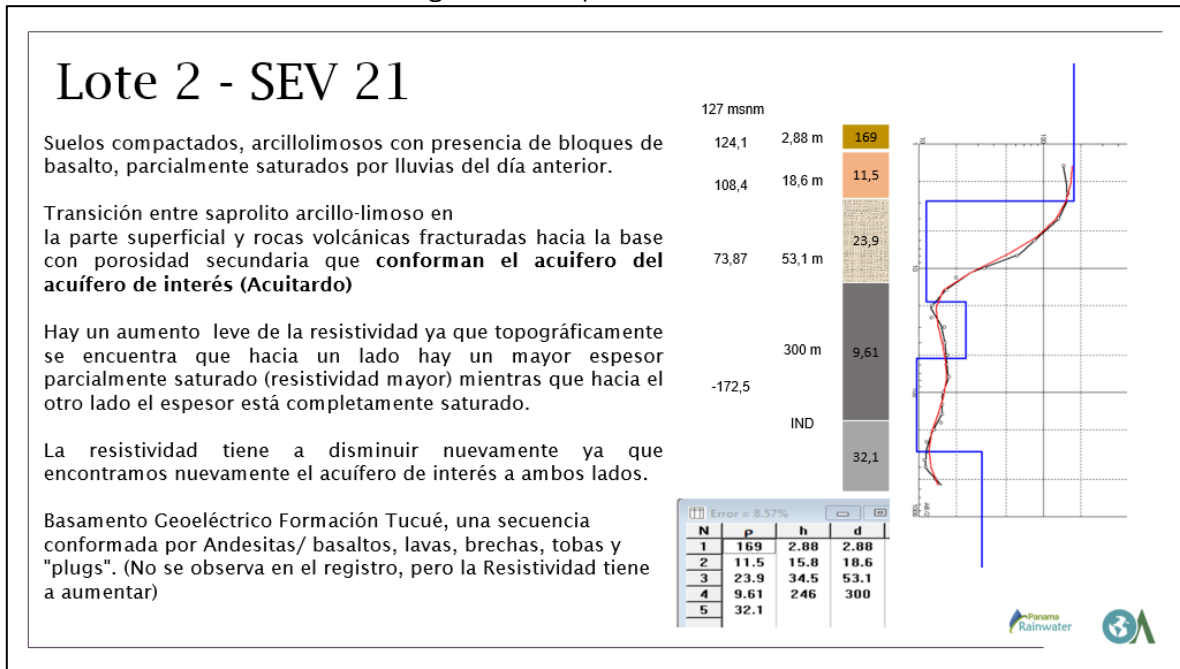
Fuente: Panama Rainwater, 2023.

Figura 27. Interpretación del SEV 19



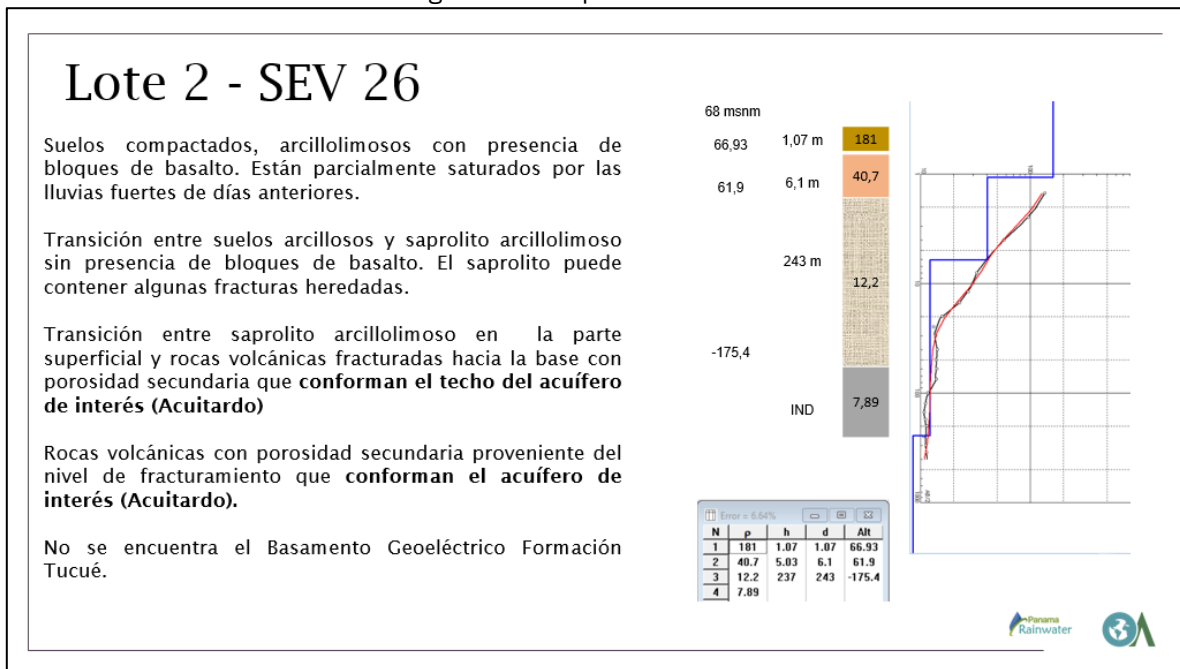
Fuente: Panama Rainwater, 2023.

Figura 28. Interpretación SEV 21



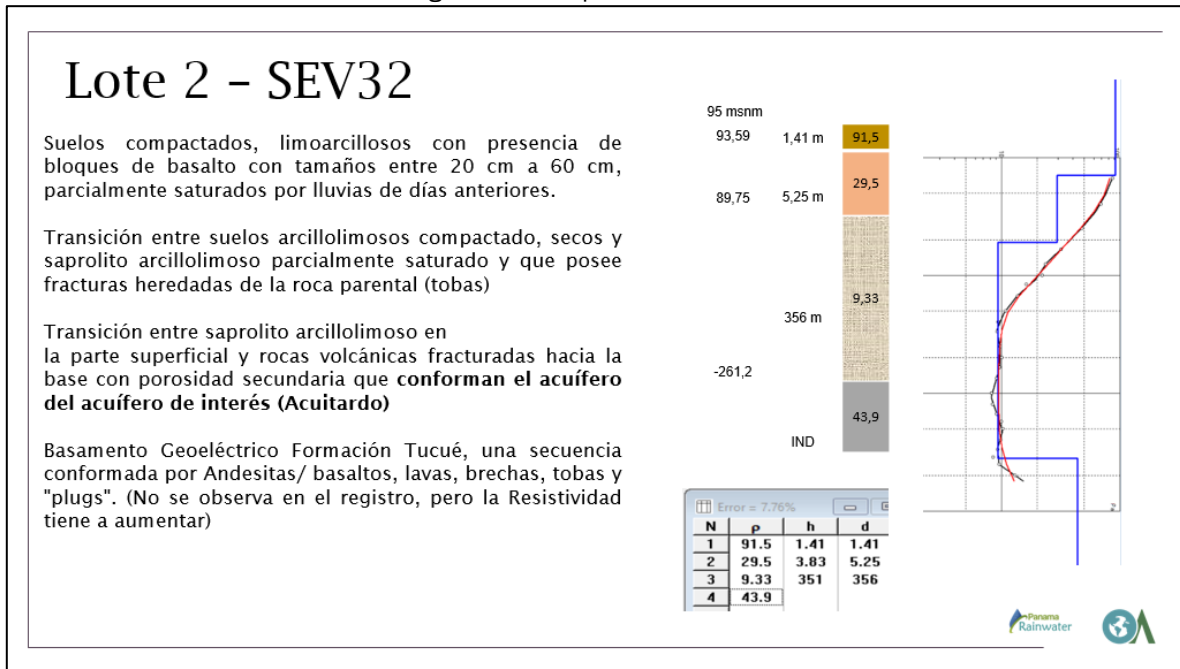
Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 29. Interpretación SEV 26



