PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD)
AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA DEL PERÚ (ANA) Y SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA DEL ECUADOR (SENAGUA)

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO ZARUMILLA

FASE III: SISTEMATIZACIÓN, ANÁLISIS, PROCESAMIENTO E INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DEL ACUÍFERO ZARUMILLA

Producto 4
Informe de Fase 3 – Sistematización, Análisis, Procesamiento e Integración de Información para la Elaboración del Estudio del Acuífero Zarumilla

VOLUMEN II MEMORIA FINAL

Julio, 2020

CONSORCIO HIDROYAKU ZARUMILLA

CONSORCIO HIDROYAKU ZARUMILLA

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD)

PROYECTO GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS Y ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZAS PUYANGO-TUMBES, CATAMAYO- CHIRA Y ZARUMILLA

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA DEL PERÚ (ANA) Y SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA DEL ECUADOR (SENAGUA)

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO ZARUMILLA

FASE III: SISTEMATIZACIÓN, ANÁLISIS, PROCESAMIENTO E INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DEL ACUÍFERO ZARUMILLA

Producto 4

Informe de Fase 3 – Sistematización, Análisis, Procesamiento e Integración de Información para la Elaboración del Estudio del Acuífero Zarumilla

VOLUMEN II MEMORIA FINAL

Código de Proyecto	104301
Fecha	Julio, 2020

DISCLAIMER

La información contenida en este documento ha sido elaborada para los fines del Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla.

Este documento sólo podrá utilizarse para los fines para los que fue encargado y de acuerdo con los términos del compromiso entre Global Yaku Consultores S.A.C.(GYC) y Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

LIMITACIÓN DE RESPONSABILIDADES

Parte de la información usada para las interpretaciones contenidas en este documento ha sido generada como parte de estudios de instituciones oficiales tanto de Perú como de Ecuador, y fue proporcionada por Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) a Global Yaku Consultores S.A.C.(GYC) para su uso como información existente; por lo cual GYC la asume como válida y correcta.

CONTENIDO

VOLUMEN I ..... RESUMEN EJECUTIVO

VOLUMEN II ..... MEMORIA FINAL

1 ASPECTOS GENERALES 26
1.1 INTRODUCCIÓN 26
1.2 ANTECEDENTES 26
1.3 JUSTIFICACIÓN 27
1.4 ALCANCES 27
1.5 OBJETIVOS 28
1.5.1 Objetivo General 28
1.5.2 Objetivos Específicos 28
1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO 29
1.6.1 Trabajos Preliminares 29
1.6.1.1 Recopilación y Revisión de Información Existente de Fuentes Secundarias 29
1.6.1.2 Visita de Campo 29
1.6.1.3 Planificación de los Trabajos de Campo 30
1.6.2 Trabajos de Campo 31
1.6.2.1 Actualización del Inventario de Fuentes/Captaciones de Agua 31
1.6.2.2 Optimización de Redes 32
1.6.2.3 Prospección Geofísica 34
1.6.2.4 Ejecución de Pruebas de Bombeo en Pozos Equipados 36
1.6.3 Trabajos de Gabinete 37

2 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA CUENCA 39
2.1 ESTUDIOS EXISTENTES SOBRE RECUROS HÍDRICOS 39
2.1.1 Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018) 39
2.1.2 Informe Final de Diagnóstico Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto (GIRHT, 2014), ... 39
2.1.3 Modelamiento Hidrológico del Rio Zarumilla (SENAMHI, 2016) 39
2.1.4 Introducción a la Hidrogeología del Ecuador – 2da edición (INAMHI, Agosto 2015) 39
2.1.5 Introducción a la Hidrogeología del Ecuador (INAMHI, Mayo 2011) 40
2.1.6 Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Zarumilla (MINAGRI - ANA, Noviembre 2009) 40
2.1.7 Sondeos Magneto-telúricos de Espectro Amplio (AMT/MT) para el Estudio del Acuífero Transfronterizo de Zarumilla Ecuador – Perú (Arzate & Corbo, Mayo 2009) 41
2.1.8 Investigaciones Geofísicas con Fines Hidrogeológicos en Sectores de las Cuencas Bajas de los Ríos Tumbes y Zarumilla (Provincias de Tumbes y Zarumilla) (MINAGRI - ANA, Abril 2009) 41
2.1.9 Estudio de Prospección Geofísica y Levantamiento Hidrogeológico en el Cantón Zapotillo - Provincia de Loja (INAMHI, Mayo 2011) 41
2.1.10 Caracterización Hidrogeológica e Isotópica del Acuífero Transfronterizo Zarumilla , Ecuador – Perú (Coello, 2006) 41
2.1.11 Estudio Hidrogeológico del Valle Zarumilla (MINAGRI - INRENA, Diciembre 2003) 41
2.1.12 Tesis de pregrado "Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas, Área Chacras - Provincia de El Oro" (Aguilar & Marquinez, 2001) 42
2.1.13 Estudio Puntual de Prospección Geofísica con Fines de Investigación en Varios Sectores de Zarumilla – Tumbes (MINAGRI - INRENA, 1997) 42
2.1.14 Inventario y Evaluación Nacional de las Fuentes de Aguas Subterráneas en el Valle de Zarumilla - Departamento de Tumbes (MINAGRI - INRENA, 1980) 42
2.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN 42
2.2.1 Información Geológica 42

2.2.1 Información Meteorológica 43
2.2.2 Información Hidrológica 43
2.2.3 Información Hidrogeológica 43
2.2.3.1 Geofísica 43
2.2.3.2 Hidrogeología 43
2.2.4 Información de Calidad de Agua Subterránea 44
3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA 45
3.1 UBICACIÓN DE LA CUENCA 45
3.1.1 Ubicación Política 45
3.1.2 Ubicación Geográfica 45
3.2 ACCESIBILIDAD – VÍAS DE COMUNICACIÓN 48
3.3 DEMOGRAFÍA 48
3.3.1 Población Total 48
3.3.2 Población por Edad 49
3.3.3 Población por Género 50
3.3.4 Población Rural y Urbana 50
3.3.5 Población Económicamente Activa 51
3.3.5.1 Población Económicamente Activa (PEA) 51
3.3.5.2 Población en Edad de Trabajar Según Área Rural y Urbana 52
3.3.5.3 Población Económicamente Activa por Actividad Económica 53
3.4 PRINCIPALES ACTIVIDADES ECONÓMICAS 54
3.4.1 Sector Primario 55
3.4.1.1 Subsector Agropecuario 55
3.4.1.2 Acuicultura 55
3.4.1.3 Minería 57
3.4.2 Sector Secundario 57
3.4.2.1 Industria 57
3.4.3 Sector terciario 57
3.4.3.1 Comercio 57
3.4.3.2 Turismo 57
3.4.3.3 Servicios de Transporte 59
3.5 USOS DE AGUA 59
3.5.1 Uso Poblacional 59
3.5.2 Uso Agropecuario 62
3.5.3 Uso Industrial 62
4 HIDROLOGÍA - BALANCE HÍDRICO 64
4.1 ASPECTOS GENERALES 64
4.1.1 Objetivo 64
4.1.1.1 General 64
4.1.1.2 Específicos 64
4.1.2 Metodología de Trabajo 64
4.2 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA EXISTENTE 65
4.3 DIAGNÓSTICO DE LA CUENCA 66
4.3.1 Delimitación y Codificación Hidrográfica de la Cuenca 66
4.3.2 Infraestructura Hidráulica 66
4.4 ASPECTOS FÍSICOS 67
4.4.1 Clima 67
4.4.2 Parámetros Morfológicos de la Cuenca 67

4.4.2.1 Área de Drenaje 69
4.4.2.2 Longitud de la Cuenca (Perímetro de la Cuenca) 69
4.4.2.3 Longitud del Cauce Principal (L) 69
4.4.2.4 Factor de Forma (Ff) 69
4.4.2.5 Rectángulo Equivalente 70
4.4.2.6 Densidad de Drenaje 70
4.4.2.7 Pendiente Media del Río 70
4.4.2.8 Densidad de Drenaje 70
4.4.2.9 Pendiente Media del Río 70
4.4.2.10 Orden de Corriente 70
4.4.2.11 Coeficiente de Masividad (Cm) 70
4.4.2.12 Curvas Hipsométricas de las Subcuencas del Área de Estudio 72
4.4.2.13 Perfil Longitudinal de las Subcuencas en el Área de Estudio 80
4.4.3 Suelos 88
4.4.3.1 Alfisoles 88
4.4.3.2 Aridisoles 88
4.4.3.3 Entisoles 89
4.4.3.4 Inseptisoles 89
4.4.3.5 Oxisoles 89
4.4.3.6 Ultisoles 89
4.4.3.7 Vertisoles 89
4.4.4 Cobertura Vegetal 91
4.4.4.1 Plantaciones Forestales 93
4.4.4.2 Frutales 93
4.4.4.3 Tierras Agrícolas Sin Cultivo 94
4.4.4.4 Misceláneo Indiferenciado 94
4.4.4.5 Misceláneo de Frutales 94
4.4.4.6 Pasto Cultivado 94
4.4.4.7 Bosque 94
4.4.4.8 Vegetación Arbustiva 95
4.4.4.9 Vegetación Herbácea 96
4.4.4.10 Tierras Improductivas 96
4.4.4.11 Manglar 96
4.4.4.12 Otros 96
4.4.5 Ecosistemas 97
4.4.6 Zonas de Vida 97
4.4.6.1 Monte espinoso tropical: (mte-T) 98
4.4.6.2 Bosque muy seco tropical: (bms-T) 98
4.4.6.3 Bosque seco tropical: (bs-T) 99
4.4.6.4 Bosque seco - Premontano Tropical (bs-PT) 100
4.5 ASPECTOS BIOLÓGICOS 100
4.5.1 Flora 100
4.5.2 Fauna 102
4.5.3 Áreas Protegidas 103
4.5.3.1 Reserva Ecológica Arenillas (REA) 104
4.5.3.2 Parque Nacional Cerros de Amotape 106
4.5.3.3 Área de Conservación Regional Angostura Faical 107
4.6 CLIMATOLOGÍA 108
4.6.1 Variables Climáticas 108

4.6.1.1 Precipitación 108
4.6.1.2 Temperatura 111
4.6.1.3 Radiación Solar 117
4.6.1.4 Humedad Relativa 117
4.6.1.5 Velocidad y Dirección del Viento 118
4.6.2 Clasificación Climática 120
4.7 PLUVIOMETRÍA 122
4.7.1 Red de Estaciones Pluviométricas 122
4.7.1.1 Análisis Espacial – temporal del Comportamiento de la Precipitación en la Cuenca y Análisis de Estaciones Priorizadas para el Estudio 122
4.7.1.2 Complementación y Extensión de la Información Pluviométrica Mensual 125
4.7.1.3 Validación de las Estaciones de SENAMHI e INAMHI versus las Estaciones del Producto GPM 125
4.7.1.4 Análisis de Consistencia de la Información Pluviométrica 127
4.7.2 Régimen de la Precipitación Anual 129
4.7.3 Estimación de Años Secos y Húmedos 129
4.7.4 Gradiente de Precipitación – Altitud 131
4.7.5 Variabilidad Espacial de la Precipitación y las Curvas de Variación Estacional y de Duración 134
4.7.5.1 Curvas de Variación Estacional 134
4.7.5.2 Curvas de Duración 145
4.7.6 Conclusiones 149
4.8 BALANCE HÍDRICO 149
4.8.1 Área de Dominio del Modelo y Tratamiento de la Información Pluviométrica 149
4.8.1.1 Definición de las Subcuencas de Estudio 149
4.8.1.2 Suelos 149
4.8.1.3 Mapa de Uso de Suelos 153
4.8.1.4 Mapa de Pendientes 153
4.8.2 Resultados de las Simulaciones 156
4.8.2.1 Planteamiento de la Simulación 156
4.8.2.2 Metodología de la Simulación 156
4.8.2.3 Balance Hidrológico de las Subcuencas de Estudio 157
4.8.2.4 Balance Hidrológico del Área Total de Estudio 172
4.8.3 Caudales Modelados y Caudales Observados 173
4.8.4 Análisis de Máximas Avenidas 175
4.8.4.1 Precipitación máxima en 24 Horas con Diferentes Periodos de Retorno 175
4.8.4.2 Caudales de Diseño Estadístico Obtenidos en Base a los Caudales del Modelo SWAT 179
4.8.5 Conclusiones 183
4.9 OFERTA HÍDRICA 184
4.9.1 Aguas Superficiales 184
4.9.2 Disponibilidad Hídrica Total 184
4.9.3 Uso y Demanda de Agua 184
4.9.3.1 Uso Poblacional 184
4.9.3.2 Uso Agropecuario 187
4.9.3.3 Uso Industrial 190
4.9.4 Determinación de la Recarga del Acuífero 191
4.9.4.1 Modelamiento de la Recarga al Acuífero 191
5 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO 194
5.1 INTRODUCCIÓN 194

5.2 GEOLOGÍA REGIONAL ... 194
5.2.1 Cuenca Tumbes - Progreso ... 194
5.3 ESTRATIGRAFÍA ... 196
5.3.1 Rocas Metamórficas ... 198
5.3.2 Roca Sedimentaria ... 200
5.3.3 Depósito Cuaternario ... 200
5.3.3.1 Terrazas Marinas (Q-Tm) ... 200
5.3.3.2 Depósito Aluvial (Qd-a) ... 201
5.3.3.3 Depósito Coluvial (Q-c) ... 201
5.3.3.4 Depósitos Marinos Recientes (Qm-r) ... 201
5.3.4 Rocas Intrusivas ... 201
5.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL ... 203
6 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA ... 214
6.1 INTRODUCCIÓN ... 214
6.2 FUNDAMENTOS DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPLEADOS ... 214
6.2.1 Sondajes Eléctrico Verticales (SEV) ... 214
6.2.1.1 Descripción ... 215
6.2.1.2 Parámetros de Adquisición ... 218
6.2.1.3 Procedimiento ... 218
6.2.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM) ... 221
6.2.2.1 Descripción ... 221
6.2.2.2 Parámetros de Adquisición ... 221
6.2.2.3 Procedimiento ... 222
6.2.2.4 Control de Calidad ... 223
6.3 TRABAJO DE CAMPO ... 223
6.3.1 Sondajes Eléctrico Verticales (SEV) ... 223
6.3.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM) ... 224
6.4 EQUIPOS ... 226
6.4.1 Sondajes Eléctrico Verticales (SEV) ... 226
6.4.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM) ... 226
6.5 TRABAJO DE GABINETE ... 226
6.5.1 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) ... 226
6.5.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM) ... 227
6.6 RESULTADOS ... 228
6.6.1 Secciones Geoeléctricas ... 228
6.6.1.1 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) ... 228
6.6.1.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM) ... 239
6.7 CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO ... 250
6.7.1 Resistividades Eléctricas de los Horizontes Permeables Saturados ... 250
6.7.2 Espesor de los Horizontes Permeables Saturados ... 251
7 ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA SUBTERÁNEA ... 262
7.1 INVENTARIO DE POZOS ... 262
7.1.1 Toma de Datos ... 262
7.1.2 Clave para Identificar los Pozos Inventariados ... 264
7.1.3 Codificación de los Pozos/Captaciones en Campo ... 264
7.1.4 Codificación Final de los Pozos/Captaciones Inventariadas ... 264
7.1.5 Pozos Inventariados ... 265
7.1.5.1 Tipos de Pozos Inventariados ... 267

7.1.5.2 Estado de Pozos Inventariados 267
7.1.5.3 Uso de los Pozos 271
7.1.5.4 Pozos/Captaciones Según Profundidad Actual de Pozo 271
7.1.5.5 Rendimiento (Caudal de Explotación) de los Pozos 272
7.1.5.6 Explotación del Acuífero Mediante Pozos 275
7.1.5.7 Situación Legal de las Fuentes de Agua Subterránea (Derecho/autorización de Uso o Aprovechamiento) 279
7.1.5.8 Características Técnicas de los Pozos 279
7.2 POZOS EN ESTADO NO UTILIZABLE 280
7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INVENTARIO ACTUAL CON RESULTADOS PREVIOS 282

8 RESERVORIO ACUÍFERO 288
8.1 EL RESERVORIO ACUÍFERO 288
8.1.1 Geometría, Litología y Límites del Reservorio 288
8.1.1.1 Forma y Límites del Acuífero 288
8.1.1.2 Dimensiones del Acuífero 288
8.1.1.3 Litología del Acuífero 289
8.1.2 Secciones Hidrogeológicas 289
8.1.3 Napa Freática 291
8.1.3.1 Morfología del Techo de la Napa Freática 292
8.1.3.2 Profundidad del Techo de la Napa 292
8.1.3.3 Fluctuaciones del Nivel Freático 293

9 HIDRÁULICA SUBTERRÁNEA 304
9.1 INTRODUCCIÓN 304
9.2 PRUEBAS DE BOMBEO EXISTENTES 304
9.3 PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS 304
9.4 PARÁMETROS HIDRÁULICOS (T,K,S) 307
9.4.1 Pozo de Bombeo - Balsalito (H1-CHA-168) 307
9.4.1.1 Características del Pozo de Bombeo 307
9.4.1.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante 307
9.4.2 Pozo de Bombeo – Palmales (H1-PAL-011) 312
9.4.2.1 Características del Pozo de Bombeo (H1-PAL-011) 312
9.4.2.2 Características del Pozo de Observación (H1-PAL-012) 312
9.4.2.3 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante 312
9.4.3 Pozo de Bombeo - Quebrada Seca (H1-QUE-053) 318
9.4.3.1 Características del Pozo de Bombeo (H1-QUE-053) 318
9.4.3.2 Detalles de Prueba de Bombeo a Caudal Constante 319
9.4.4 Pozo de Bombeo - Chacras (H2-CHA-170) 324
9.4.4.1 Pozo de Bombeo 324
9.4.4.2 Detalles de la Prueba de Bombeo 324
9.4.5 Pozo de Bombeo – Huaquillas (H2-HUA-250) 329
9.4.5.1 Características del Pozo de Bombeo 329
9.4.5.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante 329
9.4.6 Pozo de Bombeo – Papayal (H1-PPY-325) 333
9.4.6.1 Características del Pozo de Bombeo (H1-PPY-325) 334
9.4.6.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante 334
9.4.7 Pozo de Bombeo - Zarumilla (H1-ZAR-327) 338
9.4.7.1 Características del Pozo de Bombeo 339
9.4.7.2 Detalles de la Prueba de Bombeo 339

9.4.8 Pozo de Bombeo – Tutumo (H3-MAT-014) ... 343
9.4.8.1 Características del Pozo de Bombeo (H3-MAT-014) ... 344
9.4.8.2 Características del Pozo de Observación (H3-MAT-016) ... 344
9.4.8.3 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante ... 344
9.4.9 Pozo de Bombeo – Isla Noblecilla (H3-MAT-096) ... 348
9.4.9.1 Características del Pozo de Bombeo ... 349
9.4.9.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante ... 349
9.4.10 Pozo de Bombeo – Lechugal (H3-PPY-040) ... 353
9.4.10.1 Características del Pozo de Bombeo (H3-PPY-040) ... 354
9.4.10.2 Características del Pozo de Observación (H3-PPY-041) ... 354
9.4.10.3 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante ... 354
10 HIDROGEOQUÍMICA ... 363
10.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA ... 363
10.1.1 Puntos de Muestreo ... 363
10.1.2 Procedimientos de Muestreo ... 365
10.1.2.1 Medición del Nivel de Agua ... 365
10.1.2.2 Purgado del Pozo ... 365
10.1.2.3 Medición de Parámetros de Campo ... 365
10.1.2.4 Recolección de Muestras ... 366
10.1.2.5 Descontaminación de Equipos ... 367
10.1.2.6 Preservación y Manejo de Muestras ... 367
10.1.3 Metodologías de Análisis ... 371
10.2 EVALUACIÓN DE LA RED HIDROGEOQUÍMICA DE MONITOREO ... 372
10.3 TRATAMIENTO DE DATOS ... 373
10.3.1 Balance Iónico ... 373
10.3.2 Metales Totales y Disueltos ... 374
10.3.3 Análisis de Duplicados y Blancos ... 374
10.4 NORMATIVA DE CALIDAD DE AGUA ... 374
10.4.1 Normativa Peruana ... 375
10.4.2 Normativa Ecuatoriana ... 376
10.4.3 Lineamientos Internacionales ... 377
10.5 RESULTADOS ... 378
10.5.1 Calidad del Agua Subterránea ... 378
10.5.1.1 Parámetros de Campo ... 378
10.5.1.2 Parámetros Químicos del Agua Subterránea ... 380
10.6 PRINCIPALES ANIONES Y CATIONES ... 384
10.7 CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA ... 387
10.7.1 Aguas Poco Mineralizadas ... 389
10.7.2 Aguas de Avanzada Mineralización ... 390
10.8 CONTROL DE CALIDAD ... 393
10.8.1 Balance Iónico ... 393
10.8.2 Metales Totales y Disueltos ... 395
10.8.3 Análisis de Duplicados y Blancos ... 396
10.9 PRINCIPALES RELACIONES ISOTÓPICAS ... 398
10.9.1 Revisión de Información Isotópica Existente ... 398
10.9.1.1 Recta Meteórica ... 402
10.9.1.2 Isotopía de las Aguas Superficiales ... 406
10.9.1.3 Isotopía de las Aguas Subterráneas ... 407
10.9.2 Relaciones Isotópicas ... 410

10.9.2.1 Relaciones Isotópicas δ2H-δ18O ... 410
10.10 CONCLUSIONES ... 412
10.11 RED DE CONTROL HIDROGEOQUÍMICO OPTIMIZADA PROPUESTA ... 414
11 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO ... 419
11.1 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO ... 425
11.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS ... 425
11.3 ZONAS DE RECARGA ... 426
11.4 ZONAS DE DESCARGA ... 426
11.5 DIRECCIÓN DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA ... 426
12 MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO ... 435
12.1 SELECCIÓN DE CÓDIGO DE MODELAMIENTO ... 435
12.2 DISEÑO DEL MODELO DE ACUÍFERO ... 435
12.2.1 Diseño del Modelo del Acuífero ... 435
12.2.2 Discretización del Sistema Acuífero ... 437
12.2.3 Unidades ... 441
12.2.4 Números de Capas y Tipo de Acuífero ... 442
12.2.5 Condiciones de Frontera ... 444
12.2.6 Parámetros de Entrada del Modelo ... 456
12.2.7 Conductividad Hidráulica ... 457
12.2.8 Puntos de Observación de los Niveles de Agua Subterránea ... 458
12.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO ... 459
12.3.1 Calibración en Régimen Permanente ... 460
12.3.1.1 Solucionadores de la Matriz de Flujo del Agua Subterránea ... 460
12.3.1.2 Parámetros Hidráulicos Calibrados del Modelo de Flujo ... 460
12.3.1.3 Estadísticas de Calibración del Modelo de Flujo ... 462
12.4 SIMULACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO ... 465
12.4.1 Distribución de la Napa Freática Calibrada ... 465
12.4.2 Balance Hídrico del Modelo Calibrado ... 466
12.5 DISPONIBILIDAD HÍDRICA ... 468
12.5.1 Reserva Total de Agua Subterránea ... 468
12.5.2 Reserva Explotable de Agua ... 469
13 PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE CONTROL DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS ... 471
13.1 CRITERIOS ... 471
13.2 JUSTIFICACIÓN ... 471
13.3 RED DE CONTROL PIEZOMÉTRICO OPTIMIZADA PROPUESTA ... 471
14 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ... 477
14.1 CONCLUSIONES ... 477
14.2 RECOMENDACIONES ... 479
15 LINEAMIENTOS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL ACUÍFERO ... 481
16 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ... 482

VOLUMEN III ... ANEXOS
ANEXO I ... CLIMA E HIDROLOGÍA
ANEXO II ... ESTRATIGRAFÍA

ANEXO III ..... GEOFÍSICA

ANEXO IV ..... INVENTARIO DE POZOS

ANEXO V ..... PRUEBAS DE BOMBEO

ANEXO VI ..... HIDROGEOQUÍMICA

ANEXO VII ..... PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO VIII ..... MODELO NUMÉRICO

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1: Coordenadas del Área de Estudio 45

Tabla 3-2: Población Total 49

Tabla 3-3:Población por Edad 49

Tabla 3-4:Distribución de la Población por Género 50

Tabla 3-5: Distribución de Población Urbana y Rural 51

Tabla 3-6: Población Económicamente Activa (PEA) 52

Tabla 3-7: Población en Edad de Trabajar Según Área Rural y Urbana 52

Tabla 3-8:Porcentaje de Ocupación por Actividad a Nivel de Cantón en Ecuador 53

Tabla 3-9:Porcentaje de Ocupación por Actividad a Nivel Distrital en Perú 54

Tabla 3-10:Localización de las Principales Playas - Zarumilla 58

Tabla 3-11 : Procedencia del Agua para Uso Poblacional – Ecuador 59

Tabla 3-12: Cobertura de Agua para Uso Poblacional de la Parroquia Huaquillas (2016) 60

Tabla 3-13: Procedencia del Agua para Uso Poblacional – Perú 61

Tabla 3-14: Uso poblacional Atendido por JASS en el Sector Peruano 61

Tabla 3-15: Autorizaciones de Uso de Agua para Aprovechamiento Industrial en la Cuenca Zarumilla - Ecuador 62

Tabla 3-16: Demanda Hídrica Industrial y Piscícola en el Valle Zarumilla - Perú 63

Tabla 4-1: Metadatos de la Información Climatológica Obtenida de la NASA 65

Tabla 4-2: Parámetros Morfológicos de las Microcuencas en el Área de Estudio 71

Tabla 4-3: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 1 72

Tabla 4-4: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 2 73

Tabla 4-5: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 3 74

Tabla 4-6: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 4 75

Tabla 4-7: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 5 77

Tabla 4-8: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 6 78

Tabla 4-9: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 7 79

Tabla 4-10: Suelos 88
Tabla 4-11: Cobertura Vegetal 91
Tabla 4-12: Humedales 97
Tabla 4-13: Áreas Naturales Protegidas 103
Tabla 4-14: Especies Representativas de Avifauna del PN Cerros de Amotape 106
Tabla 4-15: Ubicación de Estaciones Pluviométricas Alrededor del Área de Estudio 108
Tabla 4-16: Periodos de información de Estaciones Pluviométricas alrededor del Área de Estudio 109
Tabla 4-17: Precipitación (mm) Promedio Mensual de las Estaciones de SENAMHI e INAMHI en el Área de Estudio 109
Tabla 4-18: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 1 111
Tabla 4-19: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 2 113
Tabla 4-20: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 3 113
Tabla 4-21: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 4 114
Tabla 4-22: Promedio Anual de Temperatura versus Altitud de las Estaciones Alrededor del Área de Estudio 115
Tabla 4-23: Radiación Solar (kwh/m^2/día) Promedio Mensual Periodo 1984-2017 117
Tabla 4-24: Humedad Relativa (%) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 118
Tabla 4-25: Velocidad del Viento (m/s) Promedio Mensual periodo 1979-2014 118
Tabla 4-26: Precipitación (mm) Promedio Mensual de Estaciones de SENAMHI y INAMHI en el Área de Estudio 122
Tabla 4-27: Precipitación Promedio Mensual (mm) de las Estaciones Pluviométricas versus Altitud 122
Tabla 4-28: Precipitación Promedio Mensual (mm) de las Estaciones Grilladas GPM en el Área de Estudio 125
Tabla 4-29: Resumen de los Indicadores Estadísticos para la Comparación de las Series de Tiempo Promedio Mensuales de las Estaciones SENAMHI e INAMHI vs. GPM 126
Tabla 4-30: Principales Parámetros de Crítica de Datos 127
Tabla 4-31: Rango de Índice de Precipitación Estandarizada 130
Tabla 4-32: Probabilidades de Exceso por Precipitación 131
Tabla 4-33: Probabilidades de Déficit por Precipitación 131
Tabla 4-34: Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones GPM versus Altitud 131
Tabla 4-35: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Arenillas GPM 134
Tabla 4-36: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación La Cuca GPM 135
Tabla 4-37: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Palmales GPM 136

Tabla 4-38: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Quebrada Seca GPM 137

Tabla 4-39: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Chahuarhuaico GPM 138

Tabla 4-40: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación El Limo GPM 139

Tabla 4-41: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de precipitación para los Meses del Año en la Estación Puente Puyango GPM 140

Tabla 4-42: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Cabo Inga GPM 141

Tabla 4-43: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Matapalo GPM 142

Tabla 4-44: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Papayal GPM 143

Tabla 4-45: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Rica Playa GPM 144

Tabla 4-46: Características Hidrológicas de los Tipos de Suelos Derivados en Base a la Información Geológica del Área, según la base de SWAT 152

Tabla 4-47: Parámetros de la Vegetación Según el Tipo de Uso de Tierra, según la Base de SWAT 153

Tabla 4-48: Balance Hídrico en la Subcuenca 1 157

Tabla 4-49: Tasas que Explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 1 . 159

Tabla 4-50: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 1 159

Tabla 4-51: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1999-2018, en el Aforo de la Subcuenca 1 159

Tabla 4-52: Balance Hídrico en la Subcuenca 2 160

Tabla 4-53: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 2 . 160

Tabla 4-54: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 2 161

Tabla 4-55: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1999-2018, en el Aforo de la Subcuenca 2 161

Tabla 4-56: Balance Hídrico en la Subcuenca 3 162

Tabla 4-57: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 3 . 163

Tabla 4-58: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 3 163

Tabla 4-59: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1998-2017, en el Aforo de la Subcuenca 3 163

Tabla 4-60: Balance Hídrico en la Subcuenca 4 164

Tabla 4-61: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 4 . 164

Tabla 4-62: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 4 165

Tabla 4-63: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1998-2018, en el Aforo de la Subcuenca 4 165
Tabla 4-64: Balance Hídrico en la Subcuenca 5 166
Tabla 4-65: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 5 . 167
Tabla 4-66: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 5 167
Tabla 4-67: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1999-2018, en el Aforo de la Subcuenca 5 167
Tabla 4-68: Balance Hídrico en la Subcuenca 6 168
Tabla 4-69: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 6 . 168
Tabla 4-70: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 6 169
Tabla 4-71: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 2001-2018, en el Aforo de la Subcuenca 6 169
Tabla 4-72: Balance Hídrico en la Subcuenca 7 170
Tabla 4-73: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 7 . 170
Tabla 4-74: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 7 171
Tabla 4-75: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 2001-2018, en el Aforo de la Subcuenca 7 171
Tabla 4-76: Balance Hídrico del Área de Estudio 172
Tabla 4-77: Volumen del Rendimiento de Agua 173
Tabla 4-78: Entradas de Agua Superficial 173
Tabla 4-79: Entradas al Agua Subterránea 173
Tabla 4-80: Ubicación de Aforo de la Subcuencas de Estudio 173
Tabla 4-81: Caudales Promedios Mensuales (m^3/s) Observados y Modelados para el Periodo 1999-2018 en el Aforo Puente Bolsico 174
Tabla 4-82: Ubicación de Estaciones GPM Alrededor del Área del Estudio 175
Tabla 4-83: Precipitaciones GPM Máximas en 24 horas por el Periodo 1999 – 2018 177
Tabla 4-84: Resultados del *Test* de Bondad Shapiro-Wilk para los Datos de Precipitación Máxima 24 horas 178
Tabla 4-85:Resultados del Ajuste de los Distintos Modelos Probabilísticos 178
Tabla 4-86: Precipitaciones Máximas en 24 horas para Diversos Periodos de Retorno 178
Tabla 4-87: Caudales Máximos Anuales (m^3/s) Obtenidos en cada Subcuenca por el Modelo SWAT (1999-2018) 180
Tabla 4-88: Resultados del *Test* de Bondad Shapiro-Wilk para los Datos de Caudal Máximos 24 horas 181
Tabla 4-89: Resultados del Ajuste de los Distintos Modelos Probabilísticos 182
Tabla 4-90: Caudales de Diseño para Diversos Periodos de Retorno en el Punto de Aforo 2 en la Subcuenca 2 182