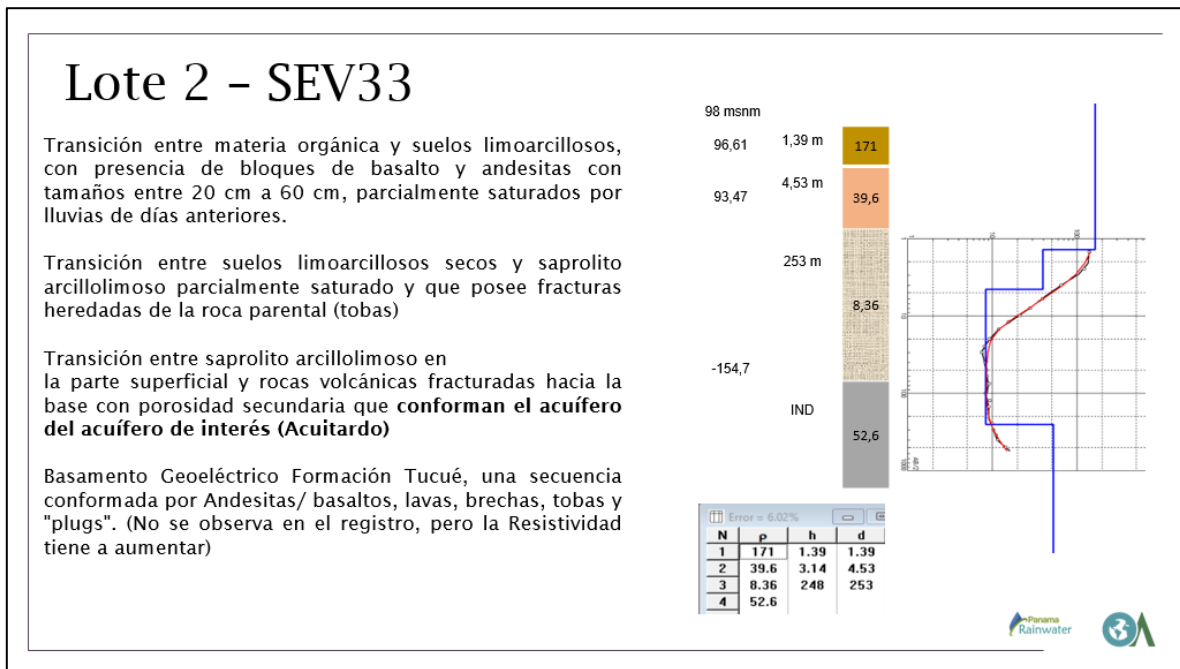
Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 30. Interpretación SEV 32



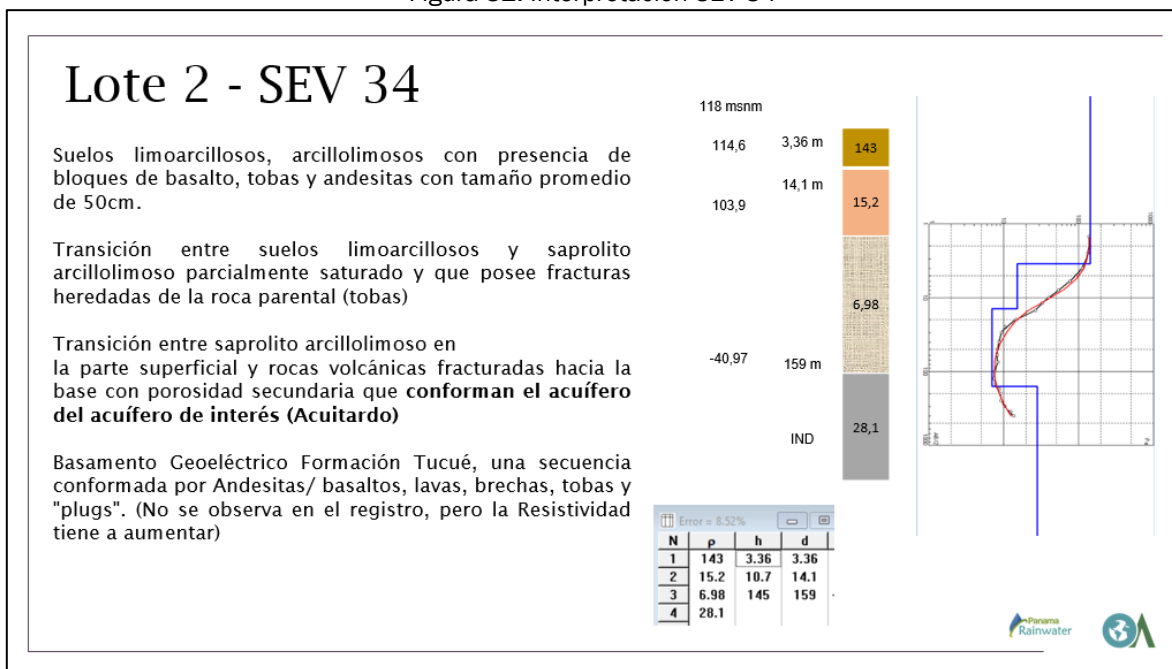
Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 31. Interpretación SEV 33



Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 32. Interpretación SEV 34



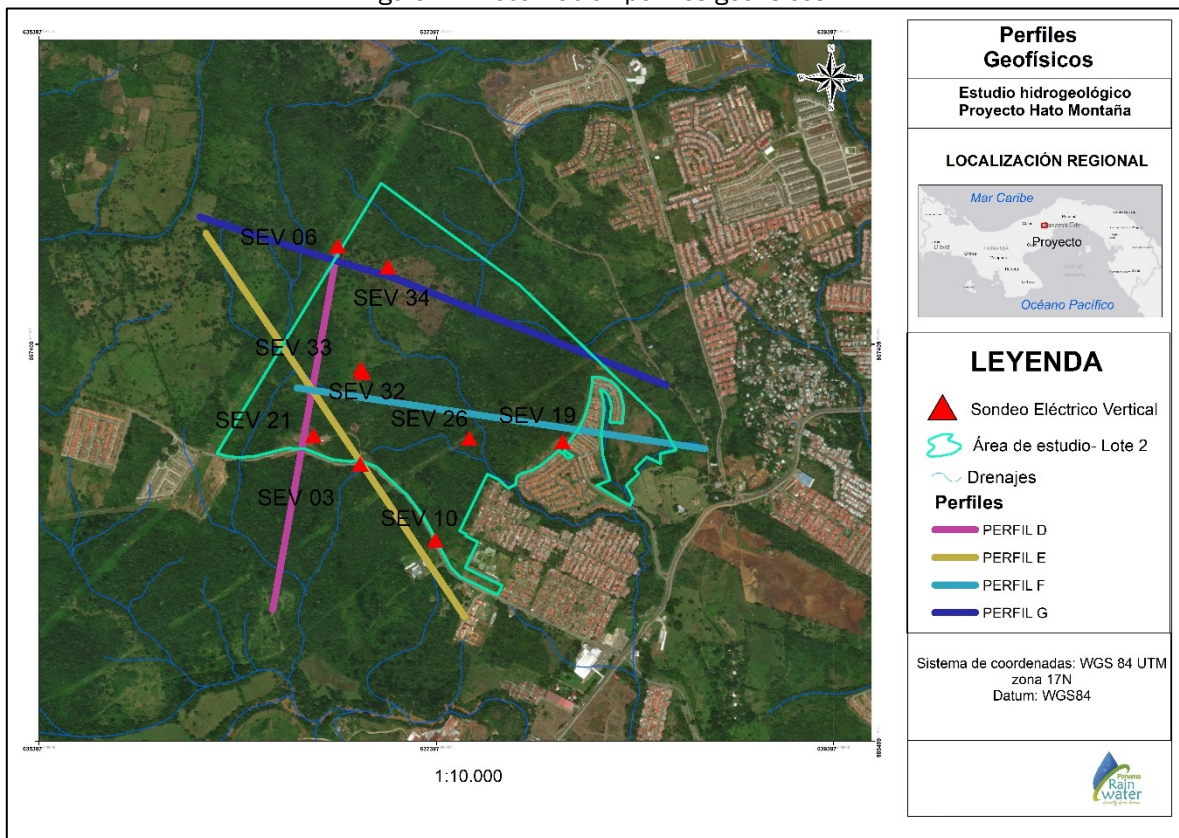
Fuente: Panama Rainwater, 2023

El perfil generalizado del área muestra capas superficiales de composición arcillolimosas de colores naranjas en superficie con presencia de gravas y bloques de origen volcánico (basaltos, andesitas y tobas) que tienen resistividades de 21,6 a 181 Ohm*m, la variabilidad en estas resistividades depende del espesor del material arcilloso y la cantidad y tamaño de los bloques que se encuentran cerca a cada uno de los sevs; adicionalmente las resistividades tienden a disminuir su valor original por la saturación que se dio del material por algunas lluvias fuertes. En la siguiente capa se evidencia la transición de suelo arcilloso a saprolito con resistividades entre 10,1 y 136 Ohm*m, estas variaciones en los valores se pueden atribuir a factores, como el grado de alteración presente en el saprolito, el nivel de fracturamiento alcanzado a esa profundidad y la interconexión entre estas fracturas. Es importante destacar que, en algunos casos, esta capa comienza a conformar el techo del acuífero de interés. Posteriormente se encuentra entre 4m y 25 m el acuífero de interés, estas profundidades varían de acuerdo con el perfil de elevación del terreno que se caracteriza por un relieve colinado, en donde por lo general el nivel del agua va siguiendo la topografía, pero en otros puntos se puede encontrar que las fracturas o el saprolito arcilloso no permita el paso del agua, corresponde a la unidad hidrogeológica B3: el acuífero del Grupo Cañazas- Formación Tucué que corresponde a un acuitardo, de extensión regional y local, de baja productividad, de carácter semiconfinado. Finalmente, en algunos SEVs se logró investigar el basamento de la Unidad geológica correspondiente a la Formación Tucué.

15. CORRELACIÓN Y CORTES GEOELÉCTRICOS

El principal objetivo de la interpretación geoelectrica, es la elaboración de los diferentes cortes geoelectricos, donde se relacionan los valores de resistividad con las capas geológicas que afloran en la zona de estudio. Para lograr la correlación de todos los datos obtenidos a partir de los sondeos eléctricos se trazaron cuatro (4) perfiles, los cuales se ubicaron estratégicamente de tal forma que se pudiera recopilar información de la mayor cantidad de sondeos eléctricos verticales posibles. Estos perfiles cruzan el área de interés, ya que el objetivo principal es comprender cómo se comporta el acuífero y determinar las zonas que presentan espesores saturados adecuados para la ubicación de los pozos. En la Figura 27 se presentan los perfiles trazados en el área de interés.

Figura 27. Localización perfiles geofísicos



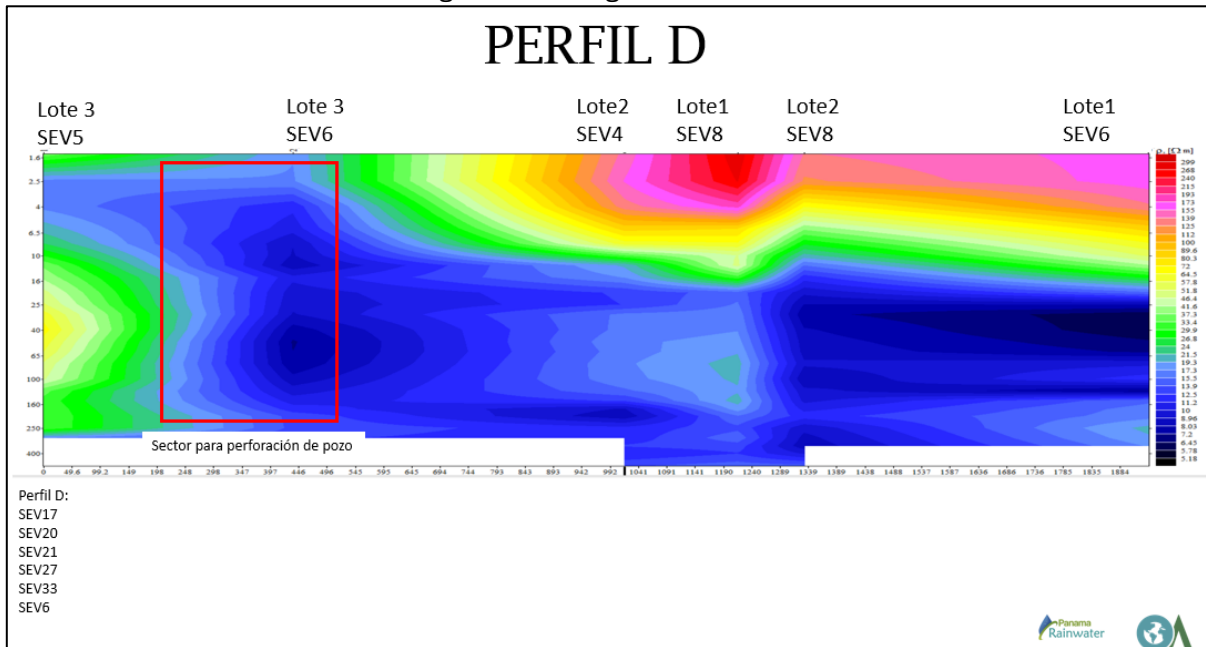
Fuente: Panama Rainwater, 2023.