Tabla 4-91: Oferta de Agua (hm^3/año)para Uso Poblacional de la Parroquia Huaquillas (2016) 185
Tabla 4-92: Cobertura de Agua para Uso Poblacional a Nivel de JAAPs - Ecuador 185
Tabla 4-93: Procedencia del Agua para uso Poblacional – Perú 186
Tabla 4-94: Volumen Provisto por ATUSA – Perú (Año 2016)..... 186
Tabla 4-95: Uso poblacional, JASS Cuenca Zarumilla, Perú 187
Tabla 4-96: Demanda Teórica de Agua para el año 2017 para Uso Agrícola – Recurso Superficial 187
Tabla 4-97: Demanda Teórica de Agua para el Año 2017 para Uso Agrícola – Recurso Subterráneo.... 188
Tabla 4-98: Demanda Teórica Mensualizada para el Año 2017 de Agua Superficial para Uso Agrícola (en hm^3)..... 189
Tabla 4-99: Demanda Teórica Mensualizada para el Año 2017 de Agua Subterránea para Uso Agrícola (en hm^3) 190
Tabla 4-100: Autorizaciones de Uso de Agua para Aprovechamiento Industrial en la Cuenca Zarumilla - Ecuador 190
Tabla 4-101: Demanda Hídrica Industrial y Piscícola en el Valle Zarumilla - Perú 191
Tabla 4-102: Recarga Estimada del Acuífero 192
Tabla 5-1: Correlaciones de Unidades Litoestratigráficas del Área de Estudio en Perú y Ecuador .. 197
Tabla 6-1: Parámetros de Adquisición - Geofísica TDEM 221
Tabla 6-2: Puntos de Evaluación - Geofísica SEV 224
Tabla 6-3: Puntos de Evaluación - Geofísica TDEM 224
Tabla 6-4: Equipos - Geofísica SEV 226
Tabla 6-5: Equipos - Geofísica TDEM 226
Tabla 6-6: Capas Geoeléctricas SEV 238
Tabla 6-7: Capas Geoeléctricas TDEM 250
Tabla 7-1: Resumen General de Pozos/Captaciones Inventariadas..... 265
Tabla 7-2: Pozos Inventariados por Tipo 267
Tabla 7-3: Pozos Inventariados por Estado de Pozo 267
Tabla 7-4: Detalle de los Pozos Utilizados Según su Tipo 268
Tabla 7-5: Detalle de los Pozos Utilizables Según su Tipo 268
Tabla 7-6: Pozos Inventariados Según Uso del Agua 271
Tabla 7-7: Pozos Inventariados Según su Profundidad 271
Tabla 7-8: Profundidad Mínima y Máxima de Pozos Inventariados Según su Tipo 272
Tabla 7-9: Comparación de Datos de Explotación Inventariados (2019) versus Completados 275
Tabla 7-10: Volumen de Explotación Mensual de Agua Subterránea en la Cuenca Zarumilla según Inventario del 2019 275

Tabla 7-11: Volumen de Explotación Mensual de Agua Subterránea en la Cuenca con Datos Completados 276

Tabla 7-12: Volumen de Explotación de Agua Subterránea en la Cuenca Zarumilla con Datos Completados 277

Tabla 7-13: Situación Legal de los Pozos Inventariados 279

Tabla 7-14: Detalle de Pozos Inventariados por Tipo y Equipamiento 280

Tabla 7-15: Pozos en Estado No Utilizable 280

Tabla 7-16: Comparativo de Cantidad Total de Pozos/Captaciones Inventariadas 282

Tabla 7-17: Comparativo de Pozos/Captaciones Inventariadas por su Tipo 284

Tabla 7-18: Comparativo de Pozos/Captaciones Inventariadas por su Estado 285

Tabla 9-1: Pozos de Pruebas de Bombeo Ejecutadas 305

Tabla 9-2: Cálculo de Conductividad Hidráulica (K) 362

Tabla 10-1: Puntos de Muestreo Hidrogeoquímico 363

Tabla 10-2: Parámetros Analizados 366

Tabla 10-3: Condiciones y Criterios de Muestreo 368

Tabla 10-4: Métodos y Límites de Detección 371

Tabla 10-5: Normativa Peruana de Calidad de Agua 375

Tabla 10-6: Normativa Ecuatoriana de Calidad de Agua 376

Tabla 10-7: Lineamientos Internacionales de Calidad de Agua Potable 377

Tabla 10-8: Parámetros de Campo de Calidad del Agua Subterránea 379

Tabla 10-9: Parámetros Químicos de Calidad del Agua Subterránea 381

Tabla 10-10: TDS (mg/L), pH, Dureza, Saturación de Calcita y Tipo de Aguas, Basado en eq.% de los Iones 386

Tabla 10-11: Tipos de Aguas 387

Tabla 10-12: Clasificación de Dureza Total Permanente según el U.S. Geological Survey 393

Tabla 10-13: Error del Balance Iónico y Características Hidroquímicas de las Aguas Analizadas 394

Tabla 10-14: Resultados de Análisis Isotópicos Existentes (2002-2004) 399

Tabla 10-15: Promedios Ponderados del δ18O y δ2H en Precipitaciones de Estaciones Meteorológicas Regionales (GNIP 2015) y Gradiente Vertical en Relación con Marcapomacocha 412

Tabla 10-16: Red de Control Hidrogeoquímico Optimizada Propuesta 415

Tabla 10-17: Parámetros Propuestos A ser Analizados 418

Tabla 11-1: Balance Hídrico por Subcuencas (mm/año) 421

Tabla 11-2: Balance Hídrico de la Cuenca Hidrogeológica Zarumilla (m^3/año) 421

Tabla 11-3: Volumen de Recarga (m^3) al Acuífero en la Cuenca Hidrogeológica Zarumilla 422

Tabla 11-4: Salida y Reingreso de Agua al Acuífero Zarumilla 424

Tabla 12-1: Unidades del Modelo Numérico 442

Tabla 12-2: Ubicación y Caudales de Bombeo de Pozos (WEL) en el Modelo Numérico 455
Tabla 12-3: Ubicación de Pozos (HOB) y Niveles Observados en el Modelo Numérico 458
Tabla 12-4: Estadística de Calibración del Modelo Numérico 463
Tabla 12-5: Caudales de Ingreso al Régimen de Aguas Subterráneas 467
Tabla 12-6: Caudales de Descarga del Régimen de Aguas Subterráneas 467
Tabla 12-7: Balance Hídrico de Aguas Subterráneas 467
Tabla 13-1: Red de Control Piezométrico Optimizada Propuesta 473

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Mapa de Ubicación de la Cuenca 46
Figura 3-2: Mapa de Ubicación Política 47
Figura 4-1: Mapa de Ubicación de las Subcuencas del Área de Estudio 68
Figura 4-2: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 1 81
Figura 4-3: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 2 82
Figura 4-4: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 3 83
Figura 4-5: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 4 84
Figura 4-6: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 5 85
Figura 4-7: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 6 86
Figura 4-8: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 7 87
Figura 4-9: Suelos 90
Figura 4-10: Cobertura Vegetal 92
Figura 4-11: Áreas Protegidas 105
Figura 4-12: Estaciones Meteorológicas 110
Figura 4-13: Estaciones Climáticas 112
Figura 4-14: Mapa de la Distribución Espacial de la Temperatura en el Área de Estudio 116
Figura 4-15: Mapa de Zonas Climáticas 121
Figura 4-16: Mapa de Distribución Espacial de la Precipitación 124
Figura 4-17: Mapa de Distribución Espacial de la Precipitación por Gradiente 133
Figura 4-18: Subcuencas del Área de Estudio 150
Figura 4-19: Mapa de Tipo de Suelo en el Área de Estudio según SWAT 151
Figura 4-20: Mapa de Uso de Suelo en el Área de Estudio según SWAT 154
Figura 4-21: Mapa de Pendientes en el Área de Estudio según SWAT 155
Figura 4-22: Mapa de Ubicación de Estaciones de Aforo 158
Figura 4-23: Distribución de la Recarga al Acuífero Profundo en el Área de Estudio 193
Figura 5-1: Influencia de las Cuencas Talara y Tumbes en el Área de Estudio 195

Figura 5-2: Elementos Tectónicos Principales y Cuencas del Sureste Ecuatoriano y Noroeste del Perú 196
Figura 5-3: Geología Regional 199
Figura 5-4: Columna Estratigráfica de la Cuenca de Tumbes 202
Figura 5-5: Columna Sintetizada de Vega et al. (2005), Completada con la Información de Martínez et al. (2004), Higley (2004) para Cuenca Tumbes 203
Figura 5-6: Sección Geológica Interpretada 1-1´ 206
Figura 5-7: Sección Geológica Interpretada 2-2´ 207
Figura 5-8: Sección Geológica Interpretada 3-3´ 208
Figura 5-9: Sección Geológica Interpretada 4-4´ 209
Figura 5-10: Sección Geológica Interpretada 5-5´ 210
Figura 5-11: Sección Geológica Interpretada 6-6´ 211
Figura 5-12: Sección Geológica Interpretada 7-7´ 212
Figura 5-13: Sección Geológica Interpretada 8-8´ 213
Figura 6-1: Arreglo Tipo Schlumberger 216
Figura 6-2: Hoja de Campo 219
Figura 6-3: Configuración de Electrodos 220
Figura 6-4: Control de Datos 220
Figura 6-5: TDEM Moving Loop 222
Figura 6-6: Corriente Producida por la Bobina Transmisora 223
Figura 6-7: Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) y Transitorios Electromagnéticos (TDEM) Ejecutados 225
Figura 6-8: SEV-1 Ecuador 229
Figura 6-9: SEV-2 Ecuador 230
Figura 6-10: SEV-3 Ecuador 231
Figura 6-11: SEV-4 Ecuador 232
Figura 6-12: SEV-5 Ecuador 233
Figura 6-13: SEV-1 Perú 234
Figura 6-14: SEV-2 Perú 235
Figura 6-15: SEV-3 Perú 236
Figura 6-16: SEV-4 Perú 237
Figura 6-17: SEV-5 Perú 238
Figura 6-18: Resultado TDEM E01 Ecuador 240
Figura 6-19: Resultado TDEM E02 Ecuador 241
Figura 6-20: Resultado TDEM E03 Ecuador 242
Figura 6-21: Resultado TDEM E04 Ecuador 243

Figura 6-22: Resultado TDEM E05 Ecuador 244
Figura 6-23: Resultado TDEM P01 Perú 245
Figura 6-24: Resultado TDEM P02 Perú 246
Figura 6-25: Resultado TDEM P03 Perú 247
Figura 6-26: Resultado TDEM P04 Perú 248
Figura 6-27: Resultado TDEM P05 Perú 249
Figura 6-28: Mapa de Georesistividad Interpretada 253
Figura 6-29: Sección Georesistiva Interpretada 1-1´ 254
Figura 6-30: Sección Georesistiva Interpretada 2-2´ 255
Figura 6-31: Sección Georesistiva Interpretada 3-3´ 256
Figura 6-32: Sección Georesistiva Interpretada 4-4´ 257
Figura 6-33: Sección Georesistiva Interpretada 5-5´ 258
Figura 6-34: Sección Georesistiva Interpretada 6-6´ 259
Figura 6-35: Sección Georesistiva Interpretada 7-7´ 260
Figura 6-36: Sección Georesistiva Interpretada 8-8´ 261
Figura 7-1: Pozos Inventariados por Sector 266
Figura 7-2: Pozos Inventariados por Tipo 269
Figura 7-3: Pozos Inventariados por Estado 270
Figura 7-4: Pozos Inventariados por Uso del Agua 273
Figura 7-5: Pozos Inventariados por Profundidad del Pozo 274
Figura 7-6: Pozos en Estado No Utilizable 281
Figura 7-7: Pozos del Inventario 2019 versus Pozos del Inventario Previo Ecuador 286
Figura 7-8: Pozos del Inventario 2019 versus Pozos del Inventario Previo Perú 287
Figura 8-1: Mapa Hidrogeológico Interpretado (Octubre 2019) 294
Figura 8-2: Mapa de Isoprofundidades de la Napa Freática (octubre 2019) 295
Figura 8-3: Sección Hidrogeológica Interpretada 1-1´ (Octubre 2019) 296
Figura 8-4: Sección Hidrogeológica Interpretada 2-2´ (Octubre 2019) 297
Figura 8-5: Sección Hidrogeológica Interpretada 3-3´ (Octubre 2019) 298
Figura 8-6: Sección Hidrogeológica Interpretada 4-4´ (Octubre 2019) 299
Figura 8-7: Sección Hidrogeológica Interpretada 5-5´ (Octubre 2019) 300
Figura 8-8: Sección Hidrogeológica Interpretada 6-6´ (Octubre 2019) 301
Figura 8-9: Sección Hidrogeológica Interpretada 7-7´ (Octubre 2019) 302
Figura 8-10: Sección Hidrogeológica Interpretada 8-8´ (Octubre 2019) 303
Figura 9-1: Pruebas de Bombeo Ejecutadas 306
Figura 10-1: Muestreo Hidrogeoquímico Ejecutado 364

Figura 10-2: Diagramas *Stiff* de las Aguas Subterráneas 388
Figura 10-3: Red de Monitoreo Isotópico Existente 401
Figura 10-4: Mapa de Isoyetas de Precipitación Media Anual (1964-2001) 405
Figura 10-5: Red de Control Hidrogeoquímico Optimizada Propuesta 417
Figura 11-1: Sección Hidrogeológica Conceptual 1-1´ (Octubre 2019) 427
Figura 11-2: Sección Hidrogeológica Conceptual 2-2´ (Octubre 2019) 428
Figura 11-3: Sección Hidrogeológica Conceptual 3-3´ (Octubre 2019) 429
Figura 11-4: Sección Hidrogeológica Conceptual 4-4´ (Octubre 2019) 430
Figura 11-5: Sección Hidrogeológica Conceptual 5-5´ (Octubre 2019) 431
Figura 11-6: Sección Hidrogeológica Conceptual 6-6´ (Octubre 2019) 432
Figura 11-7: Sección Hidrogeológica Conceptual 7-7´ (Octubre 2019) 433
Figura 11-8: Sección Hidrogeológica Conceptual 8-8´ (Octubre 2019) 434
Figura 12-1: Vista en Planta de la Extensión del Modelo Numérico 436
Figura 12-2: Vista Isométrica de la Extensión del Modelo Numérico 437
Figura 12-3: Vista en Corte de Discretización Vertical del Modelo 438
Figura 12-4: Vista en Planta de Discretización Horizontal del Modelo 438
Figura 12-5: Vista Isométrica de la Grilla del Modelo 439
Figura 12-6: Vista en Planta de la Distribución de la Elevación de Superficie (msnm) del Modelo Numérico 440
Figura 12-7: Vista en Planta de la Distribución de los Espesores (m) del Modelo Numérico 441
Figura 12-8: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas 442
Figura 12-9: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 1-1´ 442
Figura 12-10: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 2-2´ 443
Figura 12-11: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 3-3´ 443
Figura 12-12: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 4-4´ 443
Figura 12-13: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 5-5´ 443
Figura 12-14: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 6-6´ 443
Figura 12-15: Vista en Planta de la Condición de Borde de Recarga (RCH) 444
Figura 12-16: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Recarga (RCH) 445
Figura 12-17: Vista de Zonas con Mayor Evapotranspiración (EVT) en la Cuenca Hidrogeológica 446
Figura 12-18: Vista en Planta de la Condición de Borde de Evapotranspiración (EVT) 447
Figura 12-19: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Evapotranspiración (EVT) 448
Figura 12-20: Vista en Planta de la Condición de Borde de Río (RIV) 449
Figura 12-21: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Río (RIV) 450
Figura 12-22: Vista en Planta de la Condición de Borde de Dren (DRN) 451

Figura 12-23: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Dren (DRN) 452
Figura 12-24: Vista en Planta de la Condición de Borde de GHB 453
Figura 12-25: Vista en Isométrica de la Condición de Borde de GHB 454
Figura 12-26: Vista en Planta de los Pozos Implementados al Modelo Numérico 455
Figura 12-27: Vista en Planta de las Cargas Hidráulicas Iniciales del Modelo Numérico 457
Figura 12-28: Vista en Planta de la Ubicación de los Pozos 459
Figura 12-29: Distribución de la Conductividad Hidráulica del Modelo (m/s) 461
Figura 12-30: Vista Isométrica de la Conductividad Hidráulica Horizontal Calibrada 462
Figura 12-31: Comparación Valores Observados y Simulados en el Modelo Numérico 463
Figura 12-32: Vista en Planta de Valores Residuales en los Pozos de Observación del Modelo Numérico 464
Figura 12-33: Vista en Planta de la Napa Freática Calibrada 465
Figura 12-34: Vista Isométrica de la Distribución de la Elevación de la Napa Freática Calibrada (m.s.n.m.) del Modelo Numérico 466
Figura 12-35: Vista de la Disponibilidad Hídrica en la Cuenca Zarumilla 470
Figura 13-1: Red de Control Piezométrico Optimizada Propuesta 476

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1: Producción de Principales Especies de la Acuicultura 56
Gráfico 3-2: Exportación de Recursos Hidrobiológicos según Especie 56
Gráfico 4-1: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 1 73
Gráfico 4-2: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 2 74
Gráfico 4-3: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 3 75
Gráfico 4-4: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 4 76
Gráfico 4-5: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 5 77
Gráfico 4-6: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 6 79
Gráfico 4-7: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 7 80
Gráfico 4-8: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 1 111
Gráfico 4-9: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 2 113
Gráfico 4-10: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 3 114
Gráfico 4-11: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 4 114
Gráfico 4-12: Radiación Promedio Mensual de las Estaciones Climáticas del Área de Estudio 117
Gráfico 4-13: Humedad Relativa Promedio Mensual de las Estaciones Climáticas del Área de Estudio. 118
Gráfico 4-14: Velocidad del Viento Promedio Mensual en Estaciones Alrededor del Área de Estudio 119

Gráfico 4-15: Rosa de Viento de la Estación Climática 1 120
Gráfico 4-16: Rosa de Viento de la Estación Climática 2 120
Gráfico 4-17: Regresión Lineal entre Altitud y Promedio Anual de Precipitación de las estaciones Pluviométricas 123
Gráfico 4-18: Análisis de Confianza – Índices Anuales 128
Gráfico 4-19: Análisis de Confianza – Suma de Índices Anuales 128
Gráfico 4-20: Promedio Mensual de las Estaciones GPM, Alrededor del Área de Estudio 129
Gráfico 4-21: Índice de Precipitación Estandarizada – Qda. Seca GPM 130
Gráfico 4-22: Regresión Lineal entre Altitud y Promedio Anual de Precipitación GPM 132
Gráfico 4-23: Curvas de Variación Estacional para la Estación Arenillas GPM 135
Gráfico 4-24: Curvas de Variación Estacional para la Estación La Cuca GPM 136
Gráfico 4-25: Curvas de Variación Estacional para la Estación Palmales GPM 137
Gráfico 4-26: Curvas de Variación Estacional para la Estación Quebrada Seca GPM 138
Gráfico 4-27: Curvas de Variación Estacional para la Estación Chahuarhuaico GPM 139
Gráfico 4-28: Curvas de Variación Estacional para la Estación El Limo GPM 140
Gráfico 4-29: Curvas de Variación Estacional para la Estación Puente Puyango GPM 141
Gráfico 4-30: Curvas de Variación Estacional para la Estación Cabo Inga GPM 142
Gráfico 4-31: Curvas de Variación Estacional para la Estación Matapalo GPM 143
Gráfico 4-32: Curvas de Variación Estacional para la Estación Papayal GPM 144
Gráfico 4-33: Curvas de Variación Estacional para la Estación Rica Playa GPM 145
Gráfico 4-34: Curvas de Duración de la Subcuenca 1 145
Gráfico 4-35: Curvas de Duración de la Subcuenca 2 146
Gráfico 4-36: Curvas de Duración de la Subcuenca 3 146
Gráfico 4-37: Curvas de Duración de la Subcuenca 4 147
Gráfico 4-38: Curvas de Duración de la Subcuenca 5 147
Gráfico 4-39: Curvas de Duración de la Subcuenca 6 148
Gráfico 4-40: Curvas de Duración de la Subcuenca 7 148
Gráfico 4-41: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 1 159
Gráfico 4-42: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 1 160
Gráfico 4-43: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 2 161
Gráfico 4-44: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 2 162
Gráfico 4-45: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 3 163
Gráfico 4-46: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 3 164
Gráfico 4-47: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 4 165
Gráfico 4-48: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 4 166

Gráfico 4-49: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 5 167

Gráfico 4-50: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 5 168

Gráfico 4-51: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 6 169

Gráfico 4-52: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 6 170

Gráfico 4-53: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 7 171

Gráfico 4-54: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 7 172

Gráfico 4-55: Regresión Lineal entre Caudales Modelados vs. Observados 174

Gráfico 4-56: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT (Serie 1) versus Caudales Promedio Observados (Serie 2) en el Aforo Puente Bolsico 175

Gráfico 4-57: Precipitación Máxima Probable versus Periodo de Retorno para Cada Una de las Estaciones..... 179

Gráfico 4-58: Caudales Máximos Anuales Obtenidos por el Modelo SWAT en las Subcuencas del Área de Estudio 181

Gráfico 4-59: Caudales de Diseño para Diversos Periodos de Retorno Punto de Aforo AF-02-Subcuenca 2 183

Gráfico 7-1: Volumen Estimado de Agua Subterránea Explotada con Datos Completados..... 277

Gráfico 7-2: Volumen Estimado de Agua Subterránea Explotada con Datos Completados..... 278

Gráfico 7-3: Volumen Mensual Estimado de Agua Subterránea Explotada con Datos Completados 279

Gráfico 9-1: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-168 – Descenso Lineal 308

Gráfico 9-2: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-168 309

Gráfico 9-3:: Prueba de Recuperación en Pozo Balsalito- H1-CHA-168 310

Gráfico 9-4: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-PAL-011 – Descenso Lineal 314

Gráfico 9-5: Prueba de Bombeo a Caudal Constante en Pozo H1-PAL-011 315

Gráfico 9-6: Prueba de Recuperación en Pozo H1-PAL-011 316

Gráfico 9-7: Prueba de Bombeo en Pozo H1-PAL-011 – Pozo de Observación H1-PAL-012 317

Gráfico 9-8: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-QUE-053 - Descenso Lineal..... 320

Gráfico 9-9: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-QUE-053 321

Gráfico 9-10: Prueba de Recuperación en Pozo H1-QUE-053 322

Gráfico 9-11: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-170 - Descenso Lineal 325

Gráfico 9-12: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-170 326

Gráfico 9-13: Prueba de Recuperación en Pozo H1-CHA-170 327

Gráfico 9-14: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo Huaquillas H2-HUA-250 – Descenso Lineal 330

Gráfico 9-15: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo Huaquillas H2-HUA-250 331

Gráfico 9-16: Prueba de Recuperación en Pozo H2-HUA-250 332

Gráfico 9-17: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-PPY-325 - Descenso Lineal..... 335

Gráfico 9-18: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-PPY-325 336
Gráfico 9-19: Prueba de Recuperación en Pozo H1-PPY-325 337
Gráfico 9-20: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-ZAR-327 – Descenso Lineal 340
Gráfico 9-21: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-ZAR-327 341
Gráfico 9-22: Prueba de Recuperación en Pozo H1-ZAR-327 342
Gráfico 9-23: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-014 – Pozo de Observación Pozo H3-MAT-016 – Descenso Lineal 346
Gráfico 9-24: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-014 – Pozo de Observación H3-MAT-016 347
Gráfico 9-25: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-096 – Descenso Lineal 350
Gráfico 9-26: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-096 351
Gráfico 9-27: Prueba de Recuperación en Pozo H3-MAT-096 352
Gráfico 9-28: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-PPY-040 – Descenso Lineal 356
Gráfico 9-29: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-PPY-040 357
Gráfico 9-30: Prueba de Recuperación en Pozo H3-PPY-040 358
Gráfico 9-31: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-PPY-040 - Pozo de Observación H3-PPY-041 359
Gráfico 10-1: Diagrama Ternario Piper de las Aguas Subterráneas de los 10 pozos 385
Gráfico 10-2: Concentraciones de NO3- y Metales Traza (meq/L) en las Aguas Subterráneas 385
Gráfico 10-3: Clasificación de las Aguas Subterráneas para Riego Basado en el SAR (Wilcox 1955) 390
Gráfico 10-4: Diagrama Scholler de las Concentraciones de Iones Principales (meq/L) en las Aguas Subterráneas 392
Gráfico 10-5: Error del Balance Iónico (%) y Suma de Concentraciones de Principales Cationes y Aniones (meq/L) 394
Gráfico 10-6: Correlación entre EC (µS/cm) Medida en Campo y TDS Analizados en Laboratorio (mg/L) 395
Gráfico 10-7: Comparación de Concentraciones de Metales Disueltos y Totales 396
Gráfico 10-8: Concentraciones de Duplicados vs Originales 397
Gráfico 10-9: Concentraciones de Blancos vs. Mitad del Límite de Detección (LD/2) 398
Gráfico 10-10: Precipitaciones en el Acuífero Zarumilla 402
Gráfico 10-11: Recta Meteórica Local 403
Gráfico 10-12: Lluvias Promedio en el Acuífero Zarumilla 404
Gráfico 10-13: Comportamiento Isotópico de las Aguas Superficiales en el Acuífero Zarumilla 406
Gráfico 10-14: Comportamiento Isotópico de las Aguas Subterráneas en Abril 2003 en el Acuífero Zarumilla 407
Gráfico 10-15: Comportamiento Isotópico de las Aguas Subterráneas en el Acuífero Zarumilla 408

Gráfico 10-16: Grupos de Pozos Someros y Profundos en el Acuífero Zarumilla 409

Gráfico 10-17: Comportamiento Isotópico de Aguas Subterráneas, Superficiales y de Lluvia en el Acuífero Zarumilla 410

Gráfico 10-18: $\delta^{2}H$ y $\delta^{18}O$ de Aguas Subterráneas en los Pozos de la Cuenca Zarumilla (Octubre 2019) 411

Gráfico 10-19: Composición Isotópica de Precipitaciones Mensuales (Promedio) y Línea Meteórica Local (LMWL) de Correlación Lineal en la Estación Meteorológica Marcapomacocha y Promedios Mensuales y Anual (lAvgO18), y Promedio Ponderado (lWAvgO18 = ∑(δi*Pi)/ ∑Pi) según la Cantidad de Precipitación Mensual..... 412

Gráfico 11-1: Ubicación Esquemática de Subcuencas en el Acuífero Zarumilla 420

Gráfico 11-2: Precipitación Promedio Anual por Subcuencas (mm) 420

Gráfico 11-3: Modelo Hidrogeológico Conceptual y Balance Hídrico del Acuífero Zarumilla 422

Gráfico 11-4:Tasas del balance Hídrico..... 424

Gráfico 12-1:Tasas del balance Hídrico..... 468

LISTA DE FOTOS

Foto 4-1: Especies Arbóreas y Arbustos 98

Foto 4-2: Bosque muy seco tropical (bms-T).....99

Foto 4-3: Bosque seco tropical (bs-T)..... 100

Foto 4-4: Ceibo (Ceiba trischistandra)..... 101

Foto 4-5: Garza Cuca..... 102

Foto 4-6: Fauna en Reserva Ecológica Arenilla 104

Foto 4-7: Vista de PN Cerros de Amotape 106

Foto 4-8: Área de Conservación Regional Angostura Faical..... 107

Foto 6-1: Distribución y Trabajos de Campo 218

Foto 9-1: Pozo Balsalito- H1-CHA-168 311

Foto 9-2: Pozo Palmales- H1-PAL-011 y H1-PAL-012..... 318

Foto 9-3: Pozo Quebrada Seca - H1-QUE-053 323

Foto 9-4: Pozo Chacras H2-CHA-170 328

Foto 9-5: Pozo Huaquillas - H2-HUA-250..... 333

Foto 9-6: Pozo Papayal - H1-PPY-325 338

Foto 9-7: Pozo Zarumilla - H1-ZAR-327 343

Foto 9-8: Pozo Tutumo - H3-MAT-014 y H3-MAT-016..... 348

Foto 9-9: Pozo Isla Noblecilla - H3-MAT-096 353

Foto 9-10: Pozo Lechugal - H3-PPY-040 y H3-PPY-041 360

1 ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

En el marco del *Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Cuencas y Acuíferos Transfronterizos Puyango-Tumbes, Catamayo- Chira y Zarumilla*, el Programa de las Naciones Unidad para el Desarrollo (en adelante "PNUD") contrató al Consorcio Hidroyaku Zarumilla, compuesto por las empresas consultoras Hidroar S.A. y Global Yaku Consultores S.A.C., y representado por Global Yaku Consultores S.A.C. (en adelante "la Consultora") para ejecutar el servicio de consultoría "Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla".

Como parte de la Fase III (Sistematización, Análisis, Procesamiento e Integración de Información para la Elaboración del Estudio del Acuífero Zarumilla) del estudio se ha integrado, sistematizado, procesado y analizado los datos e información hidrogeológica generada en campo (Fase II), así como, la información secundaria complementaria que fue identificada en la Fase I. En conjunto permitirán conocer mejor las características del acuífero, actualizar el modelo hidrogeológico y el estimado de las reservas hídricas disponibles.

El presente documento constituye el cuarto entregable del estudio (Producto 4) y ha sido preparado considerando la tabla de contenido (TdC) establecida en los Términos de Referencia (TdR) proporcionados por el PNUD.

1.2 ANTECEDENTES

Los países de Perú y Ecuador comparten cuencas y acuíferos transfronterizos. Las tres cuencas más importantes compartidas por Perú y Ecuador, sin tener en cuenta aquellas que pertenecen a la cuenca del Amazonas (Napo, Tigre, entre otras) son:

- Puyango -Tumbes,
- Catamayo-Chira y
- Zarumilla

Estas tres cuencas transfronterizas drenan al Océano Pacífico.

Así, con el objetivo de mejorar las acciones binacionales emprendidas por Perú y Ecuador para lograr la Gestión Integrada de Recursos Hídricos Transfronterizos fue concebido el proyecto "Gestión Integrada de Recursos Hídricos de las Cuencas Transfronterizas y Acuíferos de Puyango Tumbes, Catamayo Chira y Zarumilla" (el Proyecto GIRHT). El Proyecto GIRHT, financiado por el Fondo Medio Ambiental Mundial (FMAM o GEF por sus siglas en inglés) e implementado por el PNUD, busca el fortalecimiento institucional, político, jurídico; así como, la mejora de las capacidades científico-técnicas para implementar el manejo integrado de estos recursos hídricos transfronterizos. Las instituciones que dirigen el Proyecto son la Secretaría Nacional del Agua (en adelante "SENAGUA") en Ecuador y la Autoridad Nacional del Agua (en adelante "ANA") en Perú.