Los perfiles se construyeron en el Software IPI2win con los sondeos ejecutados en el área de interés, sobre la Unidad Hidrogeológica B3: formación Tucué. Una desventaja de la construcción del programa es que no grafica la topografía tal como se encuentra en el área, aunque si la referencia en la sección. Los polígonos propuestos para realizar las perforaciones exploratorias y en consecuencia los pozos, se presentan en el Anexo 4: áreas propuestas para pozos. A continuación, se presenta cada uno de los perfiles:

15.1. PERFIL D

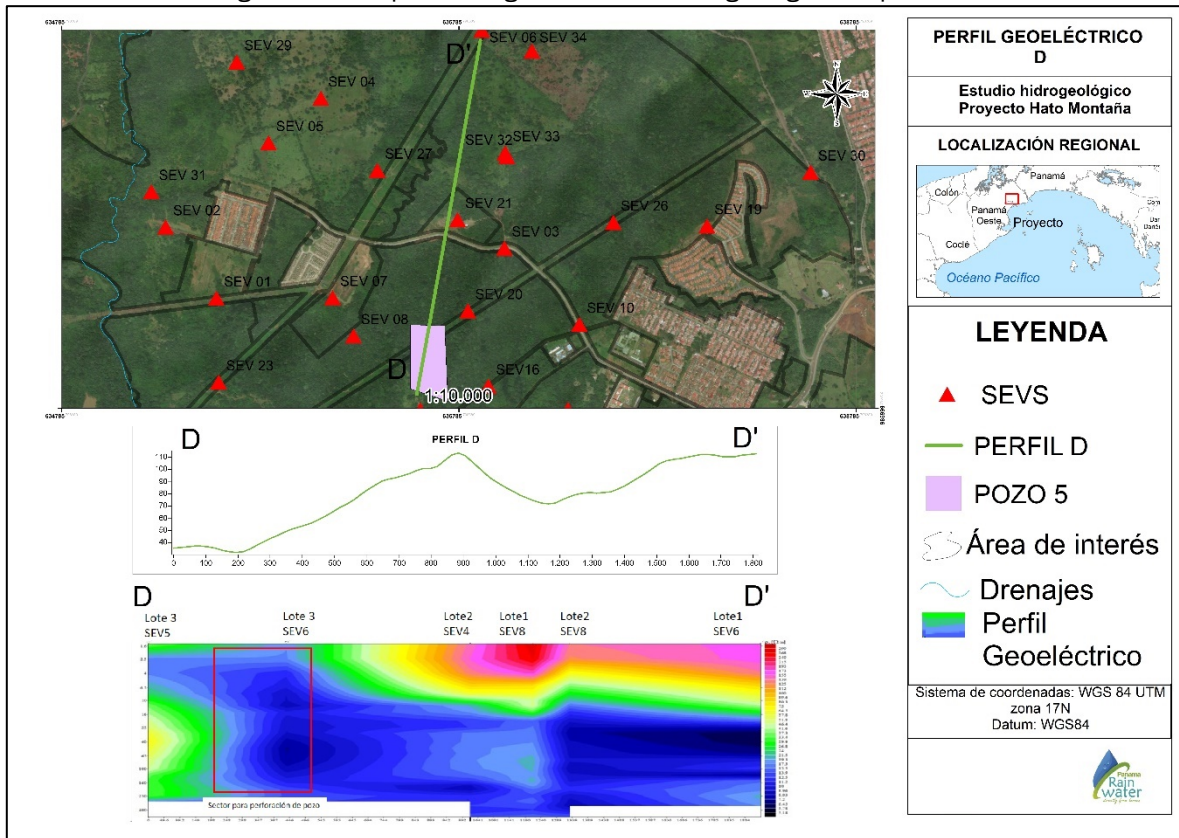
El perfil D tiene una orientación SW-NE y se traza teniendo en cuenta la información de los SEVS: 17 (lote 2 sev 5), 20 (lote 3 sev 6), 21 (lote 2 sev 4), 27 (lote 1 sev 8), 33 (lote 2 sev 8) y 6 (lote 1 sev 6). La Figura 28 contiene el perfil geoelectrico interpretado de acuerdo con la hidrogeología, en donde se puede observar que los dos primeros SEVS los cuales se encuentran en la parte más baja del perfil topográfico, registran el acuífero de interés superficialmente y con una profundidad de más de 200 m, por lo que en esta zona se propone para la ubicación de un pozo exploratorio (ver polígono color lila en la Figura 29). Esta zona se correlaciona con la primera zona propuesta en el perfil anterior. Los siguientes 4 SEVS que conforman el perfil tienen una capa en superficie con una resistividad alta que se correlaciona en espesor (según la topografía) y la cual está suprayacente otra capa con una resistividad menor, considerándose el techo del acuífero de interés. Finalmente, subyacente la capa anterior se encuentra el acuífero de interés en una profundidad entre 12 y 20m según el perfil topográfico, este acuífero se extiende en profundidad.

Figura 28. Perfil geoelectrico D



Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 29. Interpretación geoelectrica e hidrogeológica del perfil D.



Fuente: Panama Rainwater, 2023

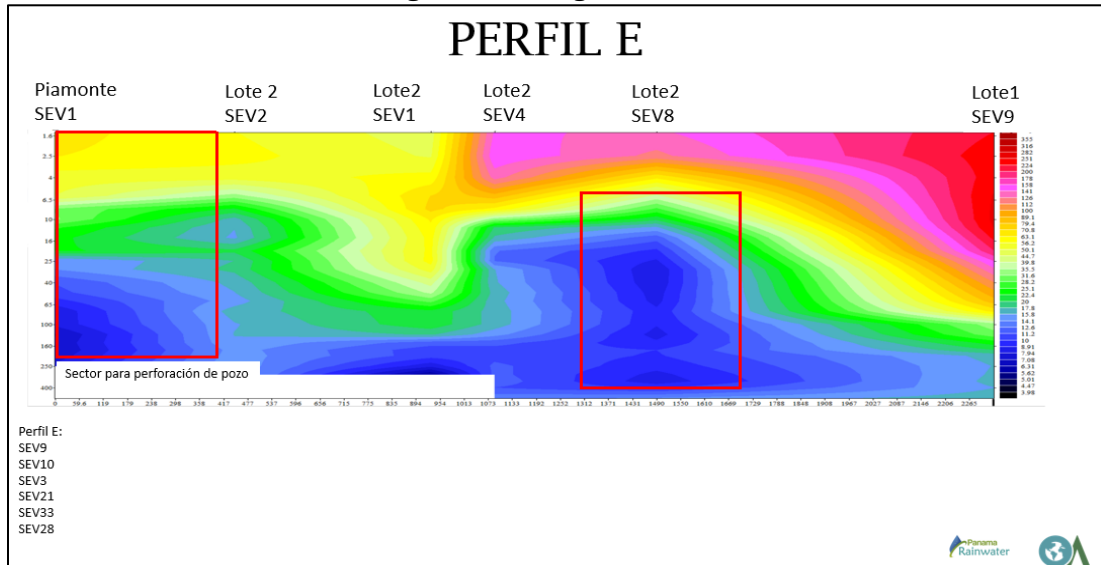
15.2. PERFIL E

El perfil E tiene una orientación NW-SE y se traza teniendo en cuenta la información de los SEVS: 9 (Piamonte sev 1), 10 (lote 2 sev 2), 3 (lote 2 sev 1), 21 (lote 2 sev 4), 33 (lote 2 sev 8) y 28 (lote 1 sev 9). La Figura 30 contiene el perfil geoelectrico interpretado de acuerdo con la hidrogeología y se puede observar en los 3 primeros SEVS una primera capa que se correlaciona en profundidad y valores de resistividad. Esta capa se considera el techo del acuífero de interés el cual se encuentra parcialmente saturado. Subyaciendo esta capa, entre 6 y 15 metros, la saturación es total y se extiende hasta más de 200 m, en donde se puede correlacionar el acuífero con el pozo que se encuentra en el proyecto PIAMONTE. En esta zona según el registro geoelectrico y los resultados de la prueba de bombeo del pozo existente, se considera este como exitoso, sin embargo, se puede profundizar entre 20 y 30 m más.