Asimismo, en el marco del Proyecto y como base para la formulación del Plan de Acción Estratégica (PAE) para enfrentar los numerosos retos en la gestión sostenible de recursos

hídricos que se presentan en las cuencas transfronterizas mencionadas, se desarrolló un Análisis de Diagnóstico Transfronterizo (ADT), el cual se ejecutó en tres fases:

i. Recopilación y análisis de información secundaria,

ii. Validación participación y consulta, y

iii. Sistematización y síntesis.

Como parte de los resultados de este análisis se cuenta con una Geodatabase, la cual contiene información geológica, uso del suelo y cobertura vegetal, aptitud del suelo y áreas protegidas, a una escala de 1:100 000, la cual ha servido de insumo para el desarrollo de la presente consultoría.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Durante el diseño del Proyecto se realizó la recopilación de información existente de las cuencas y acuíferos transfronterizos, la cual permitió identificar un vacío de información hidrogeológica. La información hidrogeológica es necesaria para caracterizar a detalle los acuíferos.

En ese sentido, se identificó la necesidad de desarrollar un estudio hidrogeológico del acuífero transfronterizo Zarumilla que permita contar con una mejor recopilación e interpretación de información hidrogeológica considerada como importante para un mejor conocimiento de los acuíferos transfronterizos y, en consecuencia, para la gestión integrada de los recursos hídricos.

1.4 ALCANCES

El “Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla” (en adelante “el estudio”) tiene como alcance lo siguiente:

- Recopilación y organización de información secundaria existente,
- Visita inicial al área de estudio,
- Trabajos de campo para generación de información primaria, de acuerdo con el detalle siguiente:
    - Actualización del inventario de fuentes y captaciones de agua subterránea,
    - Implementación de hitos geodésicos, y nivelación y georreferenciación de pozos,
    - Ejecución de prospecciones geofísicas,
    - Ejecución de pruebas de bombeo,
    - Ejecución de muestreo hidrogeoquímico.
- Sistematización, procesamiento y análisis de información primaria y secundaria para:
    - Caracterización de los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos del área de estudio,
    - Caracterización del acuífero,

- Actualización/desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual,

- Actualización/desarrollo del modelo numérico (matemático),
- Estimación de reservas de agua disponibles y totales del acuífero,
- Identificación de lineamientos de gestión del acuífero,
- Sociabilización de resultados del estudio mediante un taller a los grupos de interés.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

El estudio tiene como objetivo principal estimar la disponibilidad hídrica del acuífero Zarumilla, permitiendo conocer el volumen de agua que tiene almacenado, y con ese conocimiento lograr el manejo óptimo y sostenible de los recursos hídricos disponibles.

1.5.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del estudio fueron:

- Actualizar el inventario de fuentes/captaciones de agua subterránea (pozos, drenes y galerías filtrantes) permitiendo conocer su ubicación georeferenciada, el estado y equipamiento de los pozos; así como, los usos de agua subterránea que se dan en el acuífero,
- Estimar el volumen de agua explotada, a partir de los datos de caudales y régimen de explotación registrados en la actualización del inventario de pozos/captaciones subterráneas,
- Implementar 04 hitos geodésicos y nivelar una red de 30 pozos,
- Generar información primaria a partir de prospecciones geofísicas, pruebas de bombeo y muestreo hidrogeoquímico que, en conjunto con la información existente, permitan desarrollar/actualizar el modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca,
- Desarrollar la caracterización del reservorio acuífero (límites, extensión, espesor, tipo de acuífero),
- Determinar la recarga de los acuíferos,
- Determinar la demanda o extracción de agua, la evaporación, la evapotranspiración, para establecer el balance hidrológico del acuífero,
- Actualizar la información cartográfica base y temática en un Sistema de Información Geográfica (SIG), a una escala adecuada para el tamaño de la cuenca (1: 25.000),
- Desarrollar/actualizar el modelo hidrogeológico numérico del acuífero,
- Estimar las reservas de agua subterránea con las que cuenta el acuífero,
- Proponer lineamientos para una gestión adecuada del acuífero que permitan optimizar su explotación y reducir su vulnerabilidad.

1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El estudio se ejecutó en tres fases:

i. Trabajos preliminares,

ii. Trabajos de campo, y

iii. Trabajos de gabinete.

Las fases de trabajo se describen a continuación.

1.6.1 Trabajos Preliminares

Los trabajos preliminares comprendieron las actividades que se describen a continuación.

1.6.1.1 Recopilación y Revisión de Información Existente de Fuentes Secundarias

Se revisó toda la información que se tuvo disponible respecto a pozos/piezómetros, hidroquímica del agua subterránea, meteorología, geología, geomorfología, suelos, hidrología, con el fin de identificar la suficiencia de información y vacíos existentes de cada una de las temáticas mencionadas.

Los resultados de esta revisión fueron importantes y permitieron identificar zonas con información limitada o no válida que, en conjunto con la información obtenida durante las reuniones iniciales de los profesionales de la ANA y SENAGUA, y la recabada de los actores locales durante la visita de campo (ver ítem 1.6.1.2), permitieron definir las zonas de interés y prioritarias a evaluar, y planificar adecuadamente los trabajos de campo a ejecutar.

1.6.1.2 Visita de Campo

Esta visita fue realizada en dos etapas, la primera del 02 al 05 de agosto, y la segunda del 18 al 19 de agosto del 2019. La visita de campo fue realizada con fines de entablar comunicación con actores locales, reconocer las potenciales zonas de interés y sus vías de comunicación y acceso. Durante estas visitas se ejecutaron también actividades orientadas a la colecta de información en oficinas locales de proyectos o instituciones que podrían tener información relevante para el estudio.

Los trabajos ejecutados en las visitas de campo permitieron establecer comunicación, tanto con las instituciones a cargo de la gestión del recurso hídrico subterráneo de Ecuador y Perú, como con los actores locales (autoridades locales, organizaciones de riego, dirigentes, entre otros); así como la identificación de las zonas y accesos existentes en el área de estudio con énfasis en las zonas identificadas como de mayor interés en las reuniones iniciales con SENAGUA y ANA.

Durante la visita de campo se identificaron las zonas de interés para el aprovechamiento de aguas subterráneas y zonas donde existe problemáticas respecto a las condiciones actuales del agua subterránea (salinización de agua extraída de pozos de bombeo, descenso de nivel de agua), las cuales requieren información complementaria. La información recabada en el reconocimiento de campo y la información recabada de algunos actores locales permitió, en conjunto con la revisión de la información existente, priorizar la ubicación de ensayos geofísicos propuestos (Sondeos Eléctricos Verticales-SEV y Tiempo de Inducción

Electromagnético-TDEM), las zonas de muestreo hidrogeoquímico y de nivelación piezométrica.

1.6.1.3 Planificación de los Trabajos de Campo

Como parte de esta actividad se ejecutaron las siguientes actividades:

Preparación del Plan de Trabajo Detallado de Campo

Se preparó un plan de trabajo detallado el cual incluyó el detalle del personal, materiales y equipos, área de estudio y/o zonas de trabajo, metodología y cronograma propuesto para ejecución de las actividades de campo a ser ejecutadas en la Fase de Campo del estudio, las cuales se listan a continuación:

- Actualización del inventario de fuentes/captaciones de agua
- Optimización de redes
  - Nivelación y georeferenciación de pozos
  - Muestreo de calidad de agua (hidrogeoquímico)
- Prospección geofísica
  - Ensayos geofísicos (SEV)
  - Ensayos geofísicos (TDEM)
- Ejecución de pruebas de bombeo en pozos equipados

Preparación Logística

Se realizaron las coordinaciones logísticas y preparación de equipos y materiales requeridos para la ejecución de los trabajos de campo planificados, lo cual incluyó:

- Coordinaciones para la movilización Lima-Tumbes-Lima,
- Coordinaciones para la movilización en el área de estudio,
- Coordinaciones para el alojamiento y alimentación en el área de estudio,
- Preparación de fichas y registros de campo,
- Preparación de equipos y materiales,
- Coordinaciones con subconsultores (Geofísica SEV, Geofísica TDEM y Nivelación y Georreferenciación de Pozos),
- Coordinaciones con laboratorio a cargo del análisis de calidad de agua,
- Preparación de mapas base,
- Coordinaciones con ANA y SENAGUA, y
- Coordinaciones con representantes locales y guías identificados en la Visita de Campo.

1.6.2 Trabajos de Campo

Los trabajos de campo comprendieron el desarrollo de las siguientes actividades:

1.6.2.1 Actualización del Inventario de Fuentes/Captaciones de Agua

El trabajo de campo para la actualización del inventario fue realizado del 02 al 26 de setiembre y del 29 de noviembre al 07 de diciembre del 2019.

El área de estudio lo constituyó el acuífero transfronterizo Zarumilla; sin embargo, se definió en acuerdo con la Supervisión/Fiscalización, integrantes del Grupo Técnico Binacional (GTB) y especialistas de ANA y SENAGUA, que los trabajos de campo priorizaran sectores de interés, por lo cual fueron excluidas las áreas ubicadas dentro de los límites de áreas naturales protegidas tanto de Perú (zona reservada Tumbes, reserva Angostura-Faical y área natural Manglares de Tumbes), como de Ecuador (reserva Arenillas), y el sector La Victoria en Ecuador.

Los datos que se registraron, en la medida de lo posible, fueron:

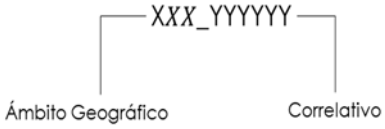
- Datos de ubicación (coordenadas UTM) y altitud,
- Datos hidrológicos/hidráulicos,
- Parámetros fisicoquímicos *in situ*,
- Datos constructivos, y
- Características físicas del agua.

Los códigos de campo asignados a los pozos/captaciones inventariadas en la ficha de campo incluyeron información de la brigada de trabajo que levantó la información, la zona del área de estudio y un número correlativo que identifica el orden en el que fue inventariado en ese sector específico. A manera de ejemplo se describe a continuación:

- H1-MAT-002: Pozo número 2, inventariado por la Brigada 1, en el distrito de Matapalo.
- H5-AGV-187: Pozo número 187, inventariado por la Brigada 5, en la zona de Aguas Verdes.

En el caso de los pozos/captaciones que tenían códigos de inventario de la Autoridad o institución de la gestión del agua correspondiente (ANA o SENAGUA), éstos también se consideraron en el registro, cuando fue posible su identificación en campo.

Finalmente, se asignó un código final de las fuentes y captaciones de agua subterránea registradas en el inventario, tomando como criterio la ubicación geográfica a nivel de país de cada pozo levantado en campo, permitiendo una normalización y estandarización de la descripción e identificación de cada pozo. La información georreferenciada de cada pozo se encuentra identificado mediante un descriptor de acuerdo con el siguiente esquema:



A continuación, se ilustra un ejemplo con un nombre de pozo georreferenciado de la base de datos espacial:

EC – 0001

Donde:

EC: Indica que está ubicado en el país de Ecuador

0001: Número correlativo de pozos considerando de Sur a Norte su ubicación en el área de estudio

1.6.2.2 Optimización de Redes

La optimización de redes incluyó las actividades descritas a continuación:

Nivelación y Georreferenciación de Pozos

A continuación, se describe la metodología considerada para la medición topográfica:

- Identificación de los 04 hitos a monumentar y 30 pozos a nivelar: para ello se verificó que el punto definido preliminarmente se encontrará en un área despejada respecto al horizonte con buena accesibilidad y seguridad. Identificado el lugar de la monumentación del hito se verificó que existía una buena cantidad de señales recibidas tanto de la constelación GLONASS como GPS. Para el caso de los 30 piezómetros se identificó la ruta de acceso a la zona donde se ubicaba cada uno de los pozos y se estimaron los tiempos de llegada, en campo se identificó el pozo y se realizó la monumentación y medición de las cotas para cada pozo seleccionado.
- Monumentación: esta actividad se realizó para concretizar la medición realizada en cada hito y piezómetro, ejecutando en cada uno los siguientes pasos:
  - Proceso constructivo: Se identificó el lugar donde se realizó la excavación del terreno según el molde de 0.30 m x 0.30 m utilizando una barreta, con una profundidad mayor a 0.40 m. Se verificó que no exista material suelto y se limpió la excavación para el posterior vaciado.
  - Vaciado: La excavación se preparó poniendo en el interior rocas de mayor diámetro y sobre ella se vertió la mezcla (arena, cemento, piedra chancada y agua) que fue preparada en paralelo. Se llenó hasta el límite del molde de madera, para luego realizar el pulido de la superficie del bloque de concreto.
  - Colocación de placa: Terminado el proceso de pulido se colocó la placa de bronce y se esperó unos minutos a que repose la ubicación para la posterior medición.
  - Instalación de equipos: Se instalaron los equipos y se tomó como referencia el punto de la placa de bronce colocada sobre la monumentación.
- Toma de datos: se realizó mediante el método estático que consiste en la utilización de un receptor base “Master” sobre un punto con coordenadas conocidas de la Red Geodésica Nacional (REGGEN), y otro receptor llamado “Rover”. Ninguno de los dos receptores se mueve durante el tiempo de medición. Para los 04 hitos se tuvieron tiempos de medición superiores a las 3 horas, y tiempos superiores a los 15 minutos de medición para los 30 piezómetros, tomando como base los hitos monumentados.

Muestreo de Calidad de Agua Subterránea (10 pozos)

En base a la revisión de los pozos existentes y considerando sus características y equipamiento, así como la revisión de los resultados hidrogeoquímicos existentes, se definieron 10 puntos de muestreo de calidad de agua, distribuidos para que sean lo más representativos posible y complementen óptimamente la información existente en el acuífero transfronterizo.

A continuación, se describen las actividades de muestreo ejecutadas:

- Medición del nivel de agua: la cual se ejecutó usando una sonda eléctrica con la cual se midió el nivel del agua, dato que fue registrado en la libreta de campo y/o ficha de muestreo. Este dato permitió calcular el volumen de agua a desalojar del pozo en el purgado.
- Purgado del pozo: se estimó los tres (03) volúmenes de agua del pozo, en base a la profundidad del pozo y nivel freático medido, lo cual debería permitir desalojar el agua estancada con el fin de obtener muestras representativas del agua del acuífero; sin embargo, debido a que las pruebas de bombeo se efectuaron en pozos habilitados para uso poblacional, el purgado del pozo se consideró luego de un tiempo razonable de transcurrido el bombeo. La operación se realizó después de la medición del nivel del agua. Como indicativo de que el agua es representativa del acuífero se midió el pH, conductividad eléctrica y temperatura hasta lograr la estabilidad de estos parámetros.
- Medición de parámetros de campo: Una vez estabilizados los parámetros de campo, se midió y registró en la libreta y/o ficha de campo la temperatura (ºC), conductividad eléctrica (µS/cm) y pH. Estos parámetros fueron medidos con equipos multiparámetros.
- Toma de muestra: se realizó la toma de muestra extraída con la bomba perteneciente al pozo, siguiendo los procedimientos de toma de muestra establecidos por el laboratorio y en frascos adecuados provistos por el laboratorio, de acuerdo con el parámetro a analizar. Las muestras de agua para metales disueltos fueron filtradas en campo usando filtros descartables en línea de 0.45 µm de apertura (tipo jeringa).
- Preservación y manejo de muestras: las muestras fueron preservadas con preservantes provistos por el laboratorio inmediatamente después de recogida la muestra, y almacenadas en los contenedores destinados para ese fin. Las muestras fueron debidamente etiquetadas asegurándose de incluir toda la información pertinente (código de muestra, punto de muestreo, fecha y hora de muestreo, preservantes añadidos, parámetros a analizar y responsable del muestreo). Una vez completado el etiquetado. Los contenedores una vez llenos fueron cerrados y enviados al laboratorio junto a su cadena de custodia, manteniendo las muestras de agua con temperatura fría (aprox. 5ºC) mediante el uso de *icepacks*. Las muestras fueron enviadas al laboratorio CERTIMIN, con metodologías acreditadas por el ente oficial de calibración del Perú.
- Descontaminación de equipos: todo el material usado fue limpiado tras su uso, mediante su lavado con agua destilada.

1.6.2.3 Prospección Geofísica

Esta actividad consideró la prospección del área de estudio mediante sondeos geofísicos, por los métodos de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Sondeo por Transitorios Electromagnéticos (TDEM), en sectores donde se requirieron información geofísica complementaria. Se ejecutaron 10 ensayos SEV y 10 ensayos TDEM, los cuales fueron distribuidos tanto en el sector peruano como en el sector ecuatoriano de la cuenca transfronteriza Zarumilla.

Sondajes Eléctricos Verticales (SEV)

Los ensayos geofísicos SEV fueron ejecutados del 17 al 19 de setiembre del 2019 y sus resultados permitieron identificar las zonas anómalas de baja resistividad relacionadas a mayores concentraciones de humedad y presencia de diferentes horizontes; así como posibles lineamientos eléctricos que pueden estar relacionadas a fracturas o fallas y contactos geoeléctricos, hasta una profundidad de 100 m.

En el SEV se introduce corriente continua al terreno mediante un par de electrodos de emisión, colocado en la parte externa A-B, donde en su recorrido radial desde cada punto de emisión experimentan una caída de tensión acordes con los factores condicionantes como humedad, textura del medio, grado de mineralización, temperatura y otros. Es así como esta caída de tensión se recepciona en otro par de electrodos internos M-N, donde las medias sucesivas parten de un punto cero, en forma ascendente y lineal (CON&SOL, 2019).

El arreglo utilizado, para esta campaña fue el de tipo Schlumberger, es decir, que los electrodos de potencial estarán al centro separados una distancia **a** y los electrodos de corriente estarán en los extremos a una distancia **na** de los electrodos de potencial. Otra forma de caracterizar la geometría para este arreglo es denominar **AB** a la distancia entre los electrodos de corriente y **MN** a la distancia entre los electrodos de potencial (veáse Figura 6-1), (CON&SOL, 2019).

En cada SEV se alcanzó aproximadamente los 100 metros de profundidad, para lo que empleó un AB/2 de 150 metros. A continuación, se listan los detalles de los parámetros de adquisición considerados:

- Configuración : Schlumberger
- AB/2 : 150 metros
- Salida de energía : 1 Kw.

Los trabajos, se iniciaron fijando en el terreno el punto elegido como centro del SEV, en el que se colocó una estaca que permitió localizarlo fácilmente. Se determinó el rumbo del dispositivo y se tendieron dos cintas métricas en esta dirección y en sentidos opuestos, con el origen en el punto central. Estas cintas permitieron determinar las posiciones de los electrodos en cada estación. A pocos metros del origen se instalaron los instrumentos de medición (transmisor y receptor).

Se colocaron los electrodos en las posiciones iniciales y se conectaron los cables. Antes de iniciar las mediciones, se procedió a la verificación del correcto funcionamiento de todas las conexiones, y que la resistividad entre electrodo-suelo sea suficientemente baja como para garantizar buenos resultados. En caso de tener valores elevados, generalmente bastó con clavar un poco más los electrodos, o humedecer el terreno para mejorar la conductividad.

Terminada la preparación, el operador procedió a realizar la inyección de corriente y la medida, tomando nota en la hoja de campo.

Seguidamente se desplazaron los electrodos A y B a las posiciones correspondientes a la segunda estación y se hizo la medición, igualmente se procedió en las estaciones subsiguientes

Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM)

Los ensayos geofísicos con el método TDEM se ejecutaron del 27 de setiembre al 05 de octubre del 2019 y sus resultados permitieron definir el contraste de resistividades entre las capas subhorizontales en el subsuelo y profundidad del basamento hasta una profundidad de 400 metros por debajo de la superficie.

En el método TDEM, una bobina de transmisión (conocida como transmitter loop en inglés) ubicada sobre la superficie del terreno es energizada por una corriente bipolar, generando un campo electromagnético primario. Durante el envío de corriente (“time-on”) un campo magnético estático es establecido en la tierra. Cuando la corriente en la bobina de transmisión es cortada rápidamente, el campo electromagnético inducido en la tierra hace que las corrientes torbellino (corriente de Foucault o eddy current en inglés) fluyan tanto en el suelo como en los conductores por debajo de la superficie. Las amplitudes de estas corrientes decaen rápidamente en el tiempo debido a la resistividad finita de la tierra, permitiendo detectar cuerpos conductivos o medir la conductividad de la tierra misma.

La amplitud del flujo de corriente en función del tiempo se mide registrando el decaimiento de su campo magnético utilizando una pequeña bobina receptora de múltiples vueltas (receiver coil en inglés) localizada en el centro de la bobina de transmisión. El decaimiento del campo es registrado en diferentes intervalos de tiempo durante el corte de corriente (“time-off”) (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

Para cada sondaje se midieron con dos tipos de frecuencia media (M-Medium) y alta (H-High). Los loops (bobinas de transmisión) fueron preparados con un cable de 10AWG, permitiendo una resistencia de contacto de 5.1 ohmios promedio (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

La bobina receptora (antena 3D) fue ubicada en el centro de cada loop, donde la convención de polaridad del eje Z se mantuvo positivo hacia arriba. La bobina receptora se mantuvo en el plano horizontal (X-Y) para todos los componentes de los sondeos (Valdor Sudamerica SAC, 2019)

El estudio electromagnético fue realizado con la configuración “in-loop”. Las lecturas fueron adquiridas en el centro de la bobina de transmisión (*loop*). El tamaño del cuadro empleado durante el levantamiento fue de 300 m x 300 m y solamente fue medida la componente vertical (Z) del campo secundario (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

La adquisición y procesamiento de datos de los sondajes TDEM se realizó de la siguiente manera:

Adquisición de Datos

- En la ubicación determinada por el cliente para realizar el sondaje, se instaló la bobina o cuadro de transmisión mediante el tendido de un cable de corriente formando un cuadro de 300 metros x 300 metros en la superficie del terreno.

- Los cables de la bobina de transmisión se conectaron al equipo transmisor TDEM.
- La bobina de recepción o antena receptora se ubicó al centro del cuadro de transmisión, y fue conectada al equipo receptor TDEM.
- El transmisor se conectó al receptor mediante un cable de referencia para establecer la sincronización entre ambos equipos.
- Se procedió al envío de corriente desde el equipo transmisor y en el equipo receptor se ingresaron los valores de corriente y tiempo de corte generados por el transmisor.
- Antes de la toma de lecturas en el receptor se verificó que el campo primario sea positivo en el centro del cuadro de transmisión. Si el campo primario era negativo, se tuvo que invertir los conectores del cuadro de transmisión en el equipo transmisor.
- Se procedió a la toma de lecturas en el equipo receptor con las frecuencias 30Hz (H), 7.5Hz (M) y en algunos casos la frecuencia baja 3.0Hz (L).
- Durante la toma de lecturas se analizó las curvas de descarga y se procedió a realizar más de tres repeticiones como parte del control de adquisición de datos. Los datos tuvieron una muy buena repetitividad.
- Concluida las lecturas se procedió al apago de equipos y recojo de cables, para dirigirse al próximo sondaje a ejecutar.
- Al final del día de trabajo los datos fueron descargados del equipo receptor enviados a la oficina de Lima para el procesamiento de información

Control de Calidad

La calidad de las lecturas recogidas fue verificada al momento de tomar la medición para asegurar la buena calidad de los datos obtenidos, controlando la caída de la curva para cada sondaje. La medición del componente Z del campo magnético secundario fue realizada con las frecuencias de 30.0 Hz (H) y 7.5 Hz (M) con el fin de abarcar la mayor parte del intervalo de tiempo posible, teniendo en cuenta los niveles de ruido. Los datos fueron registrados a través de un período de integración de 15 segundos a través de 20 ventanas (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

De regreso a la base de operaciones, los datos fueron transferidos desde la memoria del receptor hacia la PC Portátil. Los datos de cada punto son enviados a la oficina principal en Lima para su posterior análisis (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

Todos los datos procesados se guardan en formato ASCII para cada sondaje. El procesamiento y control de calidad se realiza con el programa TEMIXXL (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

1.6.2.4 Ejecución de Pruebas de Bombeo en Pozos Equipados

Esta actividad consideró la ejecución de diez (10) pruebas hidráulicas distribuidas en el acuífero Zarumilla entre Perú y Ecuador. Las pruebas de bombeo fueron desarrolladas en pozos operativos con condiciones técnicas y ubicación adecuada.

Idealmente, se buscó la presencia de pozos de observación cercanos para realizar el monitoreo de éstos durante la ejecución de las pruebas, con el fin de obtener los parámetros

hidráulicos del acuífero; los cuales se encontraron disponibles en dos (02) pozos en Ecuador y dos (02) en Perú. Los descensos del nivel del agua subterránea se realizaron tanto en el mismo pozo de bombeo como en los pozos de observación.

Las pruebas de bombeo se ejecutaron a caudal constante, con sus consiguientes pruebas de recuperación. El tiempo de ejecución de las pruebas de bombeo estuvo supeditada a la capacidad de almacenamiento del agua, generalmente en reservorios para consumo de agua potable, y se prolongaron entre 0.5 a 19 horas en los pozos de Perú, y de 1 a 13.5 horas en los pozos de Ecuador; con recuperaciones que se prolongaron de 1 a 16 horas en los pozos de Perú y de 1 a 10.5 horas en los pozos de Ecuador. Este método permitió determinar el rendimiento y eficiencia del pozo, las características hidráulicas del acuífero (transmisividad, conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento), y datos sobre límites del acuífero.

Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Durante la prueba de bombeo a caudal constante (descarga continua), se monitoreó que el nivel de agua no descendiera por debajo del nivel de la bomba, tomando como referencia una distancia de 2 m sobre la bomba sumergible.

A medida que se realizó el bombeo se tomaron los parámetros fisicoquímicos para observar su evolución.

La recopilación de los datos de nivel de agua se hizo logarítmicamente con la siguiente periodicidad:

- 0 – 2 minutos, cada 15 segundos;
- 2 – 5 minutos, cada 30 segundos;
- 20 minutos, cada 1 minuto;
- 20 – 50 minutos, cada 2 minutos;
- 50 – 100 minutos, cada 5 minutos;
- 100 – 200 minutos, cada 10 minutos;
- 200 – 500 minutos, cada 20 minutos.
- >500 minutos, cada 30 minutos.

Prueba de Recuperación

Una vez terminada la etapa de descarga se procedió a realizar la etapa de recuperación del pozo, hasta adquirir, en la mayoría de los casos, su nivel de estabilidad, que mayormente se estabilizaba rápidamente debido a la alta permeabilidad del acuífero.

1.6.3 Trabajos de Gabinete

En gabinete se realizó la sistematización, procesamiento y análisis de información primaria generada y secundaria existente para:

- Actualizar el inventario de fuentes y captaciones de agua subterránea, clasificando los pozos inventariados de acuerdo con su tipo, estado, profundidad, y equipamiento del pozo, y el uso del agua explotada; asimismo, se realizaron comparaciones de los

resultados del inventario actual (Inventario 2019) versus el inventario previo (Inventario 2009),

- Estimar el volumen explotado en base a los resultados de caudal y régimen de explotación registrados en la actualización del inventario,
- Estimar el balance hídrico de la cuenca en base a información secundaria existente de clima, meteorología, e hidrología del área de estudio, usando el programa SWAT,
- Caracterizar el acuífero transfronterizo, en base a la evaluación de los resultados primarios de la prospección geofísica (SEV y TDEM), pruebas de bombeo, muestreo hidrogeoquímico, y secundaria de estudios previos,
- Actualizar/desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero,
- Actualizar/desarrollar el modelo hidrogeológico numérico (matemático) del acuífero usando el programa MODFLOW,
- Estimar las reservas de agua disponibles y totales del acuífero, e
- Identificar lineamientos de gestión sostenible del acuífero.

2 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA CUENCA

La cuenca y el acuífero transfronterizo Zarumilla han sido objeto de varios estudios, incluyendo estudios relacionados a los recursos hídricos superficiales y subterráneos y la caracterización de la cuenca hidrográfica y el acuífero, los cuales se describen a continuación.

2.1 ESTUDIOS EXISTENTES SOBRE RECUROS HÍDRICOS

2.1.1 Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

Herramienta de gestión elaborada en el marco de la cooperación y acuerdo binacional suscrito entre Perú y Ecuador. Cuenta con información temática usada de referencia en el presente estudio.

2.1.2 Informe Final de Diagnóstico Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto (GIRHT, 2014),

Estudio desarrollado para el proyecto GIRHT que reporta principalmente aspectos relacionados con el levantamiento de información secundaria, utilizada para la caracterización y diagnóstico de las cuencas hidrográficas en la Zona Ecuatoriana de las Cuencas Catamayo – Chira y Zarumilla. La información fue generada y entregada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Perú y por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) del Ecuador, así como de información primaria generada como parte del estudio referida a aspectos Legales, análisis de impactos ambientales y en aspectos socioeconómicos de las cuencas transfronterizas que forman parte de su alcance.

2.1.3 Modelamiento Hidrológico del Rio Zarumilla (SENAMHI, 2016)

Brinda un primer análisis de la información hidrometeorológica disponible en la cuenca Zarumilla tanto de Perú como de Ecuador. Contiene información de la red meteorológica e hidrométrica existente tanto en el sector peruano como ecuatoriano del área de estudio. Para el desarrollo del modelo utiliza datos meteorológicos e hidrológicos provenientes de la red que administra SENAMHI.

Identifica que respecto a los datos de caudal en la cuenca Zarumilla, en el año 2016, Perú no cuenta con alguna estación hidrológica operativa y Ecuador solo cuenta con una estación hidrológica automática instalada en la localidad de Carcabón en el año 2012. Asimismo, concluye que la información disponible para su desarrollo ha sido muy escasa y con algunos vacíos, y que debido a esto el periodo común de información observada de caudal y precipitación usado en su desarrollo corresponde a solo 5 años (periodo 1972-1976).

2.1.4 Introducción a la Hidrogeología del Ecuador – 2da edición (INAMHI, Agosto 2015)

Este documento técnico constituye una síntesis de los resultados de los estudios e investigaciones Hidrogeológicas del INAMHI sobre los acuíferos en el Ecuador, y presenta conceptos fundamentales, que permiten conocer y entender las aguas subterráneas y su estrecha vinculación con la geología imperante en cada sector.

Contiene información importante sobre la unidad hidrogeológica Machala – Zarumilla , presentando información sobre balance hídrico, geología, hidrogeología, inventario de puntos de agua e hidrogeoquímica, e hidrotermalismo.

2.1.5 Introducción a la Hidrogeología del Ecuador (INAMHI, Mayo 2011)

Documento desarrollado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del Ecuador, publicado el año 2011 que desarrolla los siguientes temas:

- Métodos de prospección de aguas subterránea.
- Formaciones geológicas y modo de yacimiento de las aguas subterráneas.
- Tipos de capas acuíferas.
- Parámetros hidrogeológicos.
- Conformación de fichas de inventario.
- Zonas de interés hidrogeológico.
- Cartografía hidrogeológica.
- Mapa hidrogeológico del Ecuador.
- Leyenda de las unidades litológicas permeables e impermeables y aquellas sin posibilidades de explotación de aguas subterráneas.
- Unidades Hidrogeológicas en términos de afinar aspectos técnicos y criterios que se manejan en el ámbito geológico e hidrogeológico.

2.1.6 Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Zarumilla (MINAGRI - ANA, Noviembre 2009)

Ejecutado por la Autoridad Nacional del Agua en el año 2009. Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

- Litológicamente el acuífero explotable está conformado por capas de arcilla, grava, arena fina y media, las cuales se presentan en forma alternada en sentido vertical.
- A la fecha de cierre del estudio, la explotación de la napa mediante pozos es de 15434318.20 m^3 (15.43 MMC) que equivale a una explotación continua de 0.49 m^3/s. Comparando esta explotación con la del año 2003 (6147242.20 m^3) se deduce que se ha incrementado la explotación del agua subterránea.
- Del total del agua subterránea explotada, mayormente se están extrayendo con pozos tubulares (10950505.00 m^3), y en segundo lugar están los pozos a tajo abiertos con una explotación de 4473960.00 m^3.
- De acuerdo con el uso, el agua explotada mayormente es utilizada para agricultura con 11476518.40 m^3 (74.35 %) y para uso doméstico con 3957799.80 m^3 (25.65 %).
- En el valle, el nivel de agua se encuentra entre 0.15 y 29.70 m de profundidad. Observándose los más profundos en los sectores de Quebrada Seca y Zarumilla. El estudio permitió reforzar las redes de control, tanto piezométrica (111 pozos) como hidrogeoquímica (99 pozos).

Se señala información referente al reservorio acuífero, entre éstas, geometría, dimensiones y aspectos relacionados con la hidráulica subterránea, hidrogeoquímica y características hidrogeológicas del subsuelo (acuífero Zarumilla).

2.1.7 Sondeos Magneto-telúricos de Espectro Amplio (AMT/MT) para el Estudio del Acuífero Transfronterizo de Zarumilla Ecuador – Perú (Arzate & Corbo, Mayo 2009)

Estudio que cuenta con interpretación de secciones geofísicas ejecutadas mediante sondeos magneto-telúricos de espectro amplio, realizados en el acuífero transfronterizo Zarumilla y desarrollado el año 2009. Cuenta con información de 02 campañas de prospección geofísica realizada en 2 etapas, la primera en territorio ecuatoriano y la segunda en territorio peruano. A través de la interpretación de los resultados obtenidos de los sondeos AMT y MT realizados en la zona de estudio en el año 2006, definieron de manera preliminar la estratigrafía del sistema hidrogeológico Zarumilla.

2.1.8 Investigaciones Geofísicas con Fines Hidrogeológicos en Sectores de las Cuencas Bajas de los Ríos Tumbes y Zarumilla (Provincias de Tumbes y Zarumilla) (MINAGRI - ANA, Abril 2009)

La Autoridad Nacional del Agua en el año 2009 realizó una publicación en la cual existe información geológica, geomorfológica, prospección geofísica, condiciones geoeléctricas del subsuelo, prospección geofísica, TDEM, SEV, trabajo de campo, trabajo de gabinete, secciones geoeléctricas y condiciones geoeléctricas del subsuelo.

2.1.9 Estudio de Prospección Geofísica y Levantamiento Hidrogeológico en el Cantón Zapotillo - Provincia de Loja (INAMHI, Mayo 2011)

Estudio geofísico ejecutado en la zona de Zapotillo, zona cercana a la cuenca Zarumilla, y consideró la ejecución de 26 SEV y como resultado generó de 6 perfiles geoeléctricos y 11 columnas geoeléctricas. Estudio ejecutado el año 20011 por el INAMHI.

2.1.10 Caracterización Hidrogeológica e Isotópica del Acuífero Transfronterizo Zarumilla , Ecuador – Perú (Coello, 2006)

El documento desarrollado por Coello, *et al* (2006) presenta importante información, hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica, recarga y descarga de acuíferos, definición de las zonas de recarga y descarga.

Esta información es muy útil para tener mejor conocimiento de la dinámica hidrogeológica e isotópica del acuífero transfronterizo del Zarumilla (recarga, tipo de agua, composición isotópica) y su comportamiento a nivel local y regional.

2.1.11 Estudio Hidrogeológico del Valle Zarumilla (MINAGRI - INRENA, Diciembre 2003)

Desarrollado principalmente por el Ministerio de Agricultura del Perú en el año 2003, el cual fue actualizado en el 2009 por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), que proporcionan datos de parámetros hidrodinámicos e hidrogeoquímicos.

La documentación contenida en el presente estudio hace referencia a las características generales del área de estudio, características geológicas y geomorfológicas, prospección geofísica, inventario de fuentes de agua subterránea, reservorio acuífero, hidrogeoquímica y condiciones hidrogeológicas del acuífero Zarumilla.

Se dio énfasis a la información geológico-estructural, en vista que es primordial para determinar las zonas potencialmente productivas y no productivas.

2.1.12 Tesis de pregrado "Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas, Área Chacras - Provincia de El Oro" (Aguilar & Marquinez, 2001)

Caracterización geológica e hidrogeológica, basados en información secundaria y primaria (4 SEV complementarios a los ya existentes) para caracterizar el acuífero que subyace a la zona de Chacras (Ecuador). Indican que la zona presenta una topografía sub-horizontal con vastas áreas planas, alteradas con pequeños cauces y esteros intermitentes. La litología está constituida por arenillas, limos, arenas y gravas con permeabilidad buena a media. La recarga natural de agua subterránea proviene de la Cordillera de Tahuín.

2.1.13 Estudio Puntual de Prospección Geofísica con Fines de Investigación en Varios Sectores de Zarumilla – Tumbes (MINAGRI - INRENA, 1997)

Presenta los resultados de 20 puntos de evaluación SEV ejecutados en diversos sectores de Zarumilla, generando 8 secciones geoeléctricas.

2.1.14 Inventario y Evaluación Nacional de las Fuentes de Aguas Subterráneas en el Valle de Zarumilla - Departamento de Tumbes (MINAGRI - INRENA, 1980)

Estudio ejecutado con fines de identificación de áreas favorables para la explotación de agua subterránea se ejecutaron 19 SEV, de los cuales 10 están ubicados dentro del distrito de Zarumilla y 9 en Papayal. Presenta carta de isoresistividades y carta de resistencias transversales.

2.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Después de revisar la información existente se procedió a su análisis, el cual consistió en determinar el tipo de información, parámetros, registro de datos, entre otros, y su relevancia en el presente estudio. Para mejor organización, los resultados del análisis fueron agrupados por temática para su rápida búsqueda y comprensión. A continuación, se presentan detalles del análisis ejecutado:

2.2.1 Información Geológica

Respecto a la información de la geología regional y geología local de la cuenca se encuentra en los estudios revisados, cuya fuente es el INGEMMET (Perú) y el INIGEMM (Ecuador). Así mismo, se identificaron estudios donde describen unidades litológicas, unidades geomorfológicas, unidades geológicas, entre otras.

Se identificaron estudios y cartografía temática que describe unidades litológicas, unidades geomorfológicas, unidades geológicas; aunque se observó un desfase entre la información geológica mapeada para en Ecuador y Perú.

2.2.1 Información Meteorológica

Se cuenta con información histórica de estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca Zarumilla y alrededores (16 pertenecen a Ecuador y 03 a Perú), las cuales cuentan con registros de un periodo entre 25 y 30 años en promedio, para los parámetros de precipitación diaria, precipitación mensual, temperatura máxima y temperatura mínima, y como mínimo entre 10 y 15 años de periodo de registro de datos para humedad relativa, heliofanía, evaporación y dirección del viento.

Estos datos, los más recientes, datan del año 2015, por lo que se complementó con datos meteorológicos de los últimos años para actualizar la caracterización meteorológica de la cuenca y estimaciones de precipitación requeridos para el estudio.

2.2.2 Información Hidrológica

De la información revisada, se identificaron tres estaciones hidrométricas en el sector peruano, y cinco estaciones hidrométricas en el sector ecuatoriano. En promedio cuentan con registros de caudal y precipitación desde el año 1964 hasta el 2000 para estas estaciones, aunque no se ha identificar su ubicación exacta. Asimismo, aunque no está claro la ubicación del punto de aforo, se ha identificado información de caudales correspondiente al periodo 2011 – 2015 del río Zarumilla y quebradas tributarias (Lajas, Palmales y Seca).

Esta información permitió validar los resultados del modelo hidrológico ejecutado como parte del presente estudio; sin embargo, tal como se recomendó en la Fase I del presente estudio, con la finalidad de validar los datos previos y contar con datos actualizados, es necesario el desarrollo de aforos diferenciales, especialmente en la cuenca alta del río Zarumilla, la cual aportará información relevante para el balance hidrogeológico.

2.2.3 Información Hidrogeológica

2.2.3.1 Geofísica

La información de prospección geofísica esta espacialmente distribuida, tal como se presenta en la Figura III-1 (véase Anexo III-C), siendo ejecutada tanto por Ecuador como por Perú. Los estudios geofísicos realizados a la fecha, tanto de TDEM como SEV, se enfocaron en la parte baja de la cuenca Zarumilla, debido a que en esta parte se encuentra concentrado el mayor potencial de uso urbano; sin embargo, el TDEM fue realizado solo en la parte peruana y no en la parte ecuatoriana. La información que puede brindar estos estudios geofísicos es valiosa pero limitada.

2.2.3.2 Hidrogeología

De los estudios revisados, se logró obtener un inventario previo (desactualizado) de los pozos existentes en la cuenca; así como, información limitada y puntual sobre niveles de agua subterránea, hidrogeoquímica, y de resultados de pruebas de bombeo que constituyen una base histórica para la interpretación hidrogeológica.

Se ha identificado un total de 1257 pozos, entre someros (956) con profundidades menores a 50 m; y profundos (95) con profundidades mayores a 50 m; y el resto (206) no cuentan con

datos. Del total de estos pozos, 853 se encuentran en territorio peruano y 404 en territorio ecuatoriano.

De la revisión de la información se puede indicar que:

- Todos los pozos se encuentran instalados en los valles, que generalmente están compuesto por materiales cuaternarios, aunque se desconoce su espesor, por lo que se interpreta que los pozos someros deben estar instalados en estos materiales, y los profundos podrían estar instalados en los lechos rocosos, y
- Los niveles piezométricos identificados en los pozos en el territorio peruano se encuentran entre 0.28 y 29.7 m bajo superficie, que podría indicar que se tratan de acuíferos libres; con caudales de extracción de 2.5 a 25 l/s. En el lado ecuatoriano, los niveles piezométricos se encuentran entre 0.32 y 4.9 m bajo superficie, y con caudales de extracción de 7 a 35 l/s, que también pueden interpretarse como acuíferos libres.

2.2.4 Información de Calidad de Agua Subterránea

De 860 pozos identificados (inventario previo) en la zona de Perú (distritos de Matapalo, Papayal, Aguas Verdes y Zarumilla) solo 116 cuenta con información de parámetros fisicoquímicos completos (pH. CE y TDS) o/y cationes y aniones (años 2003, 2007 y 2016), los cuales brindaron información parcial de las características hidroquímicas del acuífero Zarumilla. En la zona de Ecuador, de los 400 pozos inventariados (inventario previo) identificados en la información revisada solo 4 pozos cuentan con información de parámetros fisicoquímicos completos, que incluyen cationes y aniones.

Respecto a la hidroquímica del agua, todas las estaciones de monitoreo cuentan por lo menos una medición de parámetros de campo, sin embargo; no hay continuidad en el tiempo respecto a los análisis de cationes, aniones, metales y caudal.

En base a la información de pozos con datos hidroquímicos, se ha identificado que solo 24 pozos en el Perú cuentan con los datos de parámetros fisicoquímicos y iones mayores (cationes y aniones), con los cuales se puede efectuar un análisis químico de la calidad del agua; y en Ecuador solo 4 pozos cuentan con estos datos. El resto de los pozos solo cuentan con datos fisicoquímicos básicos (pH, CE y TDS), pero, adicionalmente, los pozos del territorio ecuatoriano no cuentan con datos de altitud.

No se cuentan con los reportes de los resultados de laboratorio, por lo que no ha sido posible validar los resultados encontrados. Ninguno de los pozos tiene información de detalles de instalación, por lo que no es posible identificar la profundidad de los filtros por donde ingresa el agua hacia el pozo, lo cual dificulta la interpretación e identificación de los acuíferos profundos y someros.

3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA

3.1 UBICACIÓN DE LA CUENCA

La cuenca transfronteriza Zarumilla abarca territorios de Ecuador y Perú, y cuenta con 874.72 km^2 de área total (GIRHT, 2014). Del área total, 502.28 km^2 se ubican en territorio del suroeste ecuatoriano (aproximadamente el 57%), y 372.44 km^2 (aproximadamente el 43%) en territorio del noroeste peruano. La Figura 3-1 presenta la ubicación de la cuenca transfronteriza Zarumilla.

El área de estudio lo constituye el acuífero transfronterizo Zarumilla; sin embargo, al ser la definición de sus límites parte de los objetivos del presente estudio para fines prácticos y considerando la información existente, la caracterización general se realizó a nivel del área que cubre la cuenca hidrográfica.

En acuerdo con la Supervisión/Fiscalización, integrantes del GTB y especialistas de la ANA y SENAGUA, se definió que los trabajos de campo priorizarían áreas de interés de la cuenca, por lo cual se excluyeron las áreas ubicadas dentro de los límites de áreas naturales protegidas tanto de Perú (zona reservada Tumbes, reserva Angostura Faical y área natural Manglares de Tumbes) como de Ecuador (reserva Arenillas) y el sector La Victoria en Ecuador, tal como se muestra en la Figura 3-1.

3.1.1 Ubicación Política

La cuenca transfronteriza Zarumilla se ubica políticamente en los cantones Las Lajas, Arenillas y Huaquillas, en la provincia El Oro en Ecuador; y en los distritos Aguas Verdes, Zarumilla, Matapalo y Papayal, en la provincia de Zarumilla, departamento de Tumbes en Perú (véase Figura 3-2).

3.1.2 Ubicación Geográfica

El área de estudio se ubica en la zona UTM 17 Sur, dentro de un polígono con coordenadas referenciales que se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Coordenadas del Área de Estudio

N°	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)	
	Este (m)	Norte (m)
1	586443	9620061
2	580867	9571981
3	614402	9587980
4	588140	9570688

Figura 3-1: Mapa de Ubicación de la Cuenca

Figura 3-2: Mapa de Ubicación Política

3.2 ACCESIBILIDAD – VÍAS DE COMUNICACIÓN

En el área de estudio se cuentan con tres redes principales de acceso:

- Una red principal que interconecta el área de estudio, con los poblados de Aguas Verdes, Zarumilla y Tumbes a través de la carretera Panamericana Norte en el sector peruano, y con las localidades de Huaquillas y Arenillas en el sector ecuatoriano,
- Una red secundaria, asfaltada en su totalidad, que interconecta a casi todas las localidades de los distritos de Zarumilla, Papayal y Matapalo en el sector peruano, y de los cantones de Las Lajas, Arenillas y Huaquillas en el sector ecuatoriano, y
- Una red terciaria formada por carreteras locales que unen a los pueblos de Pocitos, Cuchareta Baja, Cuchareta Alta, El Porvenir, La Palma, Isla Noblecilla, Nuevo Paraíso y otros en el sector peruano, y Loma Saavedra, Morales y La Avanzada de La Libertad y otros en el sector ecuatoriano.

3.3 DEMOGRAFÍA

La caracterización demográfica del área de estudio se desarrolló en base a los resultados del Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas, realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática en el año 2017 para el sector peruano; y para el sector ecuatoriano, en base a las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos a partir del censo de Población y Vivienda del 2010.

La información que se presenta es a nivel distrital para Perú y a nivel de parroquia para Ecuador, de acuerdo con el nivel de detalle de la información secundaria recopilada.

A continuación, se describen las principales características de la población como son; crecimiento poblacional por edad, sexo, urbano y rural; así como, población económicamente activa (PEA).

3.3.1 Población Total

La población total en el área de estudio asciende a 109145 habitantes, de los cuales el 45% (48844 habitantes) se encuentra en el territorio peruano y el 55% (60301 habitantes) en el territorio ecuatoriano.

En la Tabla 3-2 se muestra el total de la población y su distribución por país, cantones o provincias y parroquias o distritos, según corresponda.

Tabla 3-2: Población Total

	Cantón	Parroquia	2010	Tasa de Crecimiento (2000-2010)	Periodo	2017*
Ecuador	Huaquillas	Huaquillas	48285	2.01%	7	55503
	Arenillas	Chacras	1538	3.24%	7	1923
		Carcabón	548	0.51%	7	568
		Palmales	2130	1.15%	7	2307
	Población en Ecuador		**52501**			**60301**
	Provincia	**Distrito**	**2007**	**Tasa de Crecimiento (2007-2017)**	**Periodo**	**2017**
Perú	Zarumilla	Zarumilla	18463	1.8%	10	21776
		Aguas Verdes	16058	1.8%	10	17366
		Matapalo	1568	1.8%	10	3428
		Papayal	4965	1.8%	10	6274
	Población en Perú		**41054**			**48844**
Población Total en el Área de Estudio						**109145**

Fuente: Censos Nacionales de Población y Vivienda, 2017 (Perú); Censo de Población y Vivienda 2010 (Ecuador).
Nota: Se refiere a población proyectada sólo para fines de estimación de la población total.

3.3.2 Población por Edad

El grupo de edad de mayor representatividad en el área de estudio es el del rango de 5 a 9 años, seguido por los de 10 a 14 años. Así mismo, se observa que la menor población está representada por los menores de 1 año, tal como se muestra en Tabla 3-3.

Tabla 3-3:Población por Edad

Rango	Población Perú		Población Ecuador		Población en el Área de Estudio	Total
	Habitantes	%	Habitantes	%		(%)
Menor de 1 año	1008	0.99	910	0.9	1918	1.89
De 1 a 4 años	4395	4.34	4540	4.5	8935	8.82
De 5 a 9 años	5558	5.48	6093	6.0	11651	11.50
De 10 a 14 años	4888	4.82	6015	5.9	10903	10.76
De 15 a 19 años	3934	3.88	5326	5.3	9260	9.14
De 20 a 24 años	4060	4.01	4763	4.7	8823	8.71
De 25 a 29 años	4094	4.04	4400	4.3	8494	8.38
De 30 a 34 años	3793	3.74	4008	4.0	7801	7.70
De 35 a 39 años	3582	3.53	3580	3.5	7162	7.07
De 40 a 44 años	3062	3.02	2963	2.9	6025	5.95
De 45 a 49 años	2582	2.55	2496	2.5	5078	5.01
De 50 a 54 años	2265	2.23	2073	2.0	4338	4.28
De 55 a 59 años	1873	1.85	1637	1.6	3510	3.46
De 60 a 64 años	1355	1.34	1203	1.2	2558	2.52
De 65 a más años	2395	2.36	2494	2.5	4889	4.82
Total	**48844**	**48.20**	**52501**	**51.80**	**101345**	**100.00**

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú); Censo de Población y Vivienda 2010 (Ecuador).

3.3.3 Población por Género

Teniendo en cuenta la proyección del censo 2010 (INEC, Ecuador) para el 2020 existirán 53803 habitantes en territorio ecuatoriano, de los cuales el 50.20% (27011 habitantes) serán hombres; mientras que el 49.80% (26,792 habitantes) mujeres (véase Tabla 3-4). En el caso de la provincia Zarumilla (Perú), el censo del 2017 (INEI) registró un total de 48844 habitantes en los distritos que se encuentran en el área de estudio; de los cuales el 50.38% (24608 habitantes) son hombres y 49.62% (24236 habitantes) son mujeres (véase Tabla 3-4).

Teniendo en cuenta lo mencionado previamente, en el área de estudio la población de hombres y mujeres difiere en un 0.58%, concluyendo que la distribución de población por género es similar entre hombres y mujeres.

Tabla 3-4:Distribución de la Población por Género

	Cantón	Parroquia	Censo 2010	Porcentaje		Población	
				Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Ecuador	Huaquillas	Huaquillas	48285	49.95	50.05	24120	24165
	Arenillas	Chacras	1538	53.19	46.81	818	720
		Carcabón	736	53.13	46.88	391	345
		Palmales	3244	51.85	48.15	1682	1562
	Subtotal		**53803**	**50.20**	**49.80**	**27011**	**26792**
	Provincia	**Distrito**	**Censo 2017**	**Porcentaje**		**Población**	
				Hombres	**Mujeres**	**Hombres**	**Mujeres**
Perú	Zarumilla	Zarumilla	21776	49.81	50.19	10847	10929
		Aguas Verdes	17366	50.03	49.97	8689	8677
		Matapalo	3428	53.30	46.70	1827	1601
		Papayal	6274	51.72	48.28	3245	3029
	Subtotal		**48844**	**50.38**	**49.62**	**24608**	**24236**
Total en el área de estudio			**102647**	**50.29**	**49.71**	**51619**	**51028**

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú); Censo de Población y Vivienda 2010 (Ecuador).

3.3.4 Población Rural y Urbana

El censo del 2010 (INEC, Ecuador) muestra que el 100% de la población de las parroquias de Chacras, Carcabón y Palmales están en el área rural; mientras que el 98.8 % de la parroquia Huaquillas está en área urbana y solo un 1.2% en área rural.

Los resultados del censo 2017 (INEI, Perú) indican que el 93.68% de la población de la provincia Zarumilla se encuentra en área urbana y el 6.32% en área rural. Así mismo, se puede observar que los distritos de Matapalo y Papayal presentan mayor población rural que los otros distritos en el área de estudio.

En la Tabla 3-5 se muestra los detalles de la distribución de la población urbana y rural, en el área de estudio.

Tabla 3-5: Distribución de Población Urbana y Rural

Ecuador	**Cantón**	**Parroquia**	**Censo 2010**	**Porcentaje**		**Población**	
				Rural	**Urbana**	**Rural**	**Urbana**
	Huaquillas	Huaquillas	48285	1.20	98.80	579	47706
	Arenillas	Chacras	1538	100.00	0.00	1538	0
		Carcabón	736	100.00	0.00	736	0
		Palmales	3244	100.00	0.00	3244	0
	Subtotal		**53803**	**11.33**	**88.67**	**6097**	**47706**
Perú	**Provincia**	**Distrito**	**Censo 2017**	**Porcentaje**		**Población**	
				Rural	**Urbana**	**Rural**	**Urbana**
	Zarumilla	Zarumilla	21776	1.69	98.31	367	21409
		Aguas Verdes	17366	1.58	98.42	274	17092
		Matapalo	3428	15.99	84.01	548	2880
		Papayal	6274	30.25	69.75	1898	4376
	Subtotal		**48844**	**6.32**	**93.68**	**3087**	**45757**
Total			**102647**	**8.95**	**91.05**	**9184**	**93463**

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú); Censo de Población y Vivienda 2010 (Ecuador).

3.3.5 Población Económicamente Activa

El Convenio 138 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), indica que la Población en Edad de Trabajar (PET) está constituida por las personas aptas para ejercer funciones productivas (generación de un bien económico o prestación de un servicio) y, que la PET se subdivide en Población Económicamente Activa (PEA) y Población Económicamente Inactiva (PEI). Así mismo, la Población en Edad de Trabajar (PET) ha sido precisada en función a las características del mercado laboral de cada país. Ante ello, el Perú ratificó en el 2002 la edad de 14 años y Ecuador ratificó en el 2000 la edad de 15 años, como edades mínimas a la PET.

Es importante mencionar que Ecuador define a la PEA como las personas de 15 años o más que trabajan 1 hora o más a la semana, que tuvieron empleo y que en este momento no lo tienen o lo están buscando; mientras que Perú agrupa en la PEA a las personas de 14 años y más de edad.

3.3.5.1 Población Económicamente Activa (PEA)

De los censos mencionados se obtuvo en el área de estudio una población total de 102647 habitantes, del cual el 62.23% (63,882 habitantes) es la PEA entre 15 y 64 años.

Si observamos la distribución por país, esta es 33282 habitantes para el lado ecuatoriano y 30600 habitantes para el lado peruano, que equivale al 61.86% y 62.65%, respectivamente, tal como se puede observar en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6: Población Económicamente Activa (PEA)

	Cantón	Parroquia	Censo 2010	PEA Total	PEA %
Ecuador	Huaquillas	Huaquillas	48285	29999	62.13
	Arenillas	Chacras	1538	908	59.04
		Carcabón	736	457	62.09
		Palmales	3244	1918	59.12
	Subtotal		**53803**	**33282**	**61.86**
	Provincia	**Distrito**	**Censo 2017**	**PEA Total**	**PEA %**
Perú	Zarumilla	Zarumilla	21776	13689	62.86
		Aguas Verdes	17366	10917	62.86
		Matapalo	3428	2070	60.39
		Papayal	6274	3924	62.54
	Subtotal		**48844**	**30600**	**62.65**
Total			**102647**	**63882**	**62.23**

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú); Censo de Población y Vivienda 2010 (Ecuador).

3.3.5.2 Población en Edad de Trabajar Según Área Rural y Urbana

El área de estudio en territorio ecuatoriano tiene como población en edad de trabajar a 33282 habitantes, de las cuales 3671 habitantes residen en el área rural y 29611 habitantes residen en área urbana. En el territorio peruano de los 30600 habitantes; 1739 habitantes residen en el área rural y 28663 habitantes residen en el área urbana.

La PEA urbana y rural por distrito y parroquia en el área de estudio se muestra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Población en Edad de Trabajar Según Área Rural y Urbana

	Cantón	Parroquia	Censo 2010	PEA Total	PEA	
					Rural	Urbana
Ecuador	Huaquillas	Huaquillas	48285	29999	388	29611
	Arenillas	Chacras	1538	908	908	0
		Carcabón	736	457	457	0
		Palmales	3244	1918	1918	0
	Subtotal		**53803**	**33282**	**3671**	**29611**
	Provincia	**Distrito**	**Censo 2017**	**PEA Total**	**PEA**	
					Rural	**Urbana**
Perú	Zarumilla	Zarumilla	21776	13689	294	13395
		Aguas Verdes	17366	10917	178	10739
		Matapalo	3428	2070	330	1740
		Papayal	6274	3924	1135	2789
	Subtotal		**48844**	**30600**	**1937**	**28663**
Total			**102647**	**63882**	**5608**	**58274**

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú); Censo de Población y Vivienda 2010 (Ecuador).

3.3.5.3 Población Económicamente Activa por Actividad Económica

En cuanto se refiere a la PEA por rama o actividad económica, en Ecuador, se debe señalar que los índices económicos del Censo 2010 del INEC consultados son de carácter cantonal, no existiendo información desagregada por parroquias.

El Censo 2010 establece que los porcentajes de ocupación de la población perteneciente al área de estudio en el territorio ecuatoriano se dedica en mayor grado a las ramas del comercio al por mayor y menor, seguido de la actividad agrícola, ganadería, silvicultura y pesca, y en último la de transporte y almacenamiento (véase Tabla 3-8).

La PEA en la ciudad de Huaquillas está ocupada principalmente en la actividad comercial con el 34.5%, en tanto que la población de Arenillas en la actividad de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca con el 42.0%.

Tabla 3-8:Porcentaje de Ocupación por Actividad a Nivel de Cantón en Ecuador

Actividad Económica	PEA (%)	
	Huaquillas	Arenillas
Comercio al por mayor y menor	34.5	14.3
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	11.6	42
Transporte y almacenamiento	10	4.7
Construcción	9.2	5.3
Industrias manufactureras	8.7	5.7
Actividades de alojamiento y servicio de comidas	5.2	3.2
Actividades de los hogares como empleadores	4.7	3.5
Administración pública y defensa	3.8	8.9
Otras actividades de servicios	3.6	1.5
Enseñanza	2.5	5.6
Otros	6.2	5.3
Total	**100**	**100**

Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

El Censo 2017 del INEI, en Perú, se refiere a la PEA por rama o actividad económica a nivel distrital, siendo que el 19.4 y el 24.9% de la PEA de los distritos de Zarumilla y Aguas Verdes se dedican al comercio, a la reparación de automóviles y motocicletas; mientras que la PEA de los distritos de Matapalo y Papayal, marcan altos porcentajes de ocupación dentro de la rama de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, con el 72.1% y 46.8 %, respectivamente (véase Tabla 3-9).

Tabla 3-9:Porcentaje de Ocupación por Actividad a Nivel Distrital en Perú

Actividad Económica	PEA (%) por Distrito			
	Zarumilla	Aguas Verdes	Matapalo	Papayal
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	6.8	6.7	72.1	46.8
Explotación de minas y canteras	0.1	0.1	0.2	1.1
Industrias manufactureras	3.9	3.2	1.6	0.3
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado Suministro de agua; evacuación de aguas residuales, gestión de desechos y descont.	0.2	0.2	0.2	0.1
Construcción	5.8	4.2	1.7	2.3
Comercio, reparación de vehículos autom. y motoc	19.4	24.9	4.7	8.0
Vent., mant. y reparación de veh. autom. y motoc	1.1	0.5	0.6	0.7
Comercio al por mayor	1.5	3.9	0.1	0.9
Comercio al por menor	16.8	20.5	4.0	6.4
Transporte y almacenamiento	13.9	16.3	1.0	5.2
Actividades de alojamiento y de servicio de comidas	5.3	6.6	1.6	3.1
Información y comunicaciones	0.3	0.2	0.1	0.3
Actividades financieras y de seguros	0.4	0.4	0.1	0.1
Actividades inmobiliarias	0.0	0.0	0.0	0.0
Actividades profesionales, científicas y técnicas	2.4	0.9	0.8	0.9
Actividades de servicios administrativos y de apoyo	2.3	1.6	0.3	1.0
Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria	4.6	2.7	3.1	8.2
Enseñanza	5.0	0.7	2.1	6.6
Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social	1.6	0.5	0.5	1.8
Actividades artísticas, de entretenimiento y recreativa	0.6	0.3	0.5	0.3
Otras actividades de servicios	2.4	1.4	0.4	0.9
Act. de los hogares como empleadores; act. no diferenciadas de los hogares como productores de bienes y servicios para uso propio	1.0	1.0	0.2	0.9
Desocupado	4.3	3.3	4.4	4.3
Total	**100**	**100.0**	**100**	**100**

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú)

3.4 PRINCIPALES ACTIVIDADES ECONÓMICAS

La ciudad de Huaquillas, que concentra la mayor parte de habitantes en el área de estudio tiene a la actividad comercial como la principal con el 34.5%, en tanto que la población de Arenillas destaca en la actividad de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca con el 42.0% (véase Tabla 3-8).

En Perú, los distritos de Zarumilla y Aguas Verdes se dedican al comercio, a la reparación de automóviles y motocicletas; mientras que la PEA de los distritos de Matapalo y Papayal, marcan altos porcentajes de ocupación dentro de la rama de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, con el 72.1% y 46.8 %, respectivamente (véase Tabla 3-9).

A continuación, se describen las principales actividades económicas identificadas en el área de estudio.

3.4.1 Sector Primario

3.4.1.1 Subsector Agropecuario

Es la principal actividad económica en los distritos (Matapalo y Papayal) y parroquias rurales (Chacras, Carcabón y Palmales) de Perú y Ecuador, respectivamente; y ocupan un gran porcentaje de la PEA de estas localidades.

Actividad Agrícola

La actividad agrícola se practica bajo las modalidades de secano combinada con el cultivo bajo riego. En ciertas zonas del área de estudio el clima permite a quienes tienen la posibilidad de disponer de riego, producir una variada gama de productos que contribuyen a la seguridad alimentaria de las familias y a la obtención de ingresos. Dichos productos que en conjunto ocupan el 50% de la superficie agrícola, se tiene al plátano (guineo y dominico), arroz y maíz amarillo duro (cultivos transitorios), y el cacao, mango y limón ácido (principales cultivos permanentes).

Es importante mencionar que en la parte baja y media del área de estudio, el acceso al agua subterránea es crítico para mantener cultivos todo el año, especialmente en la época seca, de diciembre a mayo.

Actividad Pecuaria

La actividad pecuaria en el área de estudio consiste en el manejo de aves y ganado menor, principalmente con fines de autoconsumo, seguido de la ganadería mayor con propósitos comerciales.