Los siguientes 3 SEVS muestran resistividades altas correlacionadas con las colinas y la cota de estas. En profundidad las resistividades disminuyen, marcando así el techo del acuífero en aproximadamente 10 metros de profundidad. Se escoge la zona para ubicar

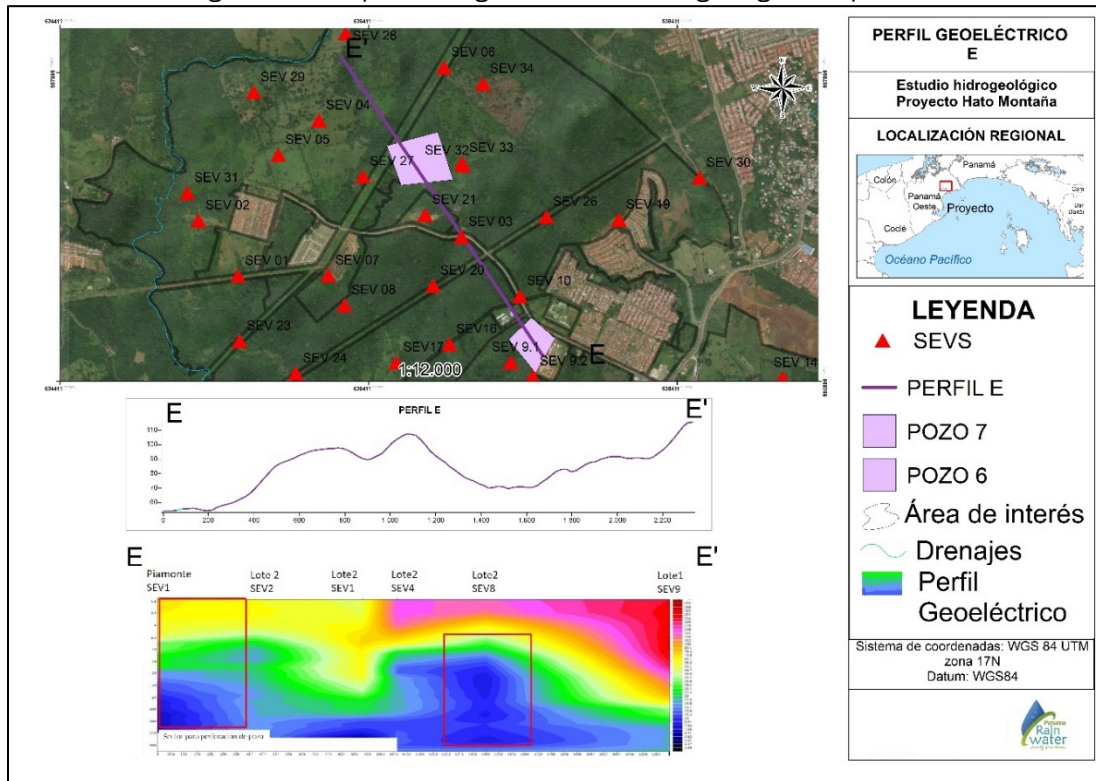
un pozo exploratorio cerca del Lote2 SEV8 en donde la topografía es más baja y es un sector más accesible en comparación con los otros SEVs como se observa en la Figura 31.

Figura 30. Perfil geoelectrico E



Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 31. Interpretación geoelectrica e hidrogeológica del perfil E