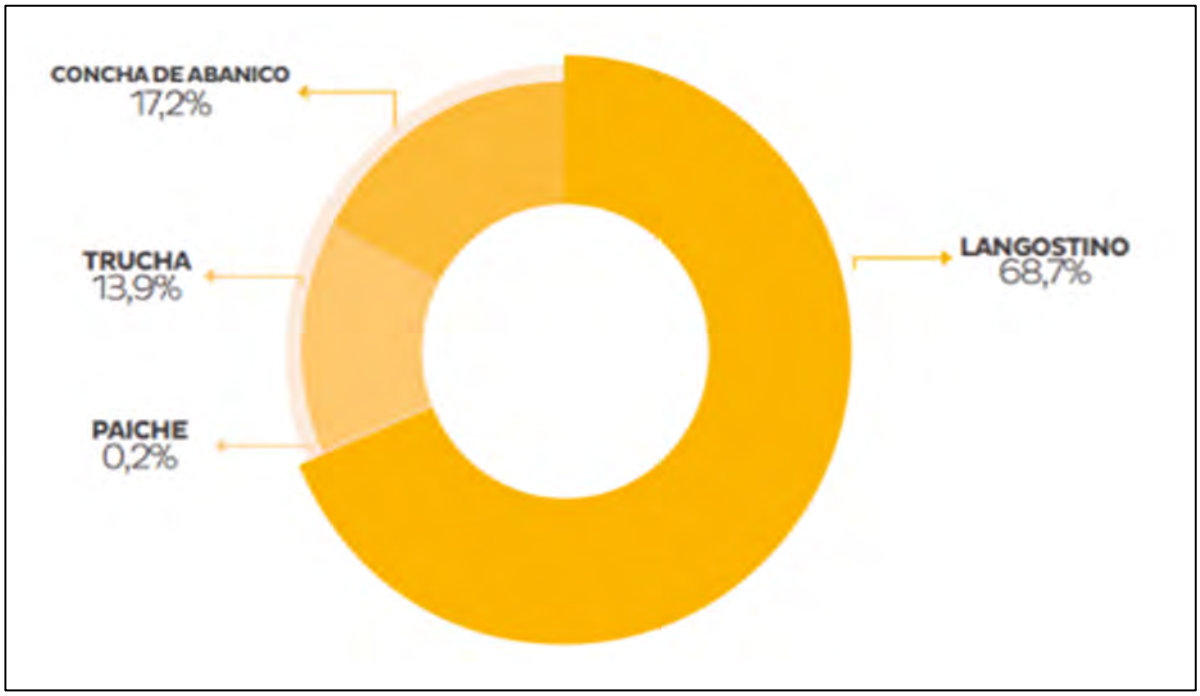
Entre la ganadería mayor tenemos al ganado vacuno (bovino), mayormente de ganado criollo, es la principal especie que se maneja con doble propósito; es decir, para carne y leche. Otra especie de crianza importante, en el lado ecuatoriano, desarrollado principalmente por mujeres, son los cerdos.

3.4.1.2 Acuicultura

En el área de estudio se practica la acuicultura, que fomenta la producción del camarón (Arenillas) y langostino (Zarumilla), así como la extractiva que es la pesca de peces, crustáceos y moluscos.

En la región Tumbes la cosecha de langostinos va en crecimiento ininterrumpidamente desde el 2005, llegando a tener un incremento respecto al 2016 del 58.1%, es decir 24464.73 TM (GIRHT, 2014). En el Gráfico 3-1 se observa la producción de recursos hidrobiológicos procedentes de la actividad de acuicultura según las principales especies.

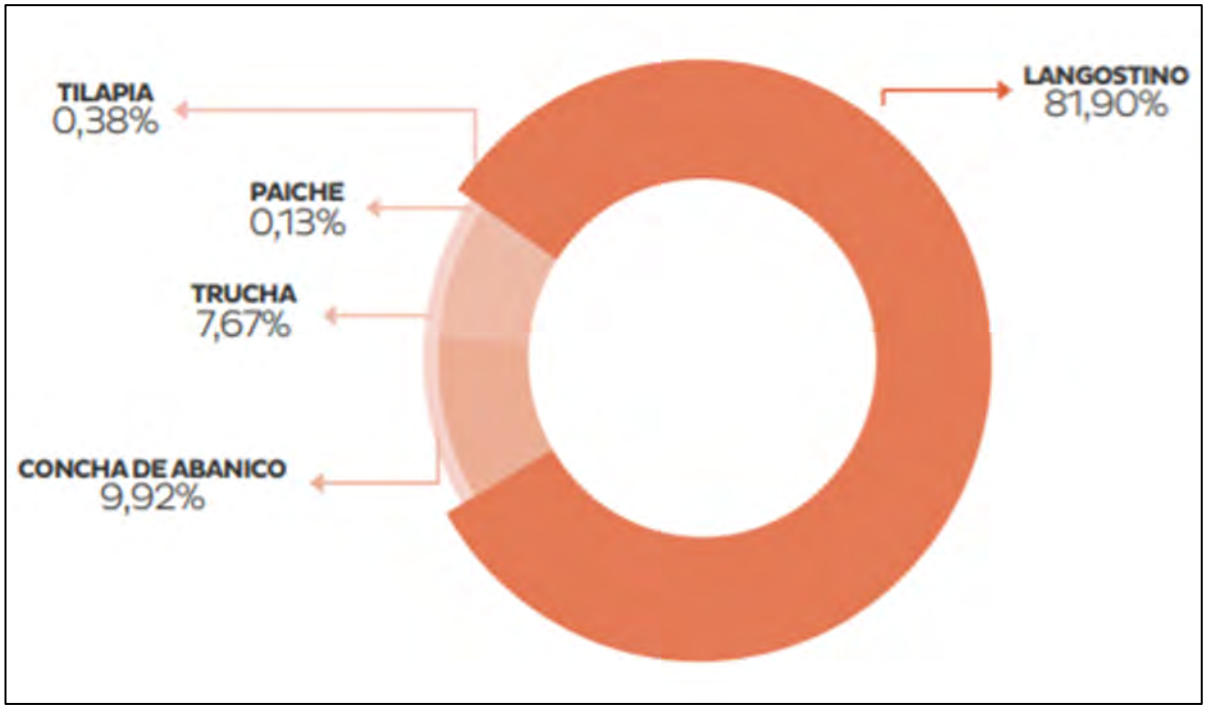
Gráfico 3-1: Producción de Principales Especies de la Acuicultura



Fuente: Anuario Estadístico Pesquero y Acuícola 2017

Estados Unidos es el principal consumidor de los langostinos (1226.20 TMB), seguido de España (6731.37 TMB) y Francia (3890.94 TMB). En el Gráfico 3-2 se observa el recurso hidrobiológico con mayor exportación a nivel nacional.

Gráfico 3-2: Exportación de Recursos Hidrobiológicos según Especie



Fuente: Superintendencia Nacional de Administración Tributaria (SUNAT) – Oficina de Estadística.

3.4.1.3 Minería

En el área de estudio la minería no es un sector representativo desde el punto de vista de la generación de empleo, aunque en el área ecuatoriana se observa de una práctica artesanal desarrollada por pocos pobladores.

En el departamento de Tumbes, costas de Zorritos, existen recursos hidrocarburíferos como gas y petróleo, los cuales no se encuentran dentro del área de estudio.

3.4.2 Sector Secundario

3.4.2.1 Industria

El sesgo primario exportador de la zona costera en general no ha permitido el desarrollo de eslabones para procesar la materia prima en productos terminados de alto valor agregado; de modo que el sector industrial de la cuenca está compuesto por: (i) microempresas familiares que con tecnologías básicas procesan artesanalmente productos como panela, aguardiente, manjares de leche, chocolate; e (ii) industrias básicas orientadas al beneficiado de productos como: piladoras de arroz, empacadoras de banano, congelado de productos de mar, etc. (GIRHT, 2014).

3.4.3 Sector terciario

El conjunto de actividades que configuran este sector son el principal destino de la mano de obra o del capital para generar un negocio; es decir, al comercio fronterizo (GIRHT, 2014).

3.4.3.1 Comercio

En el área de estudio las actividades comerciales son el núcleo de este sector, por ser una zona de tránsito permanente de personas, los comercios tienden a diversificar su stock con productos que satisfacen gustos y preferencias de ambos lados; la percepción de rentabilidad y las bajas barreras de entrada a negocios comerciales inciden en que este subsector tienda a incrementar su peso en la estructura económica de la cuenca; a la sombra del comercio formal se desarrolla sin embargo actividades comerciales ilícitas basadas en productos subsidiados en Ecuador y que al venderse en el lado peruano generan grandes ganancias; no se sabe a ciencia cierta el número de personas dedicadas ni los resultados económicos que genera (GIRHT, 2014).

Huaquillas le vende al Perú mercaderías diversas como derivados del petróleo (gasolina y diesel principalmente), productos farmacéuticos, electrodomésticos, colchones, filetes de pescado, cobijas, ropa y calzado artesanal e industrial, objetos y adornos de madera, café y neumáticos entre otros. Provenientes del Perú ingresan al Ecuador vía Huaquillas, productos perecibles como limón, uvas, frijol, maíz, papas, plátano, cebollas, ajos y sandías.

3.4.3.2 Turismo

Los recursos turísticos principalmente constituidos por las playas, las cuales en tiempo de temporada alta (verano) congregan turistas de diferentes partes del Perú. Dichas playas se caracterizan por tener una temperatura media anual de 25°C, clima veraniego

aproximadamente los 288 días al año y arena blanca. Entre las playas se destacan el Jelí, El Bendito y Punta Capones (véase Tabla 3-10).

Tabla 3-10:Localización de las Principales Playas - Zarumilla

N°	Playa	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)	
		Este (m)	Norte (m)
1	Jeli	570275.08	9615107.70
2	El Bendito	574614.49	9619869.62
3	Punta Capones	575811.58	9625969.45

Fuente: Estudio de Diagnóstico y Zonificación para el Tratamiento de la Demarcación Territorial en la Provincia de Zarumilla (Gobierno Regional de Tumbes, Octubre, 2006)

La más concurrida es la playa Bendito por su cercanía a la Isla del Amor, la Isla Los Pájaros, Hueso de la Ballena e Isla Correa; lugares rodeados de exuberante manglar que se accede con embarcaciones a motor fuera de borda. Punta Capones es una playa estrecha cercana a los manglares y al canal internacional, pertenece a la zona reservada del Santuario Nacional "Los Manglares de Tumbes" la cual requiere de un permiso especial para su ingreso. También, se puede practicar deportes náuticos como el esquí acuático, natación, buceo, pesca y caza marina.

Además de las playas, el área de estudio cuenta con reservas ecológicas, zona reservada, como Arenillas en Ecuador, y el Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes y la zona Reservada de Tumbes (ex Bosque Nacional de Tumbes) en el Perú, lugares que evidencian cada año un incremento de visitantes.

Se ha identificado también la existencia de recursos arqueológicos en el área de estudio, los cuales se describen a continuación:

- Uña de Gato: Ubicado a 6 Km, al sureste de la capital provincial; se encuentra una gran pirámide, cuya forma y tamaño original han sido alterados por acción de la maquinaria pesada, asimismo sobresalen otros montículos menores, una colina de regular extinción de aproximadamente 500 m^2. Al respecto se han efectuado investigaciones por parte de C. Vílchez (1955), Puell (1996) y Jerry Moore (1996), quienes coinciden que estos restos pueden ser parte del centro administrativo ceremonial más importante del valle de Zarumilla,
- Matapalo: Ubicado a 21 km, al sureste de Zarumilla, se caracteriza por la presencia de un montículo de 80 m, de diámetro emplazado sobre una colina extensa de aproximadamente 300 m^2, observándose material cultural consistente en fragmentaria de cerámica e instrumentos de piedra. La cerámica ha sido decorada con englobe blanco sobre rojo, técnica perteneciente a los estilos "pechiche" y "garbanzal", la cual la sitúa cronológicamente entre el horizonte temprano y el horizonte medio,
- La Palma: A raíz del fenómeno de "El Niño", se ha recuperado una colección arqueológica compuesta por 300 objetos entre cerámica (huacos) y metales, la misma que se encuentra en la Biblioteca Municipal, y.
- Cuchareta: Ubicados a 4.5 Km, al sureste de la Capital provincial, en el distrito de Aguas Verdes, en una zona de colinas, específicamente en el estrato superior de

éstas, con orientación hacia la margen izquierda del río Zarumilla, se estima que estos restos arqueológicos están en un área aproximada de 400 m^2, existiendo fragmentaria de cerámica asociada en algunos sectores a grandes concentraciones de restos malacológicos (conchas).

3.4.3.3 Servicios de Transporte

Constituye una actividad importante dentro del sector terciario y básicamente opera en las zonas transfronterizas y se basa en el flujo de personas y bienes que deben circular tanto dentro de la frontera como a través de ella.

3.5 USOS DE AGUA

De acuerdo con lo descrito en el documento “Informe Final de Análisis Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto” (GIRHT, 2014) desarrollado en el marco del Proyecto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos Transfronterizos, los recursos hídricos en el área de estudio son escasos, debidos a la duración corta de la estación lluviosa (5 meses) y un período largo de estación muy seca.

El río Zarumilla presenta cero descarga durante la estación seca y resulta insuficiente usar este recurso de la superficie para satisfacer la demanda, por lo que la única fuente para mantener los diferentes usos es el agua subterránea.

De la revisión de información secundaria existente, se ha identificado que, en el área de estudio, los principales usos de agua son:

- Uso para abastecimiento poblacional,
- Uso agrario, y
- Uso industrial.

3.5.1 Uso Poblacional

En el sector ecuatoriano, el agua para beber, cocinar, aseo personal, lavar, entre otros usos domésticos, se abastece de la red pública, camión cisterna, pozos de agua, manantiales, cursos de agua superficial entre otros, de acuerdo con el detalle provisto en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11 : Procedencia del Agua para Uso Poblacional – Ecuador

Parroquias	Total Viviendas	Viviendas Atendidas según Procedencia del Agua					
		Red pública	Camión-cisterna u otro similar	Pozo	Manantial o puquio	Río, vertiente, acequia o canal	Otro (Agua lluvia /albarrada)
Huaquillas**	12758	10763	207	1535	--	47	206
Chacras*	445	89	30	314	--	2	10
Carcabón*	215	34	--	161	--	17	3
Palmales*	860	512	4	216	--	122	6

Fuente: (*) Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Carcabón 2015-2030 (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Carcabón, Cantón Arenillas, Provincia del oro, 2015); (**) Corredor de Protección del Canal Internacional de Zarumilla en el Sector Huaquillas - Aguas verdes, Fronteras para el Buen Vivir, 2015 (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015)

De acuerdo con el documento “Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Arenillas” (Integrar Coninco Cía. Ltda., Enero, 2015), el cantón Arenillas cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable:

- Una planta antigua que aprovisiona de agua a la cabecera cantonal en mayor porcentaje, y
- Una planta Nueva, a cargo de la Empresa Municipal Regional de Agua Potable Arenillas-Huaquillas (EMRAPAH), la cual es trasvase de agua desde la cuenca vecina (Proyecto multipropósito Tahuín). Al ser concesionada con el cantón Huaquillas únicamente abastece el 30% al cantón Arenillas.

La Tabla 3-12 presenta la oferta de agua para uso poblacional de la ciudad de Huaquillas para el año 2016, clasificada según su origen de explotación. Como se observa, la ciudad de Huaquillas recibe una oferta de agua anual que se importa desde la cuenca vecina (proyecto multipropósito Tahuín), de aproximadamente 3.15 hm^3/año, y de la explotación de 1.20 hm^3/año de agua subterránea del acuífero Zarumilla, dando un total de 4.35 hm^3/año entregados para consumo humano.

Tabla 3-12: Cobertura de Agua para Uso Poblacional de la Parroquia Huaquillas (2016)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total (hm^3/año)
Superficial (importado)	0.27	0.24	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	3.15
Subterráneo cuenca	0.1	0.09	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.2
Total	**0.37**	**0.33**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**4.35**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

Las parroquias rurales no cuentan con el servicio de agua potable, solo disponen de un sistema de agua entubada cuya fuente de captación es un pozo profundo. Todas las parroquias rurales disponen de Juntas Administradoras de Agua Potable (JAAPs), siendo esta la organización encargada de controlar y regular la dotación de agua. Así también, un gran número de familias de diferentes sitios toman el agua de otras fuentes como son del río y las quebradas.

En el sector peruano del área de estudio, la procedencia del agua para beber, cocinar, aseo personal, lavar, aseo de la vivienda entre otros, se presenta en la Tabla 3-13.

Tabla 3-13: Procedencia del Agua para Uso Poblacional – Perú

Distrito	Total Viviendas	Viviendas Atendidas Tipo de Procedencia Agua							
		Red Pública dentro de la Vivienda	Red Pública fuera de la Vivienda, pero dentro de la Edificación	Pilón o Pileta de Uso Público	Camión-Cisterna u Otro Similar	Pozo	Manantial o Puquio	Río, Acequia, Lago, Laguna	Otro (Agua Luvia /Albarrada)
Zarumilla	6065	4186	922	319	226	64	--	14	334
Aguas Verdes	4947	2303	650	224	1599	35	--	29	107
Matapalo	905	339	367	36	--	43	--	60	60
Papayal	1771	1115	373	13	83	65	--	17	105

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú) (INEI, 2018)

A partir de noviembre del 2018 de manera excepcional y provisional, la OTASS a través de la Unidad Ejecutora 002 “Servicios de Saneamiento Tumbes” (Agua Tumbes), es la entidad encargada de abastecer de agua a la provincia de Zarumilla (distritos de Zarumilla, Aguas Verdes y Papayal), a partir de pozos de agua subterránea; mientras que la fuente de captación de agua para la población de Matapalo recibe las recargas del río Zarumilla por medio de una galería.

La demanda de agua de las poblaciones rurales que se encuentran dentro del área de estudio que no son abastecidos por Agua Tumbes (su red de distribución no llega a estos lugares), es cubierta por agua subterránea que explotan con electrobombas y que son operadas por las Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento (JASS). La Tabla 3-14 presenta la cantidad de habitantes de las poblaciones peruanas que son atendidas por las JASS.

Tabla 3-14: Uso poblacional Atendido por JASS en el Sector Peruano

JASS	Habitantes
Leandro Campos	300
Cuchareta Alta y Nueva Esperanza	600
Cuchareta Baja	1050
Lechugal	500
Isla Noblecilla	100
La Palma	1250
Loma Saavedra	500
Totora	200
Pocitos	400
Pueblo Nuevo y Quiñonez	650
Tutumo - Nuevo Progreso	3250

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

3.5.2 Uso Agropecuario

De acuerdo con lo descrito en el documento “Informe Final de Análisis Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto” (GIRHT, 2014), las actividades agrícolas en la cuenca Zarumilla tienen una orientación marcadamente comercial y por tanto requieren una producción continua, el agua subterránea es clave para este propósito; esta alternativa sin embargo no está al alcance de todos, la barrera para que pequeños productores opten por esta opción constituye el tamaño de sus parcelas con una producción que no genera suficiente rentabilidad para cubrir los costos de exploración, perforación e instalación del pozo.

Los principales cultivos identificados en la cuenca (área de estudio) son:

- Cultivo de banano: constituye el cultivo principal dentro de la zona peruana y el segundo cultivo más importante en la zona ecuatoriana,
- Cultivo de limón: Cultivo permanente y de gran fuerza productiva en la zona peruana, en la zona ecuatoriana la superficie cultivada es significativamente menor,
- Cultivo de cacao: Cultivo permanente y con altas expectativas de demanda en el mercado externo,
- Cultivo de café: identificado principalmente en la zona ecuatoriana de la Cuenca, ocupa una importante superficie, la misma que ha ido incrementando en el transcurso de los años debido a la creciente demanda en el mercado nacional e internacional. Este cultivo es temporal o de secano en un alto porcentaje (98 %), por tanto, no está bajo riego; en condiciones de riego se encuentra solamente el 2%,
- Cultivo de mango: Ocupa superficie de la parte ecuatoriana de la Cuenca, y
- Cultivo de maíz: de importancia en la zona ecuatoriana. Su cultivo, principalmente se realiza en la temporada lluviosa; siendo factible propiciar una segunda cosecha al año con riego.

3.5.3 Uso Industrial

En el sector ecuatoriano, de acuerdo con los datos oficiales del Banco Nacional de Asignaciones BNA-SENAGUA, se tienen cuatro (04) puntos donde el agua es aprovechada para fines industriales, tal como se muestra en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15: Autorizaciones de Uso de Agua para Aprovechamiento Industrial en la Cuenca Zarumilla - Ecuador

Nombre del Aprovechamiento	Cantón	Parroquia	Caudal (m^3)	Área Regada (ha)	Subuso
Estero Aguas Verdes, Quebrada Aguas Verdes	Huaquillas	Hualtaco	15.19	21	Acuacultura
Pozo somero	Arenillas	Palmales	2	0	Uso en general para industria
Quebrada Palmales	Arenillas	Palmales	2	0	Uso en general para industria
Pozo somero	Huaquillas	Unión Lojana	5	0	Refrigeración

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

En el cantón Huaquillas el uso del agua en acuacultura, está dirigido a la crianza de camarón, peces y otras especies acuáticas; en este cantón existen aproximadamente 100 ha destinadas a la acuacultura, la misma que se alimenta de agua de mar a través de los esteros, lo cual contribuye al desarrollo económico de la zona, teniendo en cuenta que el camarón es un producto de exportación. En este territorio de igual manera se presenta otro tipo de aprovechamiento industrial, destinado a la industria de la refrigeración, ya que el agua es usada como regulador térmico en calderas y torres de refrigeración. En el cantón Arenillas, la explotación del recurso hídrico con fines industriales, está orientada al sector avícola y porcino, principalmente.

Con respecto al sector peruano, las demandas de agua para uso industrial se refieren a uso industrial propiamente dicho y uso piscícola. Para el uso industrial se tiene una demanda neta anual de 0.12 hm^3 para los años 2015 y 2016 (véase la Tabla 3-16), con una demanda mensual constante los 12 meses del año; en cuanto, a la demanda para uso piscícola, se estima una demanda neta anual de 0.30 hm^3, con una demanda mensual que oscila entre los 0.01 a 0.03 hm^3.

Tabla 3-16: Demanda Hídrica Industrial y Piscícola en el Valle Zarumilla - Perú

Uso	Año 2015 (hm^3)					Año 2016 (hm^3)							Total (hm^3/año)
	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
Industrial	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.12
Piscícola	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.3

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

4 HIDROLOGÍA - BALANCE HÍDRICO

4.1 ASPECTOS GENERALES

4.1.1 Objetivo

4.1.1.1 General

El objetivo del presente estudio hidrológico es determinar mediante métodos directos e indirectos las características hidrológicas de las microcuencas de la cuenca transfronteriza Zarumilla, y así proporcionar soporte para cumplir los requerimientos del estudio hidrogeológico.

4.1.1.2 Específicos

Los objetivos específicos son:

- Determinación de los parámetros morfológicos.
- Caracterizar el clima, a través de complementar y actualizar la data climática existente.
- Determinar el balance hídrico de cada una de la subcuencas de estudio.
- Calcular las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno.
- Determinar los caudales máximos y mínimos.
- Calcular los caudales de diseño para diferentes periodos de retorno

4.1.2 Metodología de Trabajo

La caracterización hidrológica se realizó en base a la información existente y trabajo de gabinete de procesamiento y análisis de información, de acuerdo con lo siguiente:

- Para la determinación de los parámetros morfológicos de la cuenca se usó el Modelo de Elevación Digital de 30 m de toda la superficie terrestre, ASTER GDEM, el cual es un proyecto desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA),
- Para la caracterización meteorológica se ha recurrido a la base de datos climáticos que la NASA (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/) mantiene a nivel global desde el 01 de enero de 1984, para obtener un registro diario y continuo de datos, obteniéndose los promedios medios mensuales para los parámetros meteorológicos descritos en el ítem 4.6.1, a excepción de precipitación. La Tabla 4-1 muestra los metadatos de la información obtenida de la NASA. Al realizar las comparaciones de la data puntual climática con la información de la estación climática se observó que ésta es coherente.
- Para la realización del balance hídrico y determinación de los parámetros como caudal, evapotranspiración, recarga al acuífero y por las características del área de estudio y los datos disponibles, se ha considerado conveniente utilizar el programa SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). El SWAT es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas.

Tabla 4-1: Metadatos de la Información Climatológica Obtenida de la NASA

Fuente: NASA
NASA/POWER SRB/FLASHFlux/MERRA2/GEOS 5.12.4 (FP-IT) 0.5 x 0.5 Degree Daily Averaged Data
Dates (month/day/year): 1/1/1984 through 3/5/2018
Location: Latitude -14.7414 Longitude -73.1797
Elevation from MERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 4223.19 meters Site = na
Climate zone: na (reference Briggs et al, http://www.energycodes.gov)
Value for missing model data, cannot be computed or out of model availability range: -999
Parameter(s):
RH2M MERRA2 1/2x1/2 Relative Humidity at 2 Meters (%)
T2M_MAX MERRA2 1/2x1/2 Maximum Temperature at 2 Meters (C)
T2M_MIN MERRA2 1/2x1/2 Minimum Temperature at 2 Meters (C)
T2M MERRA2 1/2x1/2 Temperature at 2 Meters (C)
WS10M_MIN MERRA2 1/2x1/2 Minimum Wind Speed at 10 Meters (m/s)
WS10M_MAX MERRA2 1/2x1/2 Maximum Wind Speed at 10 Meters (m/s)
WS10M MERRA2 1/2x1/2 Wind Speed at 10 Meters (m/s)
ALLSKY_SFC_SW_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface (kW-hr/m^2/day)

4.2 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA EXISTENTE

Se recopiló información existente de todas las fuentes de información disponibles que fueron identificadas en la Fase I del presente estudio y posterior, las cuales se listan a continuación:

- Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)
- Informe Final de Diagnóstico Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto (GIRHT, 2014),
- Geodatabase - Informe Final de Diagnóstico Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto (GIRHT, 2014),
- Informe del Mapa de delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador - Escala 1:250 000 - Nivel 5, Metodología Pfafstetter. Quito (SENAGUA, - UICN Sur, 2009),
- Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú) - Resultados Definitivos (INEI, 2018), y

- Modelamiento Hidrológico del Rio Zarumilla (SENAMHI, 2016)

Asimismo, se usó información de entes oficiales como:

- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas del Perú (SERNANP),
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Perú,
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador,
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) de Perú, y
- Servicio Nacional del Agua (SENAGUA) del Ecuador -

4.3 DIAGNÓSTICO DE LA CUENCA

4.3.1 Delimitación y Codificación Hidrográfica de la Cuenca

La cuenca hidrográfica Zarumilla pertenece a la región hidrográfica 1 de Sudamérica.

A nivel del Perú, de acuerdo con la delimitación y codificación de cuencas hidrográficas, ejecutada por la ANA aplicando el sistema internacional Pfasfstetter y tecnología SIG, la cuenca del río Zarumilla es una cuenca de nivel 5, asignada con el código 13952.

A nivel de Ecuador, se cuenta con un mapa de delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Ecuador" (SENAGUA, - UICN Sur, 2009) de acuerdo con el sistema internacional Pfasfstetter, en el cual la cuenca Zarumilla es una unidad hidrográfica de nivel 5 dentro de la unidad hidrográfica 139, asignada con el código 13954 y con un área estimada de 476.55 km^2.

4.3.2 Infraestructura Hidráulica

En la cuenca del río Zarumilla no existen embalses, ni obras de regulación de caudales importantes, existiendo tan solo la Bocatoma La Palma que abastece al Canal Internacional (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018).

La obra de toma se ubica sobre el río Zarumilla en la cota 17.50 msnm, a 1600 m del poblado de Chacras, cantón Arenillas, Provincia El Oro y a 18 km aguas arriba del Puente Internacional, antiguo límite de los poblados fronterizos de Aguas Verdes en el Perú y Huaquillas en el Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018). Por el lado peruano, se ubica a 700 m del poblado La Palma, en el distrito de Papayal, provincia Zarumilla y departamento de Tumbes.

El objetivo principal de la infraestructura es el de captar el caudal del río Zarumilla para desviarlo hacia el Canal Zarumilla, posibilitando el riego de alrededor de 1400 Ha de terrenos agrícolas en el Perú y Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018).

El diseño de la Bocatoma permite laminar un caudal máximo de 1158 m^3/s que corresponde a un período de retorno de 100 años, y la derivación de un caudal de 4.50 m^3/s hacia el Canal Zarumilla, de los cuales 4.0 m^3/s corresponden a los requerimientos de riego y 0.50 m^3/s al caudal necesario para realizar la purga del desarenador. La información estadística indica que en el año 2008 el caudal que pasó a través de la Bocatoma La Palma osciló entre 600 y 800 m^3/s y que en el año 1998 bordeó los 900 m^3/s (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018).

4.4 ASPECTOS FÍSICOS

4.4.1 Clima

De acuerdo con lo descrito en el documento “Modelamiento Hidrológico del Río Zarumilla” (SENAMHI, 2016), el clima de la cuenca del río Zarumilla corresponde al subdesértico tropical (semiárido de estepa según Thornwaite) con precipitaciones medias anuales que van desde los 282 mm (en Zarumilla) y los 1106 mm (en Condor Flores).

La variación interanual de la precipitación es muy amplia dando lugar a periodos de sequía, pero también de inundaciones, siendo la parte baja de la cuenca la zona más afectada. Este fenómeno es originado por el movimiento variable de las corrientes de Humboldt y El Niño respecto a la costa (SENAMHI, 2016).

El periodo de lluvias se inicia en el mes de diciembre y termina en mayo, entre junio y noviembre las precipitaciones son muy escasas llegando incluso a valores de 0 mm (SENAMHI, 2016).

En cuanto a la temperatura, el promedio anual registrado en la estación Los Cedros es de 24.5 °C; sin embargo, cuando las condiciones térmicas son afectadas por el fenómeno El Niño la temperatura puede llegar a sobrepasar valores máximos diarios de 36 °C (SENAMHI, 2016).

4.4.2 Parámetros Morfológicos de la Cuenca

Las propiedades morfológicas de las cuencas, como son la forma, el tamaño y la pendiente, resultan muy importantes en la respuesta del caudal recibido y que pueden operar tanto para atenuar como para intensificar las crecidas. La mayor parte de estas propiedades actúan incrementando el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento, por lo que, los estudios morfológicos son de gran importancia en el estudio de cualquier cuenca, ya que se tiene en cuenta las formas que poseen las diversas cuencas existentes y ofrecen un parámetro de comparación y/o interpretación de los fenómenos que ocurren en esta cuenca.

Para la determinación de los parámetros morfológicos se hace uso de la siguiente información:

- El Modelo de Elevación Digital de 30 m de toda la superficie terrestre, ASTER GDEM, el cual es un proyecto desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA).

Se presenta la delimitación de las subcuencas en la zona de estudio, de acuerdo con sus parámetros hidromorfológicos. Las cuencas interpretadas son siete (07) y se pueden observar en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Mapa de Ubicación de las Subcuencas del Área de Estudio

A continuación, se describen los distintos parámetros morfológicos.

4.4.2.1 Área de Drenaje

Es el área de la microcuenca, su tamaño influye en mayor o menor grado en el aporte de escorrentía, tanto directa como de flujo base o flujo sostenido.

4.4.2.2 Longitud de la Cuenca (Perímetro de la Cuenca)

Es la distancia medida de la línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la microcuenca de las microcuencas vecinas.

4.4.2.3 Longitud del Cauce Principal (L)

Es la longitud mayor de recorrido que realiza el río, desde la cabecera de la cuenca, siguiendo todos los cambios de dirección o sinuosidades, hasta un punto fijo de interés, puede ser una estación de aforo o desembocadura, expresado en unidades de longitud.