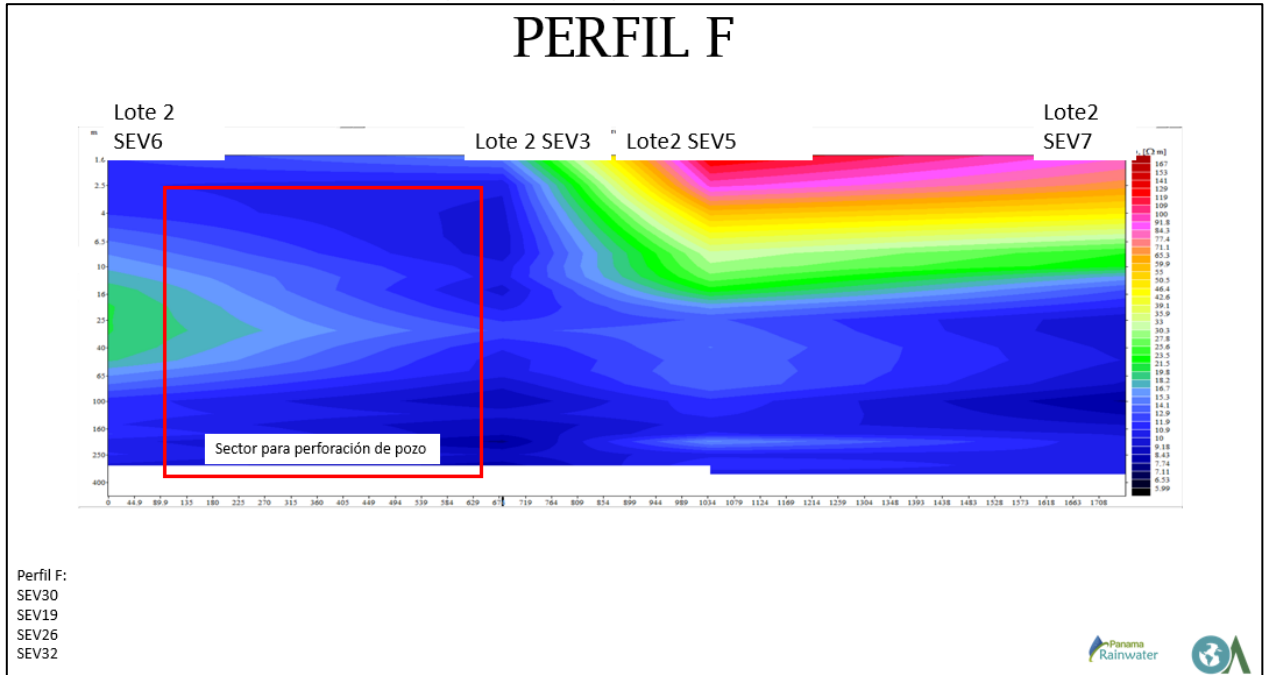


Fuente: Panama Rainwater, 2023

15.3. PERFIL F

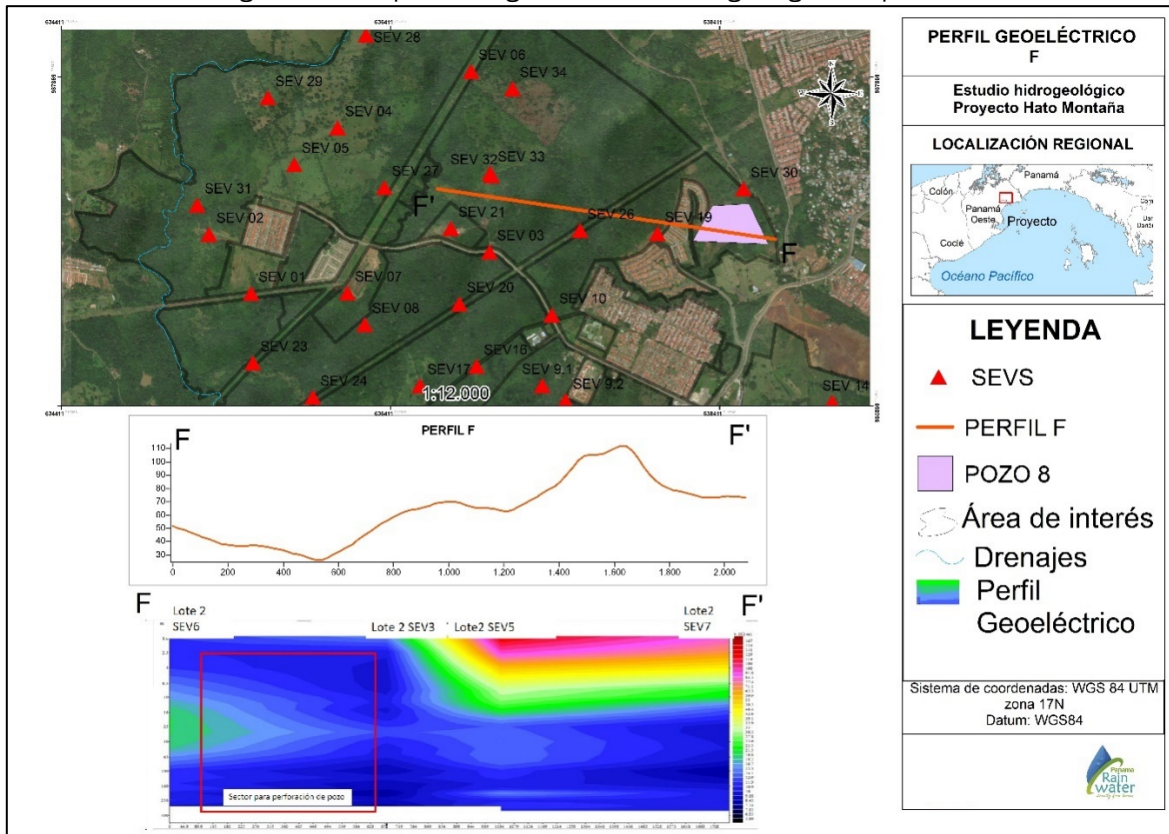
El perfil F tiene una orientación NW-SE y se traza teniendo en cuenta la información de los SEVS: 30 (lote 2 sev 6), 19 (lote 2 sev 3), 26 (lote 2 sev 5) y 32 (lote 2 sev 7). La Figura 32 contiene el perfil geoelectrico interpretado de acuerdo con la hidrogeología, en donde los 2 primeros SEVs tienen valores de resistividad bajos, relacionados con la saturación del suelo debido a la precipitación continua en el momento de la adquisición. Subyaciendo, está el acuífero de interés que se encuentra a una profundidad entre 2 y 3 m y se extiende por más de 200 m. En esta zona se considera que puede ubicarse un pozo exploratorio. Los otros SEVs se encuentran ubicados topográficamente en una altura mucho mayor (Figura 33) y presenta una capa superficial con resistividad alta, seguida por otra con una resistividad menor parcialmente saturada hasta encontrar el acuífero de interés en una profundidad de 10m y una extensión en profundidad de más de 200 m. Esta zona no se considera para prospeccionar por las diferencias topografías y la condiciones de acceso.

Figura 32. Perfil geoelectrico F



Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 33. Interpretación geoelectrica e hidrogeológica del perfil F.

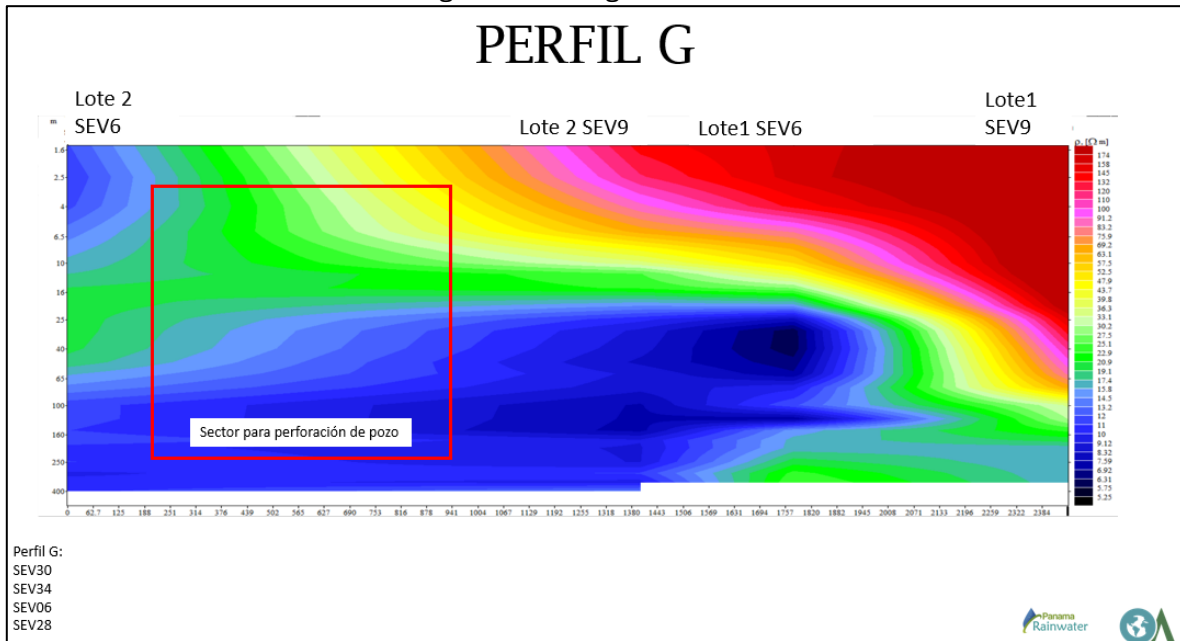


Fuente: Panama Rainwater, 2023

15.4. PERFIL G

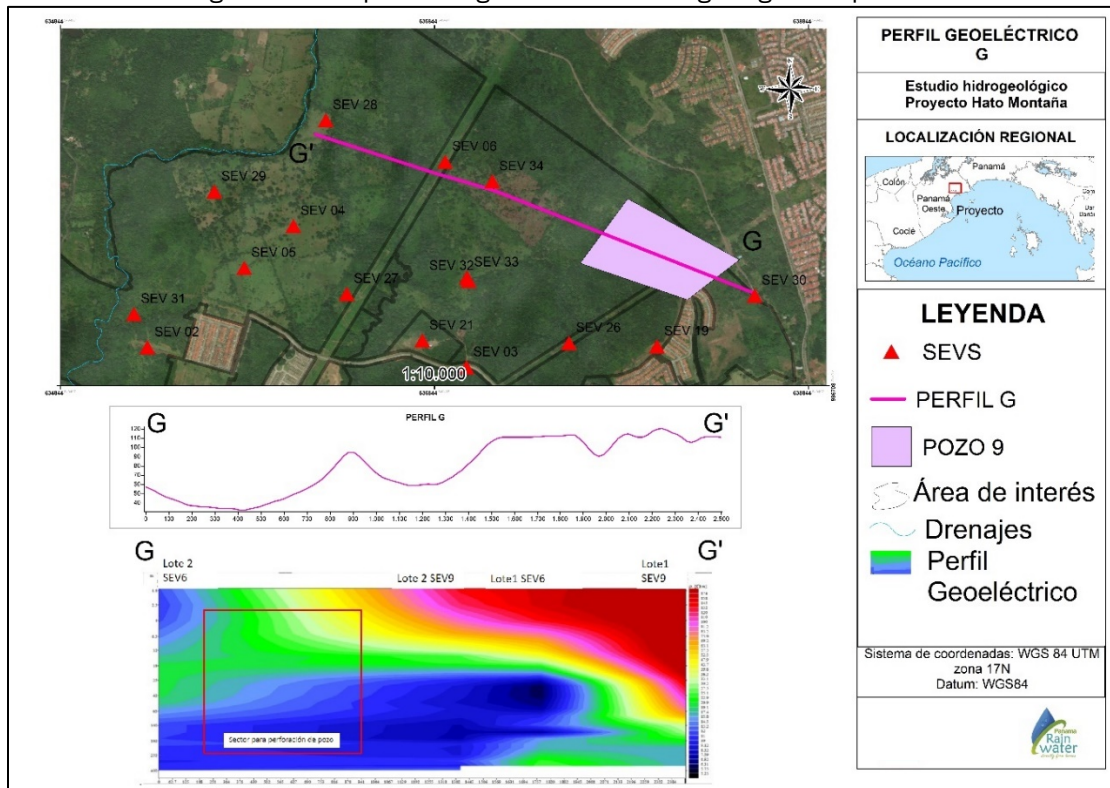
El perfil G tiene una orientación NW-SE y se traza teniendo en cuenta la información de los SEVS: 30 (lote 2 sev 6), 34 (lote 2 sev 9), 06 (lote 1 sev 6) y 28 (lote 1 sev 9). La Figura 34 contiene el perfil geoelectrico "G" interpretado de acuerdo con la hidrogeología. Este perfil se correlaciona con el anterior en donde hacia el primer SEV el acuífero de interés se encuentra en una profundidad superficial y tiene una extensión de más de 200 m de profundidad. Los siguientes SEVs se encuentran en una región topográficamente más alta como se puede ver en la Figura 35, y muestran dos capas de resistividades altas, en donde la primera corresponde a los suelos arcillosos sin saturación mientras que la siguiente capa presenta saturación parcial y se reconoce como el techo del acuífero de interés. El acuífero se ubica a una profundidad que oscila entre 20 y 40 metros. En comparación con el primer SEV, su extensión en profundidad es más restringida. Esta característica, sumada a las diferencias topográficas del área y a su difícil acceso, lo convierten en un sector poco adecuado para la perforación de pozos.

Figura 34. Perfil geoelectrico G



Fuente: Panama Rainwater, 2023

Figura 35. Interpretación geoelectrica e hidrogeológica del perfil G.



Fuente: Panama Rainwater, 2023

16.CONCLUSIONES

- En el área del proyecto Hato Montaña afloran rocas volcánicas pertenecientes a la formación Tucué (TM-CAtu) del Grupo Cañazas, la cual está conformada por formada por lavas, tobas, basaltos, andesitas y plugs, aglomerados. Esta unidad se encuentra aflorando en algunos puntos del área de estudio muy meteorizada y con fracturas. La capa superficial del terreno es en su mayoría arcillas plásticas de grandes espesores y al aumentar la profundidad se encuentra esta unidad menos meteorizada y con más fracturas. Esto da origen a la unidad hidrogeológica B3: un acuitardo de extensión regional y local, porosidad secundaria, baja productividad y de carácter semiconfinado.
- La geomorfología del sector está asociada directamente con la litología. Los cerros son de carácter volcánico, donde la roca está altamente fracturada y meteorizada. Los drenajes son de tipo subdendrítico y las pendientes dentro del área del proyecto son de moderadas a fuertes. Las regiones morfoestructurales en las cuales se encuentra el proyecto Hato Montaña son: bajas, de planicies y litorales; y cerros bajos y colinas.
- De acuerdo con las resistividades encontradas y las granulometrías presentes, se diferencian cuatro capas predominantes: en superficie una capa de composición arcillolimsa de colores naranjas en superficie con presencia de gravas y bloques de origen volcánico (basaltos, andesitas y tobas) que tienen resistividades de 21,6 a 181 Ohm*m, en donde los valores más bajos corresponden a la capa saturada por agua lluvia. En la siguiente capa se evidencia la transición de suelo arcilloso a saprolito con resistividades entre 10,1 y 136 Ohm*m, estas variaciones en los valores se pueden atribuir a factores, como el grado de alteración presente en el saprolito, el nivel de fracturamiento alcanzado a esa profundidad y la interconexión entre estas fracturas. Es importante destacar que, en algunos casos, esta capa comienza a conformar el techo del acuífero de interés. Posteriormente se encuentra entre 4m y 25 m el acuífero de interés, estas profundidades varían de acuerdo con el perfil de elevación del terreno que se caracteriza por un relieve colinado, en donde por lo general el nivel del agua va siguiendo la topografía, pero en otros puntos se puede encontrar que las fracturas o el saprolito arcilloso no permita el paso del agua, corresponde a la unidad hidrogeológica B3: el acuífero del Grupo Cañazas-Formación Tucué que corresponde a un acuitardo, de extensión regional y local, de baja productividad, de carácter semiconfinado. Finalmente, en algunos SEVs se logró investigar el basamento de la Unidad geológica correspondiente a la Formación Tucué.

- Después de analizar el potencial de recarga de las subunidades hidrogeológicas que fueron encontradas en el área de estudio se puede concluir que la subunidad hidrogeológica B3, correspondiente a la Formación Tucué y Panamá Fase Marina, presenta valores de retención que varían entre 10-100 mm, siendo predominantes los valores más bajos (10-50 mm) debido a los materiales finos y muy finos que lo componen y hacen que el drenaje sea imperfecto. Adicional a esto la cobertura y uso de suelo es en su mayoría construcción de viviendas y bosques que se encuentran en áreas con pendientes pronunciadas. Es por esto por lo que esta unidad tiene un potencial de recarga limitado.
- En el área de estudio se encuentran pozos realizados por Hauss, los colegios María Auxiliadora y Academia Latina. Los pozos que se encuentran en los proyectos Verona, Siena y Royal Park y cuentan con las pruebas de bombeo en donde el único pozo que puede considerarse como de bajo éxito es el que se encuentra en Verona, ya que el caudal no es suficiente para el suministro requerido. La finca de Hato Montaña utiliza este pozo para el suministro de agua para trabajadores y para labores de la finca y el sostenimiento de los animales, el colegio María Auxiliadora los utiliza para todas las actividades excepto el consumo humano, el colegio Academia Latina dejó de utilizar estos pozos después de la conexión con el IDAAN y los otros pozos se encuentran abandonados. Las personas que brindaron la información de los pozos concuerdan con que el suministro de agua en temporadas secas es muy bajo y que es muy probable quedarse sin agua, mientras que para las temporadas de lluvias el suministro es bueno.
- Para el Lote 2 se seleccionan dos áreas para ubicar pozos exploratorios, estas se pueden ver en la Figura 31 y Figura 33 y Figura 35 y se identifican como POZO 7, POZO 8 Y POZO 9, estas dos últimas áreas se ubican en el mismo lugar. El pozo 7 se puede perforar a 200 metros, el pozo 8 y 9 a 250 metros.

17.RECOMENDACIONES

- Es importante recalcar que el acuífero se cataloga como un acuitardo, con baja permeabilidad y capacidad productiva, y que la permeabilidad secundaria de éste está asociada al grado de fracturamiento de la roca, por lo que es esencial y determinante que durante las perforaciones exploratorias haya un geólogo presente caracterizando la roca y definiendo cuáles son las zonas de mayor fracturamiento de la misma, ya que en estas profundidades es donde se deberán instalar las tuberías ranuradas.

- Los pozos que se recomiendan perforar en la Finca Hato Montaña pueden estar en cualquier punto de las áreas establecidas en este informe (Anexo 4: áreas propuestas para pozos), ya que el registro geoeléctrico muestra continuidad del acuífero en estos sectores. Los puntos específicos deberán ser consecuentes con los diseños de las construcciones de los desarrollos inmobiliarios, según le convenga al cliente.
- Se recomienda que los pozos sean entubados en PVC CALIBRE 40 de 12”, 10”, 8” y 6” de diámetro, alternando tubería ciega y filtros en las zonas de mayor fracturamiento. Dentro de las actividades que se deben seguir en la perforación son:
 - Pozo exploratorio (llevado a cabo durante la perforación del pozo final) en 2”. Las profundidades propuestas de cada uno son:

Tabla 9. Profundidad de los pozos propuestos en la finca Hato Montaña.