Coeficiente de Compacidad (Kc)

Parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca.

El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, se calcula de la relación entre el perímetro (P) y el área de la subcuenca (A).

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Dónde:

Kc = Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius
P = perímetro de la cuenca (km)
A = área de la cuenca (km²)

Cuando el Kc = 1: tiempo de concentración menor, cuenca circular, mayor tendencia a crecientes y Kc = 2: tiempo de concentración mayor, cuenca de forma alargada, menor tendencia a crecientes.

4.4.2.4 Factor de Forma (Ff)

El factor de forma nos da una idea de la geometría de la cuenca, se calcula de la relación entre el área (A) y la longitud del cauce principal (L)

$$Ff = \frac{A}{L^2}$$

Dónde:

Ff = Factor de forma
A = Área de la cuenca (km²)
L = Longitud de cauce principal de la cuenca (km)

Para un círculo, Ff = 0.79; para un cuadrado con la salida en el punto medio de uno de los lados, Ff = 1, y con la salida en una esquina, Ff = 0.5. (Mintegui Aguirre et al., 1993).

4.4.2.5 Rectángulo Equivalente

Los lados del rectángulo equivalente están dados por las siguientes relaciones:

$$l = \frac{Kc}{1.12}\sqrt{A}\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right] \qquad L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12}\left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right]$$

4.4.2.6 Densidad de Drenaje

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la hoya y su área total.

$$Dd = \frac{Largo\ Total\ del\ Curso\ de\ Agua\ (km)}{Superficie\ de\ la\ Cuenca\ (km^2)}$$

4.4.2.7 Pendiente Media del Río

La pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta:

$$lc = \frac{HM - Hm}{L}$$

4.4.2.8 Densidad de Drenaje

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la hoya y su área total.

$$Dd = \frac{Largo\ Total\ del\ Curso\ de\ Agua\ (km)}{Superficie\ de\ la\ Cuenca\ (km^2)}$$

4.4.2.9 Pendiente Media del Río

La pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta:

$$lc = \frac{HM - Hm}{L}$$

4.4.2.10 Orden de Corriente

Refleja el grado de ramificación del curso de agua dentro de una cuenca, en el caso de la cuenca de estudio es de grado uno.

4.4.2.11 Coeficiente de Masividad (Cm)

Este índice expresa la relación entre la altitud media de la cuenca (H) y el área total de la misma (A), y está expresada en m/km^2, y se obtiene por la siguiente expresión:

$$Cm = \frac{H}{A}$$

A continuación, la Tabla 4-2 presenta los principales parámetros morfológicos obtenidos para las subcuencas delimitadas en el área de estudio.

Tabla 4-2: Parámetros Morfológicos de las Microcuencas en el Área de Estudio

Parámetro	Subcuenca							
	1	2	3	4	5	6	7	Unidad
Área de la cuenca (A)	169.00	239.71	138.49	13.18	225.71	257.02	108.03	Km^2
Perímetro de la cuenca (P)	107.72	153.24	99.32	18.08	145.89	109.96	74.93	Km
Cota Mayor (CM)	576.00	405.00	854.00	115.00	1248.00	706.00	129.00	msnm
Cota Menor (Cm)	0.00	0.00	40.00	30.00	44.00	29.00	0.00	msnm
Longitud del Cauce Mayor (L)	21.52	33.82	32.11	4.34	54.50	27.19	7.87	Km
Coeficiente de Compacidad (Kc)	2.34	2.79	2.38	1.40	2.74	1.93	2.03	
Factor de forma (Ff)	0.37	0.21	0.13	0.70	0.08	0.35	1.75	
Grado de ramificación		1er orden						
Densidad de drenaje (Dd)	0.13	0.14	0.23	0.33	0.24	0.11	0.07	Km/km^2
Razón de circularidad (Rc)	0.18	0.13	0.18	0.51	0.13	0.27	0.24	
Altitud media de la cuenca	39.01	67.32	346.21	64.84	466.48	158.59	19.40	msnm
Lado mayor (L)	50.51	73.35	46.70	7.21	69.71	49.82	34.32	Km
Lado menor (l)	3.35	3.27	2.97	1.83	3.24	5.16	3.15	
Pendiente media del río (Ic)	2.68	1.20	2.54	1.96	2.21	2.49	1.64	m/m
Coeficiente de masividad (Cm)	0.23	0.28	2.50	4.92	2.07	0.62	0.18	m/km^2
Pendiente del cauce principal	0.02677	0.01197	0.02535	0.01958	0.02116	0.02490	0.01640	(%)
Pendiente media de la Microcuenca	2.68	1.20	2.54	1.96	0.02209	2.49	1.64	(%)
índice de Pendiente	3.38	2.35	4.18	3.43	2.21	3.69	1.94	
Tiempo de Concentración								
Kirpich 1940	170.19	328.65	236.52	55.98	374.82	209.59	94.74	min
California Culverts Practice (1942)	170.46	329.16	236.88	56.07	375.40	209.92	94.88	min

4.4.2.12 Curvas Hipsométricas de las Subcuencas del Área de Estudio

La curva hipsométrica es una descripción de la relación entre la altitud y el acumulado de las áreas con intervalos de elevación.

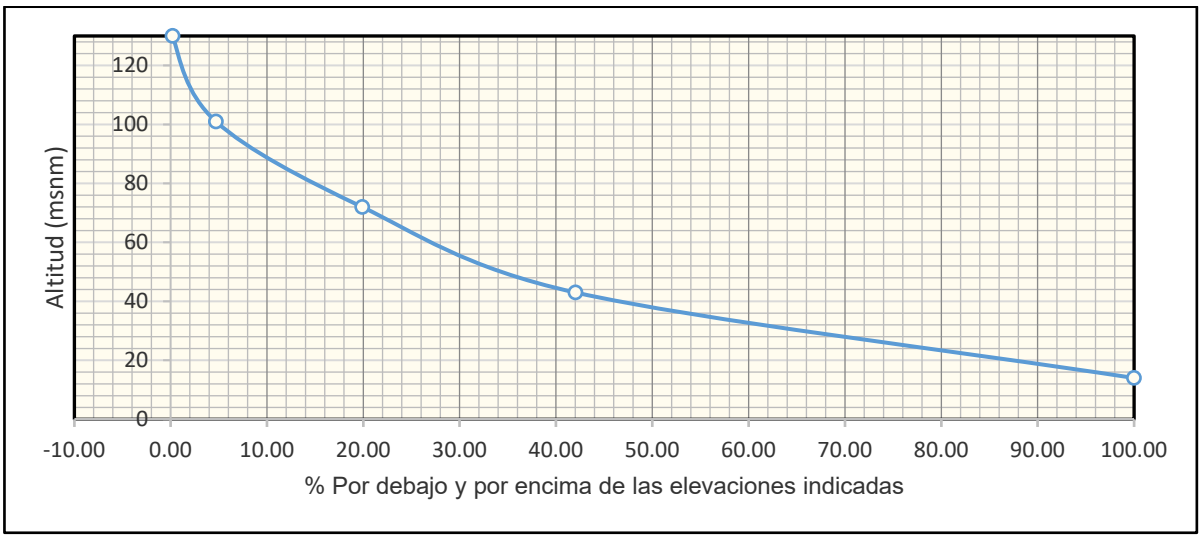
Curva Hipsométrica de la Subcuenca 1

A partir de los valores mostrados en la Tabla 4-3, el Gráfico 4-31 muestra la curva hipsométrica de la subcuenca 1.

Tabla 4-3: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 1

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km^2)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km^2)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
1	0.0	28.0	14.0	97.903	168.871	100.00
2	29.0	57.0	43.0	37.364	70.968	42.02
3	58.0	86.0	72.0	25.658	33.604	19.90
4	87.0	115.0	101.0	7.598	7.945	4.70
5	116.0	144.0	130.0	0.303	0.347	0.21
6	146.0	149.0	147.5	0.003	0.045	0.03
7	180.0	191.0	185.5	0.002	0.042	0.02
8	210.0	223.0	216.5	0.003	0.040	0.02
9	237.0	248.0	242.5	0.002	0.037	0.02
10	260.0	286.0	273.0	0.004	0.035	0.02
11	297.0	316.0	306.5	0.004	0.031	0.02
12	317.0	344.0	330.5	0.006	0.028	0.02
13	349.0	372.0	360.5	0.007	0.022	0.01
14	377.0	392.0	384.5	0.003	0.015	0.01
15	408.0	424.0	416.0	0.002	0.012	0.01
16	439.0	456.0	447.50	0.005	0.010	0.01
17	461.0	465.0	463.00	0.002	0.006	0.00
18	542.0	542.0	542.0	0.001	0.004	0.00
19	554.0	576.0	565.0	0.003	0.003	0.00
Total				**168.871**		

Gráfico 4-1: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 1



De la gráfica se tiene que la altitud media de la subcuenca 1 de estudio es 39.01 msnm, que representa el 50% del área total de la subcuenca de estudio. Según la gráfica hipsométrica encontramos que es una subcuenca en equilibrio, es decir, fase de madurez.

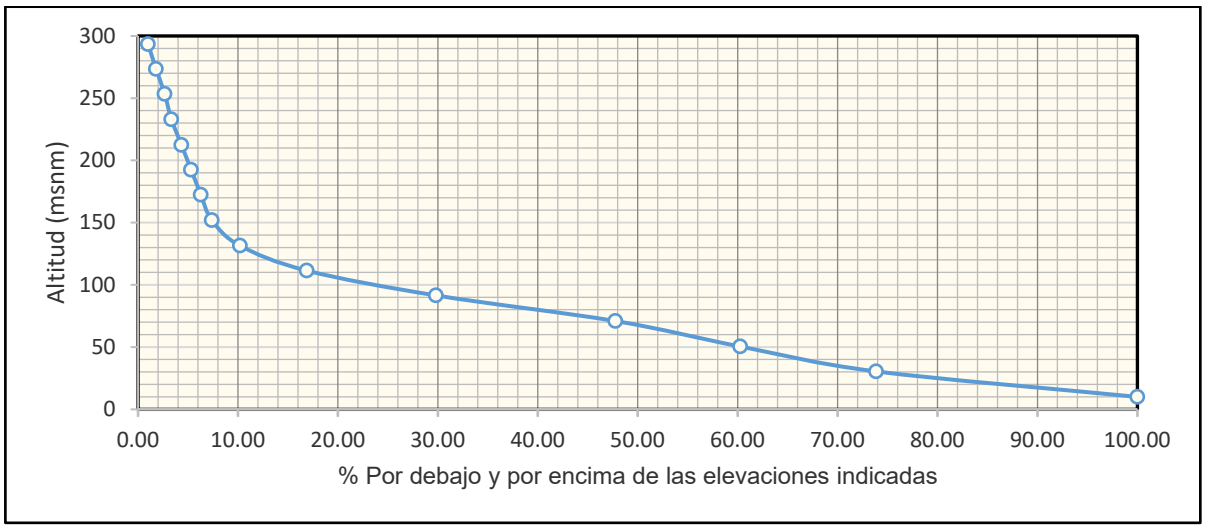
Curva Hipsométrica de la Subcuenca 2

A partir de los valores mostrados en la Tabla 4-4, se muestra la curva hipsométrica de la subcuenca 2 en el Gráfico 4-2.

Tabla 4-4: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 2

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km^2)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km^2)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
1	0.0	20.0	10.0	60.486	231.361	100.00
2	21.0	40.0	30.5	31.469	170.875	73.86
3	41.0	60.0	50.5	28.909	139.406	60.25
4	61.0	81.0	71.0	41.549	110.497	47.76
5	82.0	101.0	91.5	29.887	68.948	29.80
6	102.0	121.0	111.5	15.453	39.061	16.88
7	122.0	141.0	131.5	6.529	23.608	10.20
8	142.0	162.0	152.0	2.548	17.079	7.38
9	163.0	182.0	172.5	2.259	14.531	6.28
10	183.0	202.0	192.5	2.236	12.273	5.30
11	203.0	222.0	212.5	2.332	10.036	4.34
12	223.0	243.0	233.0	1.556	7.704	3.33
13	244.0	263.0	253.5	1.998	6.149	2.66
14	264.0	283.0	273.5	1.849	4.151	1.79
15	284.0	303.0	293.5	2.302	2.302	0.99
Total				**231.361**		

Gráfico 4-2: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 2



De la gráfica se tiene que la altitud media de la subcuenca 2 de estudio es 67.32 msnm, que representa el 50% del área total de la subcuenca de estudio. Según la gráfica hipsométrica encontramos que es una subcuenca en equilibrio, fase de madurez.

Curva Hipsométrica de la Subcuenca 3

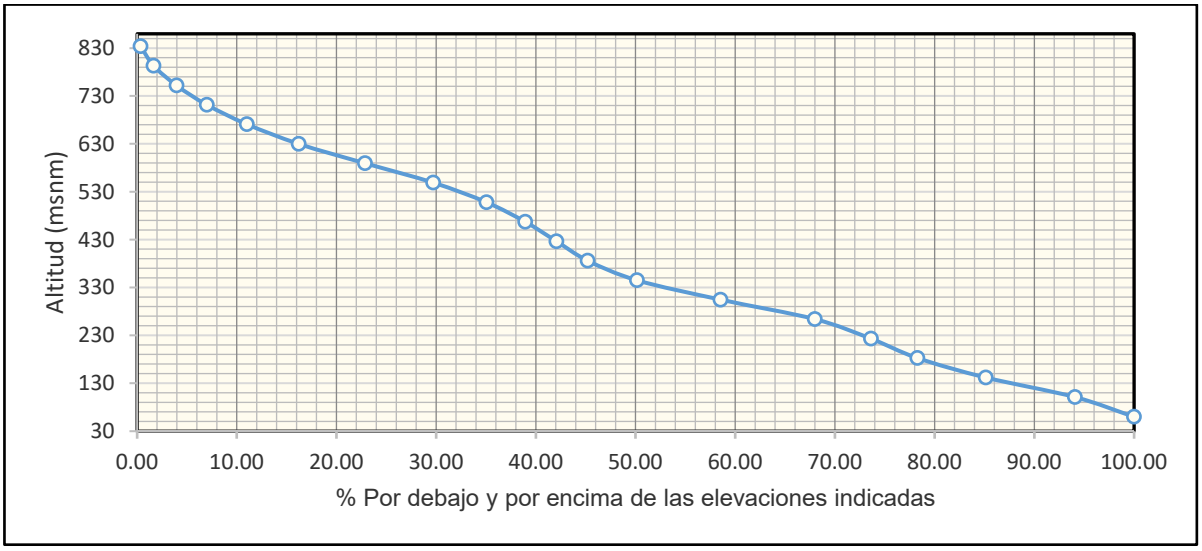
A partir de los valores mostrados en la Tabla 4-5, se muestra la curva hipsométrica de la subcuenca 3 en el Gráfico 4-3.

Tabla 4-5: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 3

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km²)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km²)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
1	40.0	80.0	60.0	8.193	138.185	100.00
2	81.0	121.0	101.0	12.351	129.992	94.07
3	122.0	162.0	142.0	9.470	117.640	85.13
4	163.0	202.0	182.5	6.430	108.171	78.28
5	203.0	243.0	223.0	7.801	101.740	73.63
6	244.0	284.0	264.0	13.056	93.939	67.98
7	285.0	324.0	304.5	11.589	80.884	58.53
8	325.0	365.0	345.0	6.822	69.295	50.15
9	366.0	406.0	386.0	4.342	62.472	45.21
10	407.0	446.0	426.5	4.312	58.130	42.07
11	447.0	487.0	467.0	5.378	53.818	38.95
12	488.0	528.0	508.0	7.382	48.440	35.05
13	529.0	569.0	549.0	9.465	41.058	29.71
14	570.0	609.0	589.5	9.182	31.593	22.86
15	610.0	650.0	630.0	7.195	22.411	16.22
16	651.0	691.0	671.00	5.541	15.217	11.01

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km²)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km²)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
17	692.0	731.0	711.50	4.190	9.676	7.00
18	732.0	772.0	752.0	3.195	5.485	3.97
19	773.0	813.0	793.0	1.792	2.290	1.66
20	814.0	854.0	834.0	0.498	0.498	0.36
Total				**138.185**		

Gráfico 4-3: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 3



De la gráfica se tiene que la altitud media de la subcuenca 3 de estudio es 346.21 msnm, que representa el 50% del área total de la subcuenca de estudio. Según la gráfica hipsométrica encontramos que es una subcuenca en equilibrio, fase de madurez.

Curva Hipsométrica de la Subcuenca 4

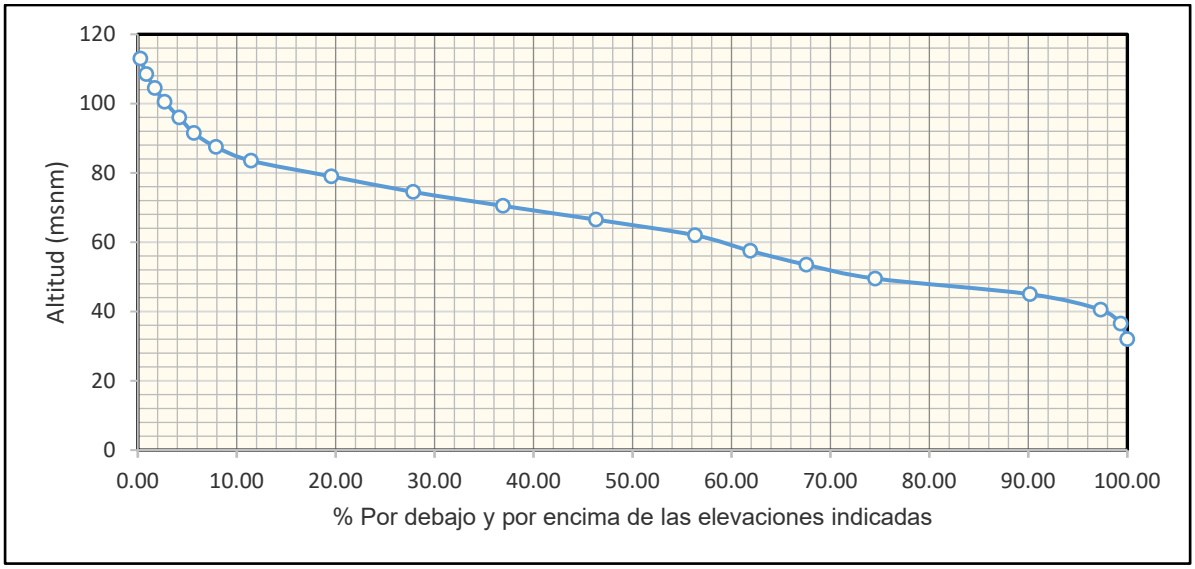
A partir de los valores mostrados en la Tabla 4-6, se muestra la curva hipsométrica de la subcuenca 4 en el Gráfico 4-4.

Tabla 4-6: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 4

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km²)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km²)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
1	30.0	34.0	32.0	0.087	13.160	100.00
2	35.0	38.0	36.5	0.265	13.073	99.34
3	39.0	42.0	40.5	0.942	12.808	97.32
4	43.0	47.0	45.0	2.059	11.866	90.17
5	48.0	51.0	49.5	0.915	9.808	74.53
6	52.0	55.0	53.5	0.745	8.893	67.57
7	56.0	59.0	57.5	0.736	8.148	61.91
8	60.0	64.0	62.0	1.318	7.412	56.32

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km^2)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km^2)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
9	65.0	68.0	66.5	1.236	6.094	46.30
10	69.0	72.0	70.5	1.194	4.858	36.91
11	73.0	76.0	74.5	1.089	3.664	27.84
12	77.0	81.0	79.0	1.069	2.575	19.57
13	82.0	85.0	83.5	0.466	1.506	11.45
14	86.0	89.0	87.5	0.294	1.040	7.90
15	90.0	93.0	91.5	0.194	0.746	5.67
16	94.0	98.0	96.00	0.196	0.552	4.20
17	99.0	102.0	100.50	0.130	0.357	2.71
18	103.0	106.0	104.5	0.112	0.227	1.72
19	107.0	110.0	108.5	0.080	0.115	0.87
20	111.0	115.0	113.0	0.035	0.035	0.27
Total				**13.160**		

Gráfico 4-4: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 4



De la gráfica se tiene que la altitud media de la subcuenca 4 de estudio es 64.84 msnm, que representa el 50% del área total de la subcuenca de estudio. Según la gráfica hipsométrica encontramos que es una subcuenca en equilibrio, fase de madurez.

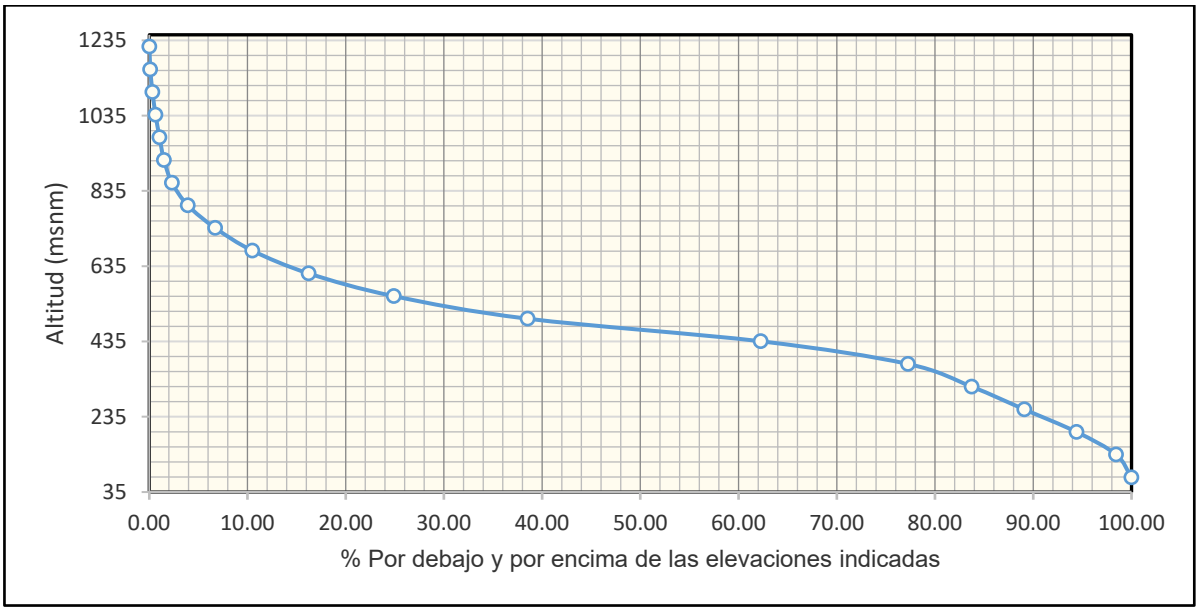
Curva Hipsométrica de la Subcuenca 5

A partir de los valores mostrados en la Tabla 4-7, se muestra la curva hipsométrica de la subcuenca 5 en el Gráfico 4-5.

Tabla 4-7: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 5

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km^2)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km^2)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
1	44.0	104.0	74.0	3.518	225.565	100.00
2	105.0	164.0	134.5	9.078	222.048	98.44
3	165.0	224.0	194.5	11.993	212.970	94.42
4	225.0	284.0	254.5	12.108	200.977	89.10
5	285.0	345.0	315.0	14.624	188.868	83.73
6	346.0	405.0	375.5	33.817	174.245	77.25
7	406.0	465.0	435.5	53.536	140.428	62.26
8	466.0	525.0	495.5	30.728	86.892	38.52
9	526.0	585.0	555.5	19.562	56.164	24.90
10	586.0	646.0	616.0	12.907	36.602	16.23
11	647.0	706.0	676.5	8.533	23.696	10.50
12	707.0	766.0	736.5	6.298	15.163	6.72
13	767.0	826.0	796.5	3.625	8.865	3.93
14	827.0	886.0	856.5	1.867	5.240	2.32
15	887.0	947.0	917.0	1.018	3.373	1.50
16	948.0	1007.0	977.50	0.915	2.355	1.04
17	1008.0	1067.0	1037.50	0.699	1.440	0.64
18	1068.0	1127.0	1097.5	0.500	0.741	0.33
19	1128.0	1187.0	1157.5	0.184	0.241	0.11
20	1189.0	1248.0	1218.5	0.057	0.057	0.03
Total				**225.565**		

Gráfico 4-5: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 5



De la gráfica se tiene que la altitud media de la subcuenca 5 de estudio es 466.48 msnm, que representa el 50% del área total de la subcuenca de estudio. Según la gráfica hipsométrica encontramos que es una subcuenca en equilibrio, fase de madurez.

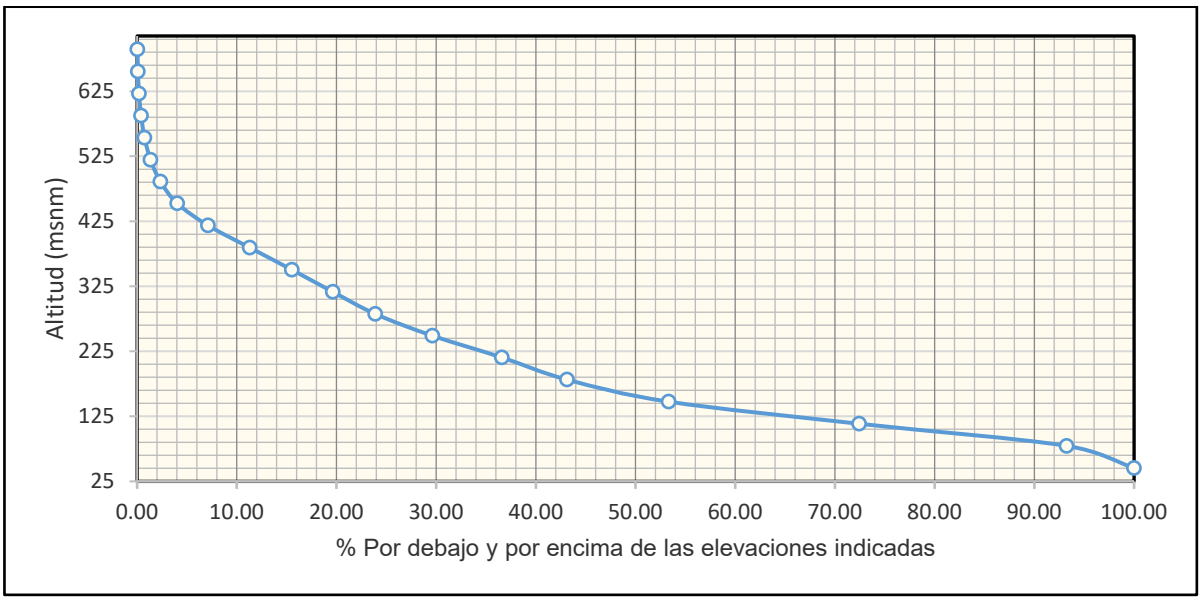
Curva Hipsométrica de la Subcuenca 6

A partir de los valores mostrados en la Tabla 4-8, se muestra la curva hipsométrica de la subcuenca 6 en el Gráfico 4-6.

Tabla 4-8: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 6

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km^2)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km^2)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
1	29.0	62.0	45.5	17.370	257.089	100.00
2	63.0	96.0	79.5	53.505	239.718	93.24
3	97.0	130.0	113.5	49.108	186.213	72.43
4	131.0	164.0	147.5	26.241	137.105	53.33
5	165.0	198.0	181.5	16.768	110.864	43.12
6	199.0	232.0	215.5	17.941	94.096	36.60
7	233.0	265.0	249.0	14.727	76.155	29.62
8	266.0	299.0	282.5	10.945	61.428	23.89
9	300.0	333.0	316.5	10.552	50.483	19.64
10	334.0	367.0	350.5	10.868	39.932	15.53
11	368.0	401.0	384.5	10.772	29.064	11.31
12	402.0	435.0	418.5	7.924	18.292	7.12
13	436.0	469.0	452.5	4.346	10.368	4.03
14	470.0	502.0	486.0	2.559	6.021	2.34
15	503.0	536.0	519.5	1.551	3.462	1.35
16	537.0	570.0	553.50	0.871	1.912	0.74
17	571.0	604.0	587.50	0.556	1.040	0.40
18	605.0	638.0	621.5	0.262	0.484	0.19
19	639.0	672.0	655.5	0.117	0.222	0.09
20	673.0	706.0	689.5	0.105	0.105	0.04
Total				**257.089**		

Gráfico 4-6: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 6



De la gráfica se tiene que la altitud media de la subcuenca 6 de estudio es 158.59 msnm, que representa el 50% del área total de la subcuenca de estudio. Según la gráfica hipsométrica encontramos que es una subcuenca en equilibrio, fase de madurez.

Curva Hipsométrica de la Subcuenca 7

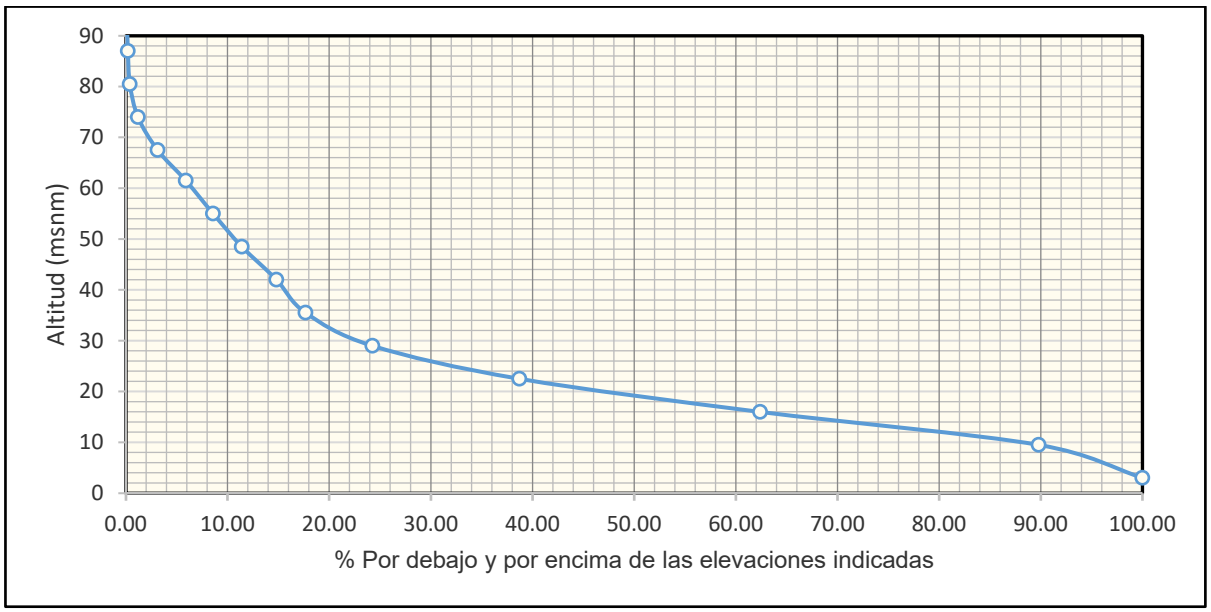
A partir de los valores mostrados en la Tabla 4-9, se muestra la curva hipsométrica de la subcuenca 7 en el Gráfico 4-7.