Lote	Proyecto	Cantidad de Pozos	ID del Pozo	Profundidad	Observaciones
1	Cercanías a Verona	2	1	160	
			2	160	
2	-	3	7	200	
			8 y 9	250	
3	-	4	3	300	Cercano a Piamonte
			4	300	Cercano a Siena
			5	300	
			6	300	
4	-	1	11	100	
5	-	1	10	100	

Fuente: Panama Rainwater, 2023.

- Durante la perforación se deben tomar muestras del material atravesado metro a metro, para su análisis, descripción y levantamiento de la Columna Estratigráfica, por parte de un Geólogo especializado.
- Realizar Registro eléctrico (S.P y Resistividad) confrontados con la columna litológica y la rata de penetración como base para el diseño: registros eléctricos de S.P., Normal Corta, Normal Larga y Gamma Ray.
- Ampliación del pozo exploratorio a 6-8”, de acuerdo con los resultados de la prueba de bombeo y los parámetros hidráulicos de los acuíferos. Lo anterior se puede realizar mediante broca tricónica.
- Emplear los metros de filtros necesarios de acuerdo con las muestras recuperadas en las zonas donde haya mayor fracturamiento y el tamaño de

la gravilla se seleccionará dependiendo del menor tamaño de roca parental encontrada, se aclara, que esta determinación del diseño definitivo del pozo está condicionada a los resultados de la Columna Estratigráfica.

- Lavado y desarrollo del pozo mediante sistema combinado de pistón y yetting, buscando con esto un mayor ajuste del empaque de gravilla.
- Realizar Prueba de Bombeo (puede ser con compresor), para determinar así, los parámetros hidráulicos del pozo, conocer realmente el caudal óptimo de explotación y elegir correctamente el equipo de bombeo y su colocación. Las condiciones para la prueba son:
 - La prueba se realizará durante 12 horas de bombeo continuo tratando de mantener el caudal constante y midiendo los descensos dentro del pozo mediante sonda. Estos datos se interpretarán para conocer parámetros como:
 - ✓ Caudal Optimo y máximo de explotación
 - ✓ Nivel Estático: ne.
 - ✓ Nivel Dinámico: nd
 - ✓ Abatimiento: A
 - ✓ Caudal Específico: Ce
 - ✓ Potencia de la bomba H.P
 - ✓ Nivel de instalación de la bomba
 - Finalmente toma de muestras de agua, para su análisis fisicoquímico y bacteriológico.
- Las profundidades relacionadas en este informe van a depender del grado de fracturamiento de la roca y las descripciones del geólogo en el sitio de la perforación. Si se describe alto fracturamiento durante los primeros 150 metros de perforación, de manera continua, se recomienda detener la perforación y realizar una prueba de bombeo con caudal escalonado (no con caudal constante), sin recuperación entre escalones, para determinar si el acuífero tiene la capacidad de explotación con esa profundidad. Cada escalón en periodos de tiempo de 8 horas, siempre y cuando sean idénticos entre ellos cuando se trate de una misma prueba. Se recomienda Q1 al 50%, Q2 al 100% y Q3 al 150% del caudal que desea solicitarse para la concesión que cumpla la demanda requerida para el proyecto.

18. BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.).
- (SCS), S. C. (1964). National Engineering handbook. En SCS. Washington.
- Autoridad del Canal de Panamá. (2017). *“Análisis de Pre-factibilidad y factibilidad para determinar el Potencial del Río Bayano para la Producción de Agua Potable para las regiones de Panamá Este y Metropolitana” Contrato No. 025 (2016)* . Ciudad de Panamá: Autoridad del Canal de Panamá.
- Autoridad Nacional de Ambiente de Panamá. (2011). Obtenido de <https://faolex.fao.org/docs/pdf/pan118989anx.pdf>
- Autoridad Nacional del Ambiente de Panamá. (2010). *Atlas ambiental de la República de Panamá*. Panamá: Editora Novo Art, S.A.
- Batista Rios, M. (2021). *Hacia donde va el sector inmobiliario en Panamá - COVID 19*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- EDUCALINGO. (2019). Obtenido de <https://educalingo.com/es/dic-es/resistividad>
- ETESA. (1999). *Texto explicativo, Mapa Hidrogeológico de Panamá*. Panamá: EMPRESA DE TRANSMISION ELECTRICA, S.A.
- ETESA. (2009). *Empresa de Transmisión Eléctrica de Panamá*. (ETESA) Recuperado el 10 de Abril de 2017, de Régimen Hidrológico de Panamá: http://www.hidromet.com.pa/regimen_hidrologico.php
- ETESA. (2021). *RED DE ESTACIONES*. Obtenido de <https://www.hidromet.com.pa/es/red-estaciones>
- ETESA. (2023). *IMHPA*. Obtenido de Estaciones en tiempo real y datos historicos.: <https://www.imhpa.gob.pa/es/estaciones-satelitales>
- Ibáñez-García, S., & Porres-Benito, J. (2001). *El agua subterránea: prospección, captación y repercusiones en la obra civil*. Madrid: Cursos de verano: Universidad de Burgos.
- Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia. (2007). *Atlas Geográfico de Panamá*. Panamá: Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia.
- Maldonado, Y. (2020). *Patrones de drenaje y su interpretación*. Geología WEB.
- MInisterio de Ambiente de Panamá. (2021). *SINIA*. Obtenido de Sistema Nacional de Información Ambiental: <https://www.sinia.gob.pa/index.php/extensions/datos-abiertos-y-geoservicios>
- Ministerio de Comercio e Industrias, D. G. (1990). *Smithsonian Institution/GIS Data Portal*. Obtenido de <https://stridata-si.opendata.arcgis.com/maps/SI::mapa-de-la-geolog%C3%ADa-de-la-rep%C3%BAblica-de-panam%C3%A1/about>
- Panama, I. d. (21 de 9 de 2023). *IMHPA*. Obtenido de <https://www.imhpa.gob.pa/es/documentos>
- Reynolds, J. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Jhon Wiley & Sons.
- Sanchez San Roman, F. (SF). *Conceptos fundamentales de hidrogeología* . Salamanca: Universidad de Salamanca.

- Sanchez, I. (2018). *Análisis morfométrico, hidrométrico y socioeconómico de la cuenca del Río Caimito*. Panamá: Universidad de Panamá.
- Servicio Geológico Colombiano. (Junio de 2016). *Recordcenter SGC*. Obtenido de <https://recordcenter.sgc.gov.co/B17/23008010028485/Documento/Pdf/2105284851106000.pdf>
- SIAGUA. (s.f). *Sistema Iberoamericano de Información sobre el Agua*. (SIAGUA) Recuperado el 15 de Diciembre de 2016, de Panamá: <http://www.siagua.org/pais/panama#basica>
- Universidad Jaime I de Castellón. (2007). *Grupo de Gestión de Recursos Hídricos*. Recuperado el 09 de Febrero de 2017, de Escorrentía: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH05.pdf>
- Vega Cervera, V. A. (2012). *Análisis de la Gestión del Recurso Hídrico en Panamá*. Alicante: Universidad de Alicante.

19.ANEXOS

Se presentan de forma digital los siguientes anexos:

Anexo 1. Registro fotográfico

Anexo 2. Datos geofísica

Anexo 3. Áreas propuestas para pozos

Anexo 4. Mapas