Tabla 4-9: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 7

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km^2)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km^2)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
1	0.0	6.0	3.0	11.033	107.977	100.00
2	7.0	12.0	9.5	29.580	96.944	89.78
3	13.0	19.0	16.0	25.569	67.364	62.39
4	20.0	25.0	22.5	15.607	41.795	38.71
5	26.0	32.0	29.0	7.115	26.188	24.25
6	33.0	38.0	35.5	3.087	19.073	17.66
7	39.0	45.0	42.0	3.670	15.987	14.81
8	46.0	51.0	48.5	3.055	12.316	11.41
9	52.0	58.0	55.0	2.903	9.261	8.58
10	59.0	64.0	61.5	2.995	6.357	5.89
11	65.0	70.0	67.5	2.084	3.363	3.11
12	71.0	77.0	74.0	0.862	1.279	1.18
13	78.0	83.0	80.5	0.211	0.417	0.39
14	84.0	90.0	87.0	0.101	0.206	0.19
15	91.0	96.0	93.5	0.049	0.105	0.10

N° de Intervalo	Cota Baja (msnm)	Cota Alta (msnm)	Altitud Media de Cada Área Parcial (msnm)	Áreas Parciales (km^2)	Áreas Acumuladas que están debajo de la Altitud (km^2)	% del Área Acumuladas que está debajo de la Altitud
16	97.0	103.0	100.00	0.027	0.056	0.05
17	104.0	109.0	106.50	0.010	0.029	0.03
18	110.0	115.0	112.5	0.010	0.019	0.02
19	118.0	121.0	119.5	0.006	0.009	0.01
20	124.0	129.0	126.5	0.003	0.003	0.00
Total				**107.977**		

Gráfico 4-7: Curva Hipsométrica de la Subcuenca 7

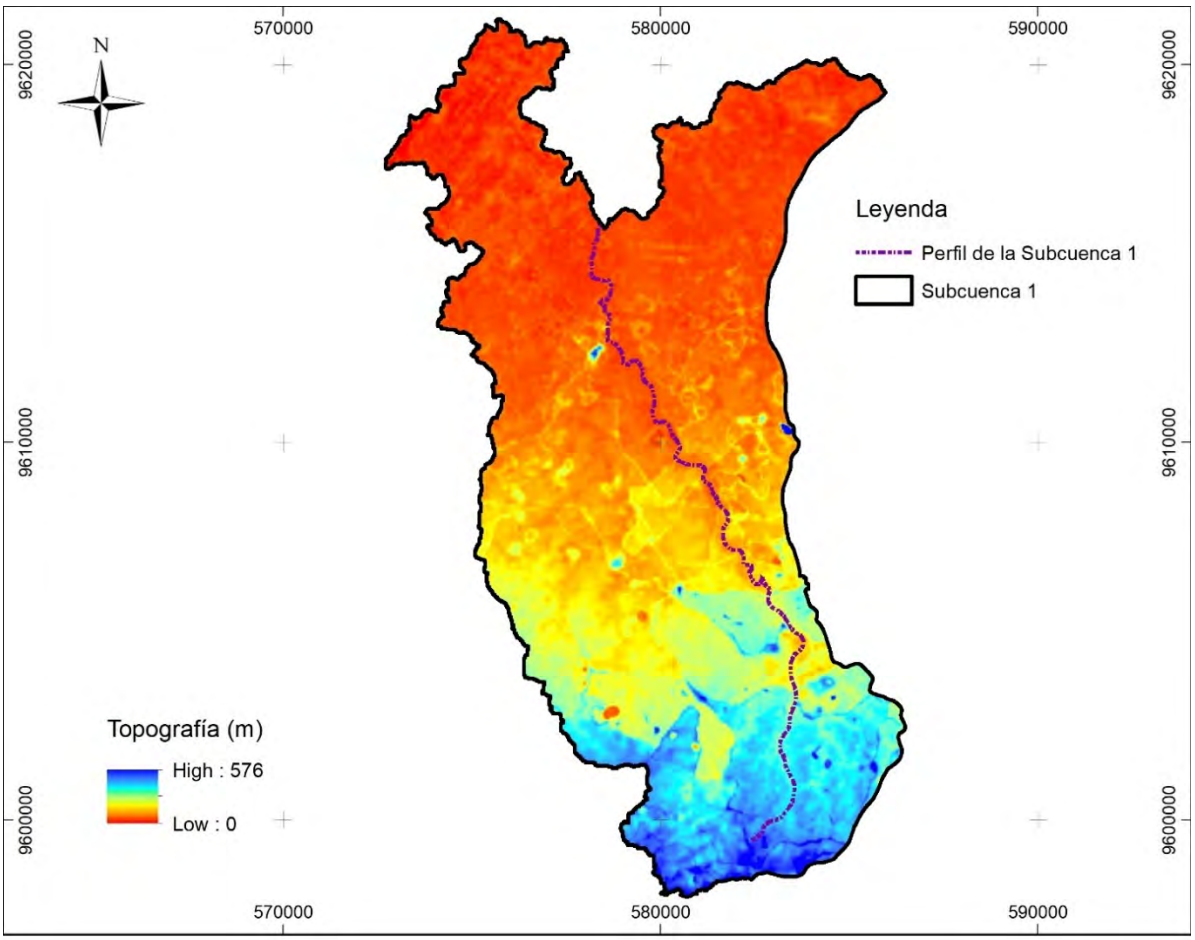


De la gráfica se tiene que la altitud media de la subcuenca 7 de estudio es 19.40 msnm, que representa el 50% del área total de la subcuenca de estudio. Según la gráfica hipsométrica encontramos que es una subcuenca en equilibrio, fase de madurez.

4.4.2.13 Perfil Longitudinal de las Subcuencas en el Área de Estudio

Basándonos en la información topográfica y el trazo del río principal, se obtuvo el perfil longitudinal de las subcuencas ubicadas en el área de estudio, las cuales se presentan en las Figuras 4-2 a 4-8.

Figura 4-2: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 1



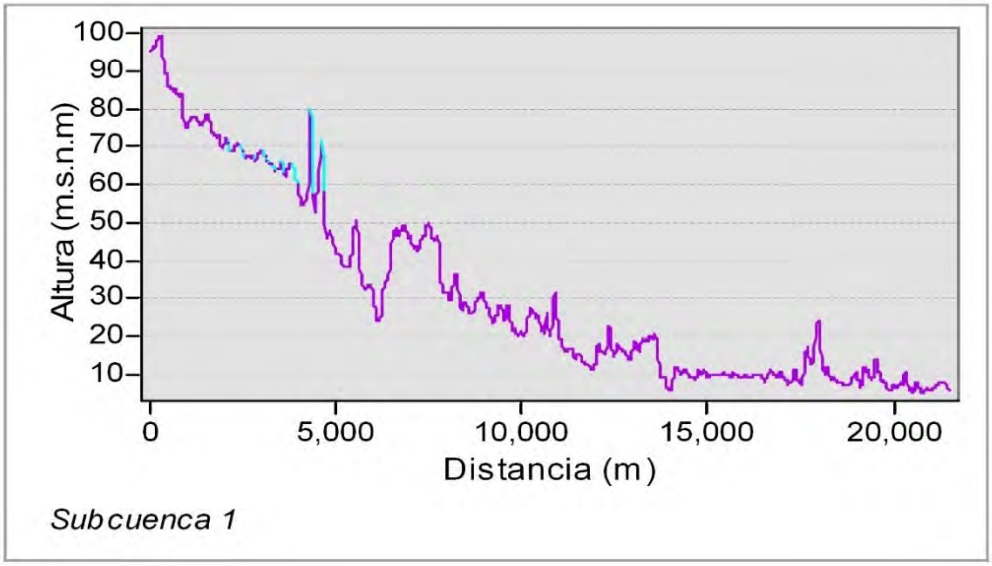
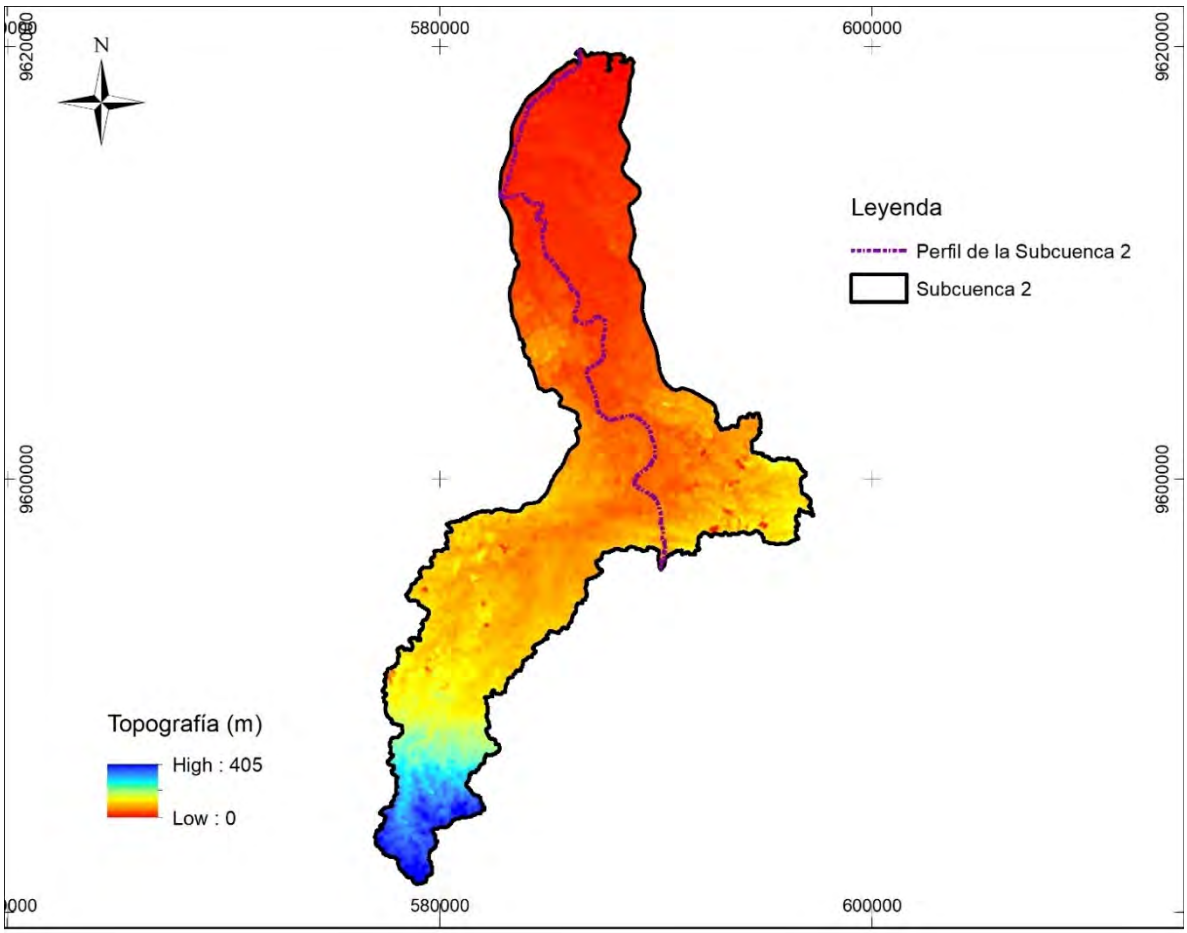


Figura 4-3: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 2



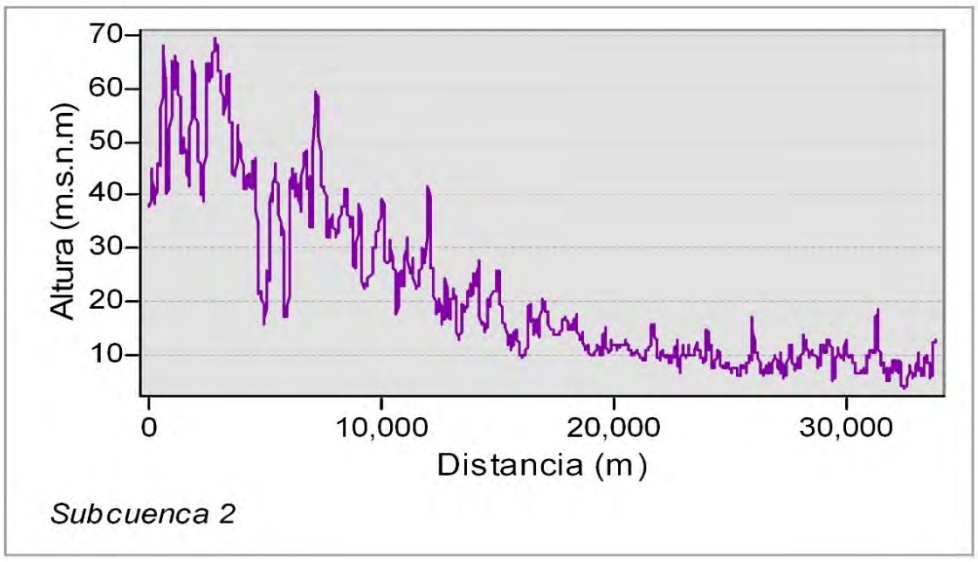
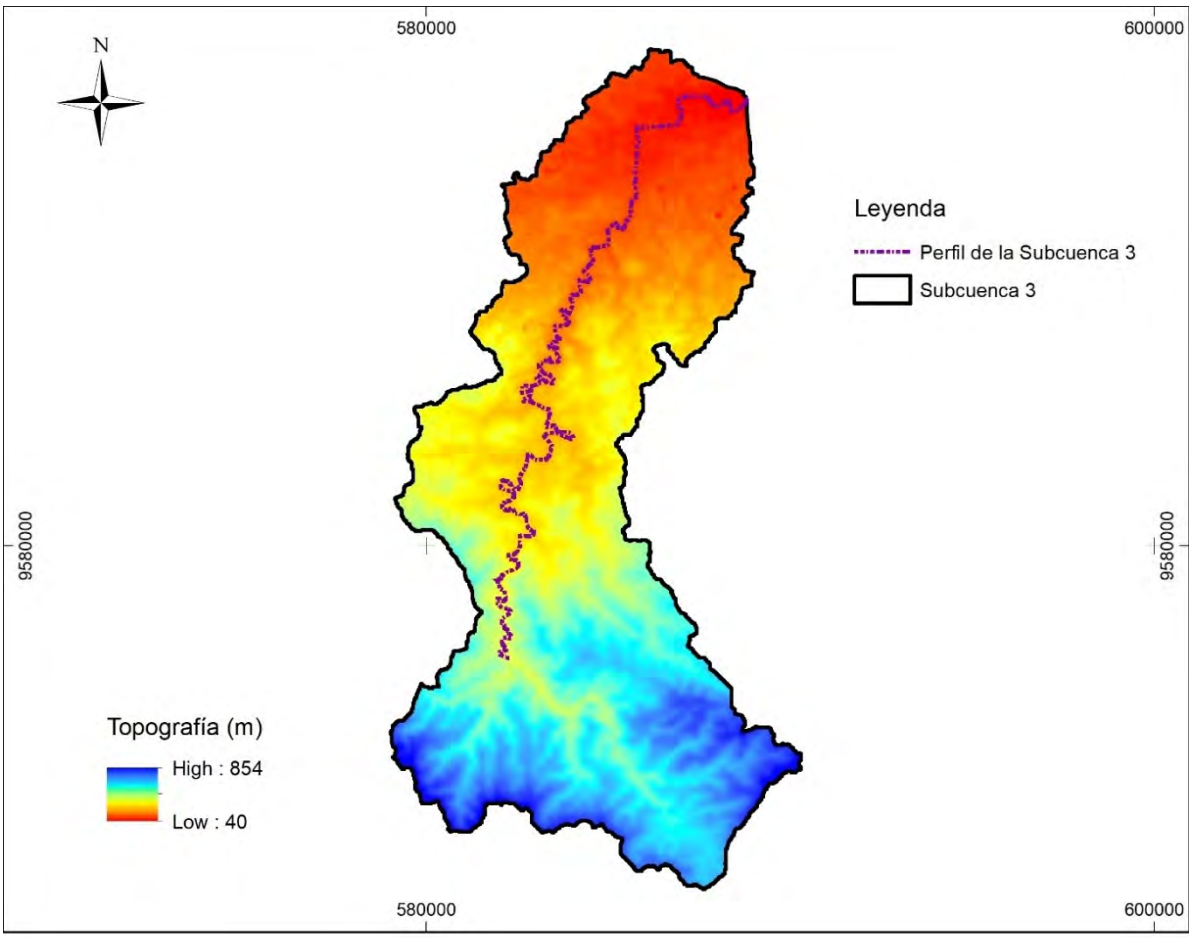


Figura 4-4: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 3



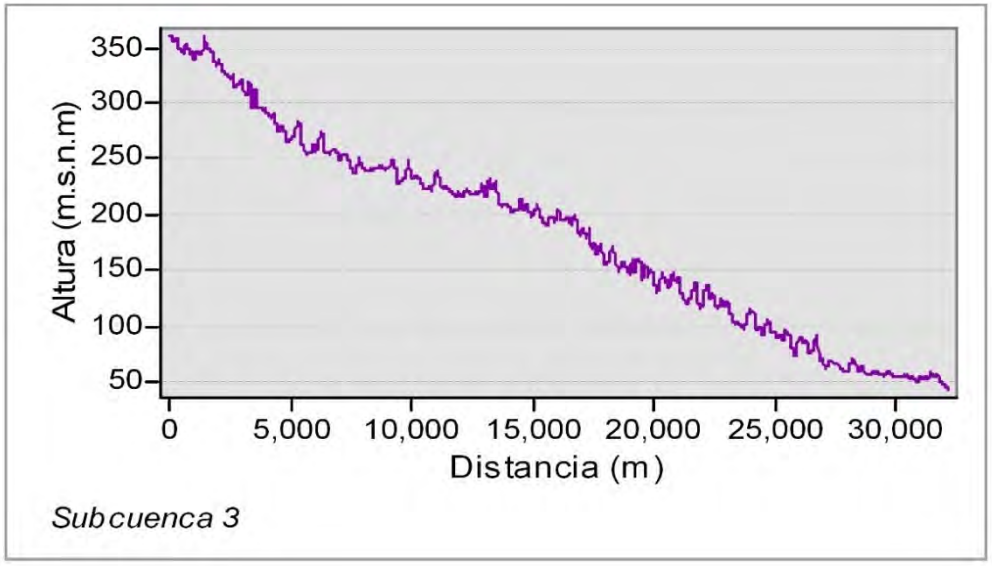
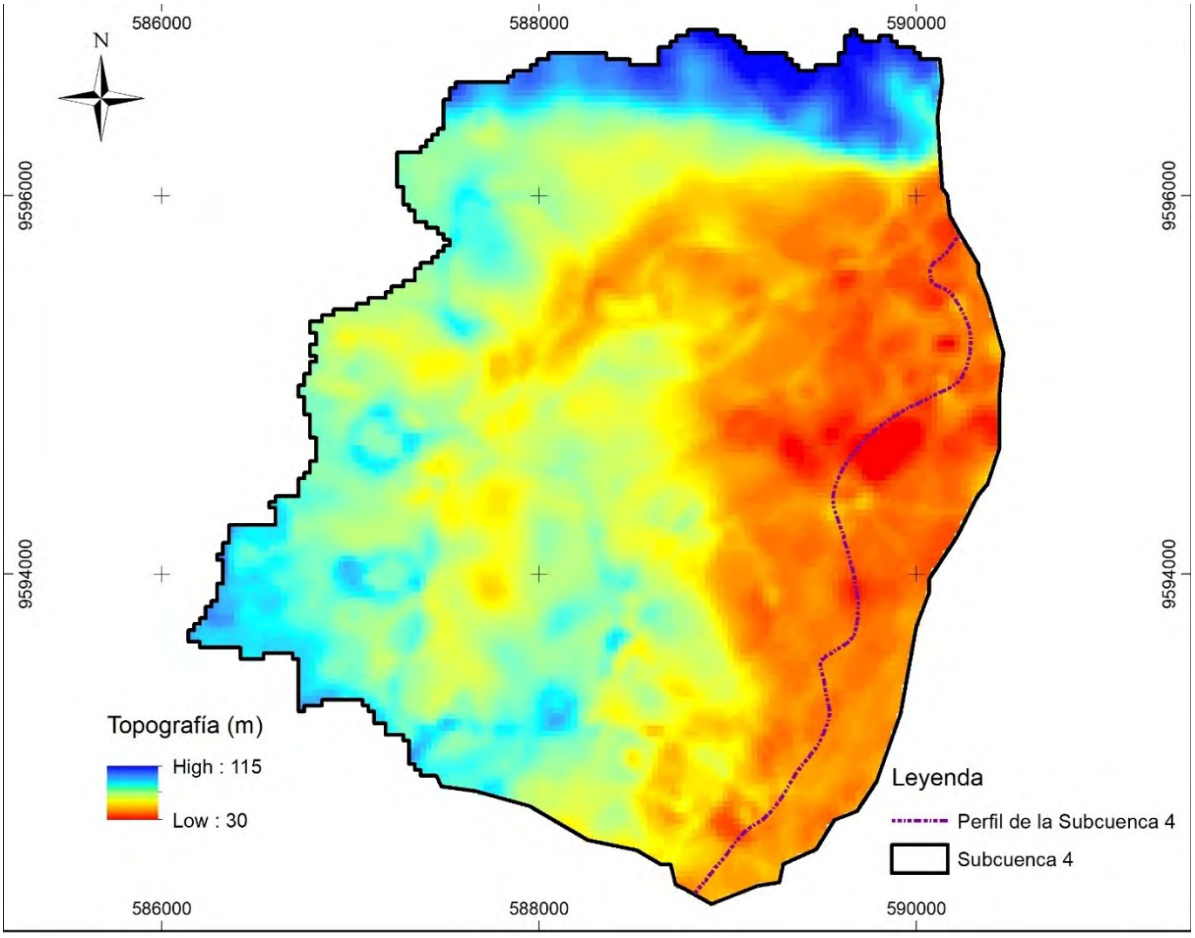


Figura 4-5: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 4



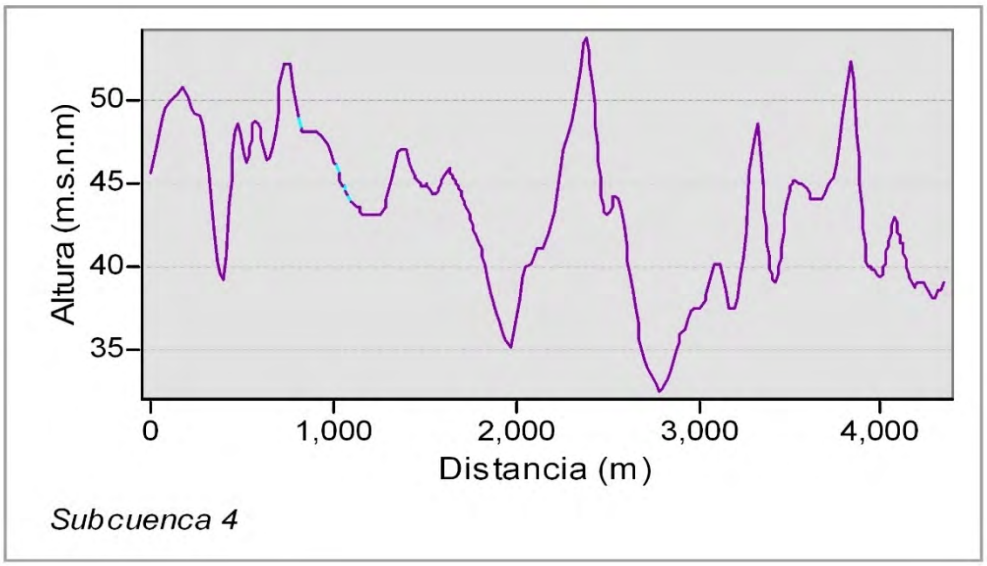
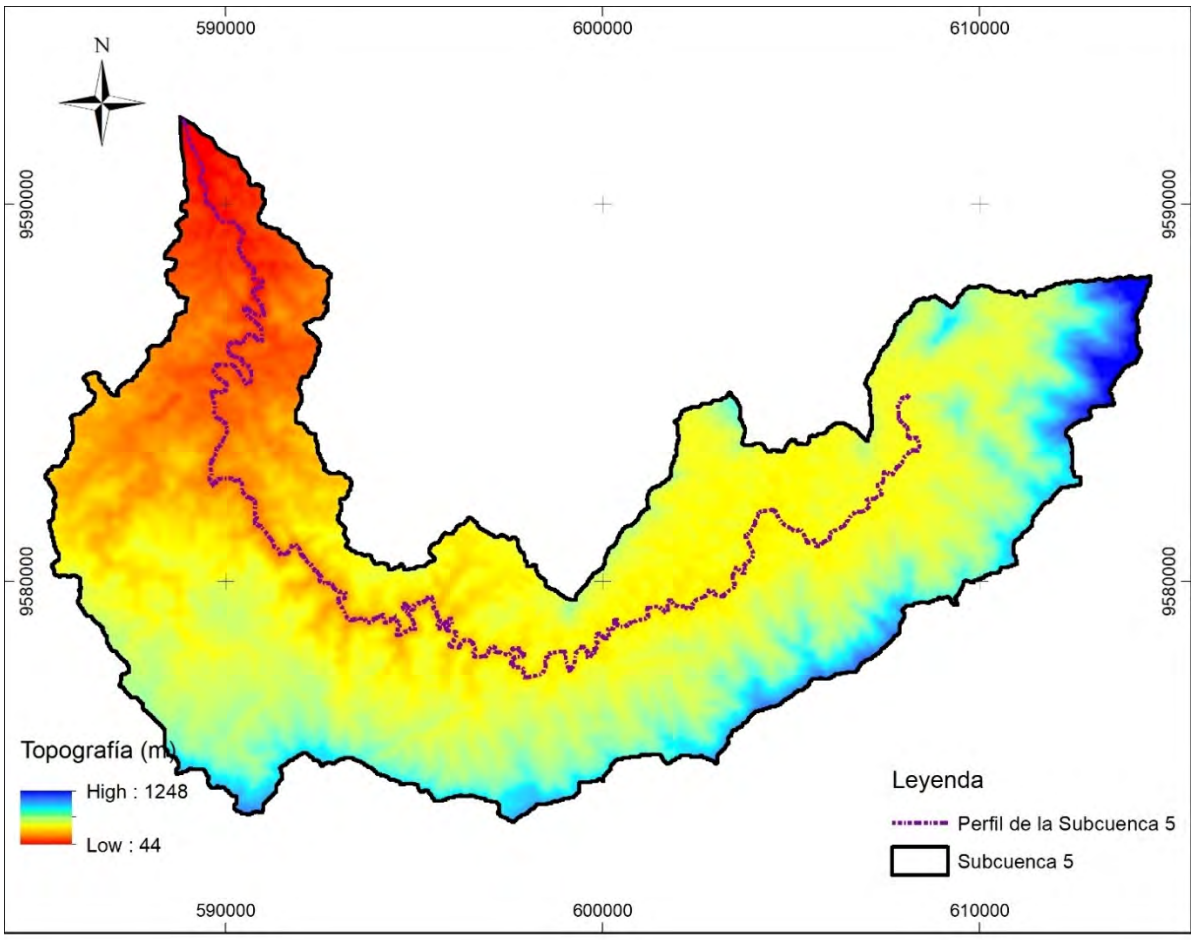


Figura 4-6: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 5



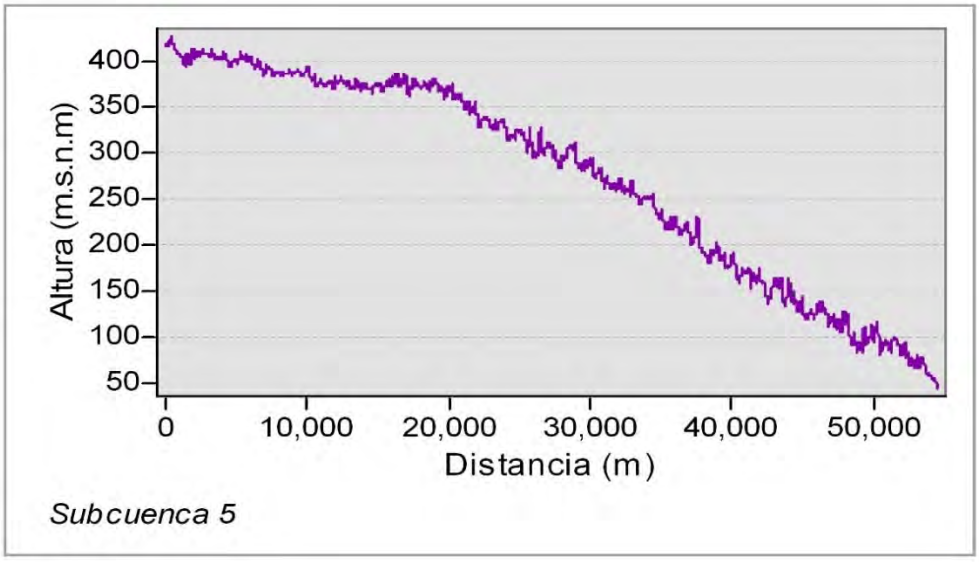
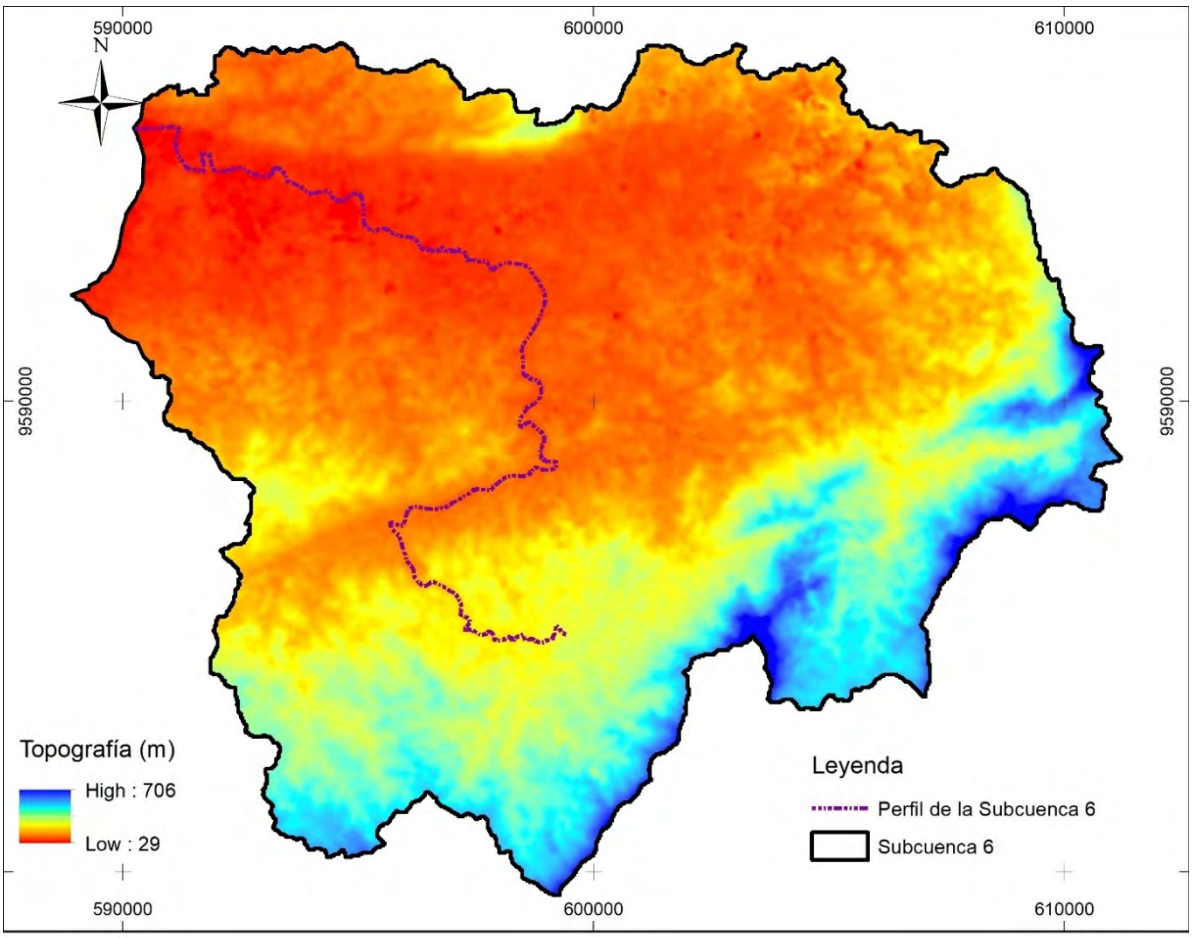


Figura 4-7: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 6



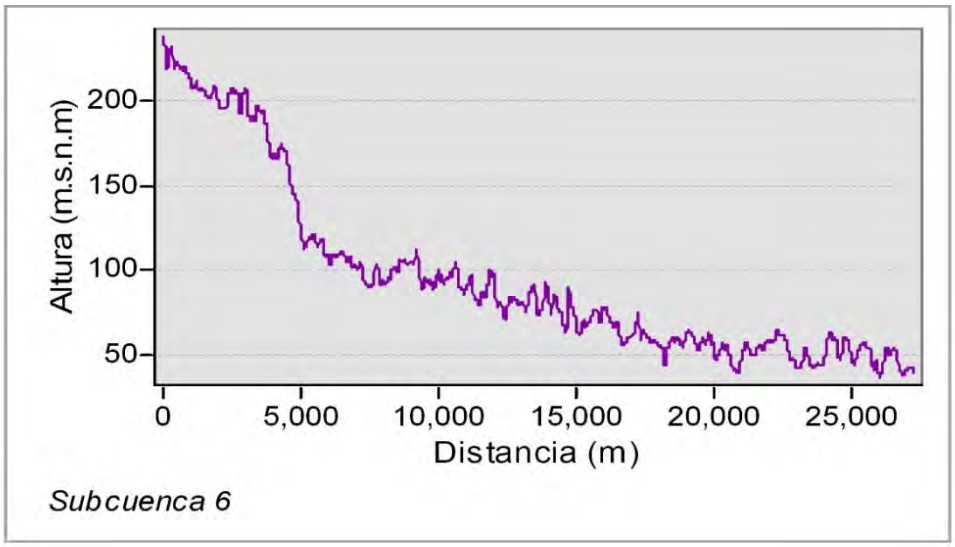
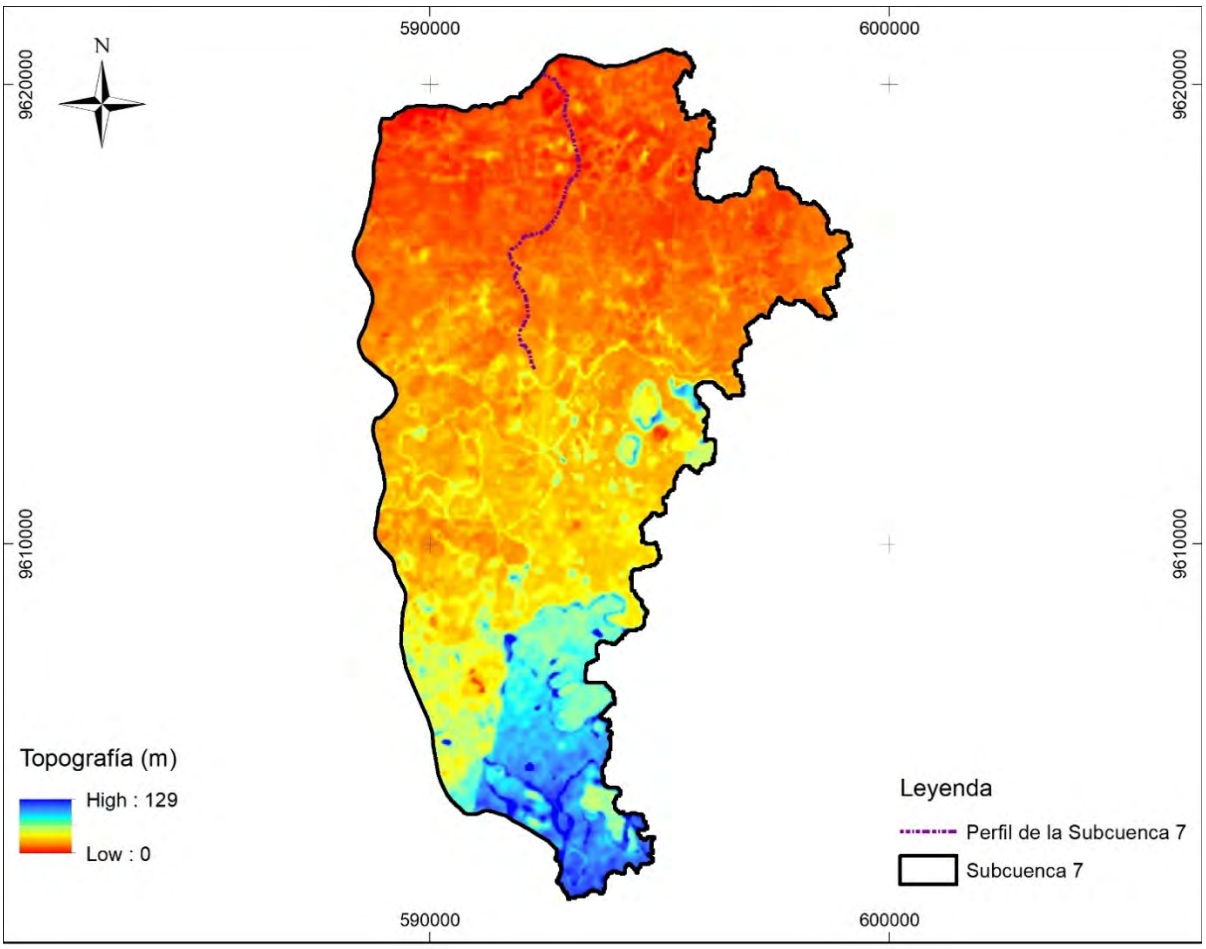
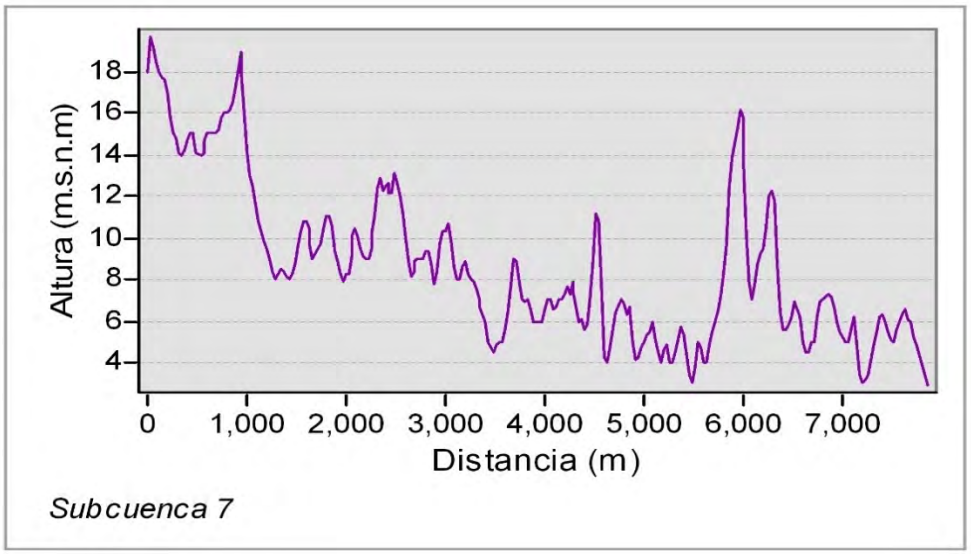


Figura 4-8: Perfil Longitudinal de la Subcuenca 7





4.4.3 Suelos

La caracterización de suelos en el área de estudio se elaboró en base a información existente, incluida en el documento "Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Río Zarumilla" (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018), y la Geodatabase implementado como parte del Diagnóstico Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto (GIRHT, 2014).

Los suelos fueron clasificados usando la clasificación *Soil Taxonomy* (Taxonomía del Suelo) que consiste en agrupar los suelos de acuerdo con sus propiedades, de modo de cada suelo está agrupado en una categoría que a su vez queda englobada en otra más amplia que alberga más categorías.

En el área de estudio se identificaron 07 grupos de suelo, los cuales se muestran en la Tabla 4-10, y su distribución en la Figura 4-9 y se describen a continuación.

Tabla 4-10: Suelos

N°	Tipo de Suelo	Superficie (km^2)	Porcentaje (%)
1	Alfisoles	463.73	40.28
2	Aridisoles	100.05	8.69
3	Entisoles	62.76	5.45
4	Inseptisoles	244.60	21.25
5	Oxisoles	8.32	0.72
6	Ultisoles	52.73	4.58
7	Vertisoles	15.59	1.35
Otros (áreas antrópicas, camaroneras y otra infraestructuras)		62.38	5.42
Área sin información		140.97	12.25
Total		**1151.14**	**100.00**

4.4.3.1 Alfisoles

Los alfisoles se caracterizan por ser suelos de color rojo con presencia de arcilla (tipo caolinita) y el pH ácido de 5.5. Son suelos que tienen un horizonte argílico, kándico, o nátrico y una saturación base del 35 por ciento o mayor. Normalmente tienen un epipedión ócrico, pueden tener un epipedión úmbrico, un horizonte petrocálcico, un fragipán o un duripán. Posee agua disponible para las plantas mesofíticas al menos durante tres meses consecutivos en la estación cálida de crecimiento. Son suelos cuyo aprovechamiento agrícola es intensivo, debido a su régimen hídrico y a su elevado porcentaje de saturación de bases (Blanquer, 2002).

4.4.3.2 Aridisoles

Los aridisoles se caracterizan por ser suelos demasiados secos. Estos suelos tienen un régimen de humedad arídico y un epipedión antrópico y saturación con aguas dentro de los 100 cm superficiales del suelo durante un mes o más en años normales. Un régimen de humedad arídico es aquel que en años normales no tiene agua disponible para las plantas

durante más de la mitad del tiempo acumulativo en que la temperatura del suelo a 50 cm bajo la superficie es >5°C y no tiene períodos tan largos como 90 días consecutivos cuando hay agua disponible para las plantas mientras la temperatura del suelo a 50 cm es continuamente > 8°C (Nuñez, 2000).

4.4.3.3 Entisoles

Los entisoles se caracterizan por ser suelos minerales derivados de materiales aluviales con textura moderadamente fina y que están asociados a los cursos de los ríos principales. Son suelos que tienen escasa o ninguna evidencia de desarrollo de horizonte pedogénicos, son suelos de origen muy reciente que normalmente desarrollados sobre abanicos aluviales, llanuras de inundación. Muchos Entisols tienen un epipedión ócrico y algunos tienen un epipedión antrópico. Muchos son arenosos o muy superficiales (Nuñez, 2000).

4.4.3.4 Inseptisoles

Los inseptisoles se caracterizan por ser suelos formados sobre materiales residuales, superficiales y de topografía entre inclinada a muy empinada. Se encuentran bajo la influencia de una temperatura media anual superior a 25°C y se caracterizan por presentar una saturación básica inferior a 40%. Son suelos de regiones húmedas y subhúmedas que tienen horizontes alterados que han perdido bases o hierro y aluminio, pero retienen algunos minerales meteorizables. Estos no tienen un horizonte iluvial enriquecido con arcillas silicatada y carbono orgánico (Blanquer, 2002). Así mismo, son suelos jóvenes, pero más desarrollados que los entisols, presentando horizontes de diagnóstico y epipedones bien diferenciados (Nuñez, 2000).

4.4.3.5 Oxisoles

Los oxisoles son suelos de las regiones tropicales y subtropicales. Se encuentran en pendientes suaves en superficies antiguas. Son mezclas de cuarzo, caolín, óxidos libres, y materia orgánica. Para la mayor parte son suelos casi uniformes sin horizontes claramente marcados. Las diferencias en las propiedades con la profundidad son tan graduales que los límites del horizonte son generalmente arbitrarios (Unidos, 2014).

4.4.3.6 Ultisoles

Los ultisoles son suelos que tienen un horizonte que contiene arcilla silicatada translocada (un horizonte argílico o kándico) y pocas bases (saturación base menos del 35 por ciento). La saturación base en la mayoría de Ultisoles decrece con la profundidad (Blanquer, 2002).

4.4.3.7 Vertisoles

Los vertisoles son suelos que tienen un alto contenido de arcilla expandible y que tienen en algún momento del año grietas profundas. Estos suelos se retraen cuando están secos y se expanden cuando se humedecen (Unidos, 2014).

Figura 4-9: Suelos

4.4.4 Cobertura Vegetal

De acuerdo con la información existente, aproximadamente un 50% del área total de estudio corresponde a cobertura vegetal natural, conformada por tres formaciones vegetales; bosque, matorral y herbazal.

El área de estudio está cubierta por áreas agrícolas, bosques secos, bosques húmedos, esteros, cuerpos de agua (laguna, lagos, cochas), manglar, matorral arbustivo y área urbana e infraestructura de producción (camaroneras).

En general, la vegetación natural arbórea húmeda normalmente típica de la zona ha sido desbastada para hacer pastos cultivados y ahora solo se encuentra en la zona alta de la cuenca Zarumilla.

En el área de estudio se identificaron 11 tipos de cobertura vegetal, los cuales se muestran en la Tabla 4-11 y su distribución en la Figura 4-10, y se describen a continuación.

Tabla 4-11: Cobertura Vegetal

N°	Cobertura vegetal	Superficie (km^2)	Porcentaje (%)
1	Bosques	483.11	41.97
2	Frutales	88.31	7.67
3	Misceláneo de Frutales	1.93	0.17
4	Misceláneo Indiferenciado	12.79	1.11
5	Pasto Cultivado	296.32	25.74
6	Plantación Forestal	2.00	0.17
7	Tierra Agrícola Sin Cultivo	0.28	0.02
8	Tierras Improductivas	0.96	0.08
9	Vegetación Arbustiva	37.81	3.28
10	Vegetación Herbácea	44.01	3.82
11	Manglar	10.62	0.92
Otros (áreas antrópicas y cuerpos de agua)		79.57	6.91
Área sin información		93.43	8.12
Total		**1151.14**	**100.00**

Figura 4-10: Cobertura Vegetal

4.4.4.1 Plantaciones Forestales

Las plantaciones forestales representan el 0.17% del área de estudio. Entre las principales coberturas vegetales en este grupo se tiene a la caña guadua o bambú, teca y caoba; representan el cultivo de una sola especie. La Caña Guadua y Caoba se acentúan en climas más cálidos, por lo que se puede reportar su existencia en la parte de Carcabón y Huaquillas (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018).

- Caña Guadua, especie adaptada, protectora del suelo y de mucha utilidad para varias aplicaciones, reforestar con estas plantas sería de gran beneficio ambiental y económico. En el embalse Tahuín se ha hecho esta actividad.
- Caoba, especie forestal adaptada a la zona, de gran valor comercial, puede considerarse para la reforestación con enfoque económico, junto con especies como la Teca, Cedro; sean en condiciones naturales o con riego, como existe cerca de Huaquillas.
- Teca, especie forestal adaptada a la zona, con madera que se destaca por su valor en el mercado, así como también por sus propiedades de alta resistencia y durabilidad, es usada comúnmente para fabricar productos que se utilizan en los exteriores.

4.4.4.2 Frutales

Los frutales representan el 7.67% del área de estudio. En este grupo encontramos los cultivos permanentes (plátano, cacao, café, limón, mango), semipermanentes (caña de azúcar y maracuyá) y anuales (maíz/cereales)

Cultivo de Café

Cultivo en sistema agroforestal establecido para la producción de café (Coffea arabica var. criollo). Se caracteriza por la asociación con diversas especies arbóreas tales como: guaba, chirimoya, cítricos, banano y otros frutales.

Actualmente resulta poco rentable motivo por el cual, grandes áreas de este cultivo se están removiendo para convertirlas en pastizales o sembríos de maíz o, en su defecto, se ha dejado de cultivar y manejar el café en ciertos sectores dejando abandonadas las fincas.

Plátano

El plátano principalmente se cultiva en las áreas planas de la cuenca baja, con aplicación de riego, por ser un cultivo de alta demanda hídrica, requerimientos de suelos francos y drenaje; constituye uno de los principales cultivos del sistema productivo de la cuenca baja del del área de estudio y por lo tanto generador de ingresos económicos.

Limón

El limón es el cultivo de mayor importancia en el sistema productivo de la cuenca baja, se maneja bajo riego y se encuentra establecido con el carácter de cultivo permanente; es generador de trabajo y de ingresos económicos.

Cacao

El cacao está establecido en las áreas de riego de la cuenca baja, predomina el cacao clonal CCN-51 de mayor rendimiento que el cacao criollo, ya sea como monocultivo o en huertos asociados con plátano o banano.

Mango

El mango se encuentra en huertos asociados o en monocultivo para exportación, dispone de riego, con aprovechamiento de agua subterránea.

Maíz

El maíz se cultiva temporalmente, en los meses de lluvias, en las partes altas donde es asequible el riego; en la parte baja se cultiva con riego en los meses de la estación seca. Cabe resaltar que en este grupo encontramos a los cereales.

4.4.4.3 Tierras Agrícolas Sin Cultivo

Las tierras agrícolas sin cultivo representan el 0.02% del área total de estudio. Son áreas que no se encuentran cultivadas por la carencia de agua o abandono de tierras.

4.4.4.4 Misceláneo Indiferenciado

Los misceláneos indiferenciados corresponden al 1.11% del área total de estudio. En este grupo encontramos la mayor proporción de pastizales chilena (Panicum maximum), asociado con leguminosas de árbol (algarrobo, samán, guachapelí), asociados en simbiosis de gramíneas y leguminosas; y otras especies del lugar (guarumo, niguito) y especies forestales dispersas del bosque seco.

4.4.4.5 Misceláneo de Frutales

Los misceláneos de frutales representan el 0.17% del área total de estudio. En estas zonas encontramos cítricos, mango, zapote, maracuyá; en asociación con huertos de varias especies. Es común asociar café, cacao, plátano y árboles de sombra como los guabos, por ejemplo; mientras el café o cacao se ponen productivos a los 3 años; el plátano representa los ingresos al año de plantados; estas áreas no disponen de riego, se localizan en los pies de monte o estribaciones.

4.4.4.6 Pasto Cultivado

Los pastos cultivados representan el 25.74% del área total de estudio. Se distribuye especialmente en la parte alta y media de la cuenca (Las Lajas, Huaquillas y Matapalo) y es el principal cultivo para el uso pecuario (principalmente bovina). Producto consumido por las ganaderas para la producción de carne y leche (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018).

4.4.4.7 Bosque

Los bosques representan el 41.97% del área total de estudio. En este grupo encontramos los bosques húmedos medianamente alterado, bosque húmedo muy alterado, bosque húmedo

poco alterado, bosque seco medianamente alterado, bosque seco muy alterado, bosque seco poco alterado, manglar y manglar medianamente alterado.

Los bosques húmedos están compuestos por árboles, arbustos, lianas, líquenes y hierbas. Se encuentra presente la mayor parte de la cobertura en las partes altas de Matapalo. Los árboles pierden solo el 30 % de su follaje en la época seca (mayo-noviembre) y está caracterizado por cerros de más de 300 metros de altura relativa y pendientes fuertes (más de 50%). Se desarrolla sobre terrenos accidentados a ondulados y se caracteriza por un clima húmedo.

Mientras que en los bosques secos encontramos formaciones boscosas que pierden sus hojas parcial o totalmente durante la época seca, 6 a 9 meses durante el año, se ubican en zonas con niveles de precipitación estacional y escasa, con alta variación interanual. En estos bosques, el número de especies forestales es significativamente menor que las identificadas dentro del bosque húmedo. Las colinas pueden tener una altura relativa máxima de entre 30 y 180 metros y pendientes entre 15 y 80%.

Se pueden apreciar claros discontinuos en el bosque, naturales o provocados, con la presencia de árboles aislados dominantes. Se localiza principalmente en las partes medias y altas de la cuenca (Arenillas, Matapalo y Papayal).

Los manglares presentan vegetaciones arbóreas que soporta inundaciones continúas causadas por los flujos combinados del agua salada provenientes de las mareas y el agua dulce proveniente de los ríos, a través de las ramificaciones o canales de penetración conocidos como “esteros”. Predominan árboles de hasta 8 a 10 m de altura, pero también existen áreas donde la vegetación no sobrepasa los 5 de altura (manglillo). Está conformada por bosque de mangle, bosque seco asociado al mangle, esteros y bancos de arena. En los bordes de los esteros (canales de marea) se establece una vegetación particular, constituida básicamente por árboles siempre verdes (con raíces zancudas) de *Rhizophora mangle* y *Rhizophora harrisoni* “mangle”, *Laguncularia racemosa* “jelí” o “mangle blanco”, *Avicenia germinans* “mangle prieto” o “mangle salado” y *Conocarpus erecta* “mangle piña”.

Es importante indicar que este tipo de cobertura ha sido altamente degradado y reducido principalmente por el establecimiento de camaroneras.

4.4.4.8 Vegetación Arbustiva

La vegetación arbustiva representa el 3.28% del área total de estudio. En este grupo encontramos los matorrales húmedos con mayor presencia y los matorrales secos en menor proporción.

En el matorral húmedo encontramos formaciones denominadas plantas leñosas, con árboles que alcanzan hasta 6 m de altura y están cubiertos de epífitas y hepáticas. Aquí el suelo está cubierto por una densa capa de materia orgánica y abundan los helechos, la cual protege el suelo dando así las condiciones para que la vegetación arbórea se desarrolle y vaya ampliando paulatinamente su superficie.

En el matorral seco encontramos vegetaciones arbustivas con hojas suculentas o pequeñas y de cutícula dura. La fisonomía de la vegetación es bastante abierta y achaparrada que no supera los 2 m de alto, muchas veces se puede evidenciar afloramientos de suelo y en ocasiones se presentan arboles aisladas dominantes. Los cactus son un elemento dominante

al igual que otras especies espinosas. Este sistema se encuentra cerca de la línea de costa en la parte de su distribución correspondiente al Ecuador (Huaquillas), y en el norte de Perú (Papayal y Aguas Verdes) donde transiciona hacia el desierto.

4.4.4.9 Vegetación Herbácea

La vegetación herbácea representa el 3.82% del área total de estudio. En este grupo encontramos la vegetación herbácea húmeda muy alterada (la de mayor presencia), vegetación herbácea seca medianamente alterada y vegetación herbácea seca muy alterada.

Se define como las formaciones conformadas por especies de plantas no lignificadas, sin ramificación y sin tronco definido cuyas hojas pueden ser anuales o perennifolias

La vegetación predominantemente es las gramíneas, que no reciben cuidados antrópicos y que mantienen el verdor de sus hojas en forma constante, utilizados con fines de pastoreo esporádico, esta vegetación es una composición de especies distintas dependiendo de la humedad, tipo del suelo y sector geográfico de la distribución. Las especies más importantes del sector son: barbasco (*Jaquinia pubescens, J. sprucei*) y salvia (*Salvia officinalis*), entre los principales.

4.4.4.10 Tierras Improductivas

Las tierras improductivas representan el 0.08% del área total de estudio. Este grupo se caracteriza por presentar restricciones como suelo, topografía, drenaje, salinidad, inundaciones, erosión, clima o por daños antrópicos; no pueden ser utilizadas para actividades agrícolas.

4.4.4.11 Manglar

Representa un 0.92 % del área de estudio. Está conformado por comunidades arbóreas que soportan inundaciones continúas causadas por los flujos combinados del agua salada proveniente de las mareas y del agua dulce proveniente de los ríos, a través de las ramificaciones o canales de penetración conocidos como “esteros”. El manglar está dominado por comunidades de árboles y en menor proporción por arbustos (MINAM, Diciembre, 2015). La especie predominante es el mangle. Se pueden diferenciar cinco tipos: el rojo (*Rhizophora mangle*), el colorado (*Rhizophora harrisonii*) —ambos presentan “zancos” —, el salado (*Avicennia germinans*) y el blanco (*Laguncularia racemosa*) —sin “zancos” —; y finalmente el piña (Conocarpus erectus) que está más asociado al bosque seco ecuatorial, que se localiza en las partes centrales de algunas islas y en zonas cercanas al manglar. También se puede presenciar matorrales arbustivos y gramadales (SERNANP, 2020).

4.4.4.12 Otros

En este grupo se tiene las áreas intervenidas por el hombre, conocidas como antrópicas, y los cuerpos de agua; ambos representan aproximadamente el 6.91% del área total de estudio.

Las áreas antrópicas son áreas sin vegetación asentándose principalmente centros poblados, seguido de camaroneras, áreas en proceso de erosión, complejo portuario, cantera, vertedero de basura, cementerio, complejo recreacional y finalmente relleno sanitario (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018).

Dentro de los cuerpos de agua encontramos banco de arena, embalse, laguna, poza y río; donde este último tiene la mayor extensión.

4.4.5 Ecosistemas

En el área de estudio se presenta el ecosistema manglar que es un sistema abierto fluvial y marino, que dependen de flujos de agua para el transporte de nutrientes y para la redistribución de la materia orgánica y sedimentos, así como para regular la salinidad. Se extiende desde Punta Malpelo hasta los límites del Ecuador, abarcando una extensión aproximadamente de 35 km.

Los manglares se caracterizan por ser dinámico (flujo de marea, alta salinidad, aporte de sedimentos, entre otros), debido a que se ubica en una zona de intercambio de aguas continentales y aguas provenientes del mar. Presenta terreno fangoso o areno-fangoso, lugar donde existen extensos bosques de mangle encontrando especies como: Mangle rojo y colorado (*Rhizophora mangle* y *Rhizophora harrisonii*), Mangle salado (*Avicennia germinans*), Mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y Mangle piña (*Conocarpus erectus*); así mismo, existen otras plantas de agua salobre: *Batis maritima* y *Sesuvium portulacastrum*

Según la convención RAMSAR, los manglares son humedales tropicales de agua salada, estuarios y/o lagunares establecidos en zonas intermareables, representan una unidad integrada y autosuficiente, compuesta por especies adaptadas fisiológicamente a un medio salobre (GTME-MINAM, 2016).

A continuación, la Tabla 4-12 muestra los detalles de los humedales que se encuentran en la cuenca Zarumilla.

Tabla 4-12: Humedales

N°	País	Cuenca	Sitio WI N°	Nombre	Área (ha)	Fecha de Registro
1	Ecuador	Jubones	6EC007	Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara	7451	02/02/2002
2			6EC014	La Tembladera	1454	06/12/2011
3	Perú	Zarumilla	-	Los Manglares de Tumbes	2972	02/03/1988

Fuente: http://www.sernanp.gob.pe/los-manglares-de-tumbes y (Changjian Institute Of Survey Planning, 2016)

Asimismo, en la Reserva Ecológica Arenilla se cuenta con dos ecosistemas, Bosque bajo y arbustal deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo (BdTc02) y el Bosque Deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo (BdTc01). (Ambiente, 2014). Sitio importante para contener especies claves, es decir; amenazadas, de distribución restringida y endémicas; especialmente aves terrestres y mamíferos.

4.4.6 Zonas de Vida

Las zonas de vida presentes en el área de estudio según el Mapa Ecológico del Perú (INRENA, 1995) son: monte espinoso – Tropical (mte – T), bosque muy seco – Tropical(bms-T), bosque seco - Premontano Tropical / bosque seco – Tropical(bs-PT/bs-T), bosque seco – Tropical(bs-T).

4.4.6.1 Monte espinoso tropical: (mte-T)

El Monte Espinoso Tropical, inicia en el archipiélago de la Isla Jambelí, se caracteriza por ser una zona de vida cálida y árida cuya franja territorial comprende desde los Manglares de Motuche y Chacras (Machala, Ecuador) hasta lo largo de la parte central del departamento de Tumbes (Zarumilla, Aguas Verdes y parte de Papayal, Perú), (GORE-Tumbes, 2006).

Altitudinalmente los Monte Espinoso Tropical se extiende desde el nivel del mar hasta los 300 msnm, con temperatura media anual oscilante entre 24 y 26°C. La precipitación anual varía entre los 250 y 500 mm; una parte de dicha precipitación cae en forma de llovizna y garúas sobre todo en las noches. Además, presenta meses ecológicamente secos entre 8 y 10 meses; régimen de humedad árido, debido a que el promedio de evapotranspiración potencial total por años varía entre cuatro y ocho veces la precipitación.

Así mismo, presenta una topografía ondulada suave hasta colinosa baja, suelos profundos y medianamente profundos con textura pesada a muy pesada con gran presencia de arcilla tales como franco arcilloso, arcilloso limoso y arcilloso (CARE, 2005). Dichas características favorecen la presencia de especies arbóreas, arbustos y cactáceas (véase Foto 4-1); donde los árboles tienen un promedio de 8 metros llegando a alcanzar alturas máximas de 12 metros.

Foto 4-1: Especies Arbóreas y Arbustos

Fuente: https://prezi.com/2emhzybunlr9/zonas-de-vida-de-holdridge-en-el-ecuador/

En el monte espinoso-Tropical (mte-T) donde existen 5 estaciones climatológicas, la biotemperatura media anual máxima es de 25º G (Bagua, Amazonas) y la media anual minima, de 23.4 ºC (El Salto, Tumbes). El promedio máximo de precipitación por año es de 793 milímetros (Bagua, Amazonas) y el promedio mínimo, de 162.9 milímetros (Zarumilla, Tumbes) o Según el Diagrama Bioclimático de Holdridge, el promedio de evapotranspiración potencial total en esta zona de vida varía entre 4 y 8 veces la precipitación, ubicándola, por lo tanto, en la provincia de humedad: ARIDO.

4.4.6.2 Bosque muy seco tropical: (bms-T)

Los bosques muy secos tropicales son conocidos también como Sabanas, ubicados en la región latitudinal tropical que comprende la confluencia de los ríos; Palmales, Arenillas. Ocupa

un importante sector de la provincia Zarumilla (sector bajo y parte alta del distrito Matapalo), que se caracteriza por presentar clima semiárido.

Altitudinalmente los bosques muy secos tropicales se extienden entre los 200 y 600 msnm, con temperatura media entre los 24 y 26°C y lluvia promedio entre los 500 y 1000 mm. Presenta pequeñas colinas y varía a ondulado cuyos suelos son de naturaleza calcárea, profundos y arcillosos. Se caracterizan por presentar vegetación natural primaria (bosque pluviofolio); es decir, árboles relativamente delgados con abundante epífitas, arbustos y numerosas cactáceas. También presenta plantas herbáceas, principalmente gramíneas de densidad variable y de porte alto (GORE-Tumbes, 2006), (véase Foto 4-2).

Esta zona de vida es conocida también con el nombre de Sabana y se ubica en la región latitudinal Tropical. Se distribuye ocupando un importante sector del departamento de Tumbes, principalmente en sus límites con el Ecuador.

Foto 4-2: Bosque muy seco tropical (bms-T)

Fuente: https://jmarcano.com/bosques/tipos/tropicales.html

4.4.6.3 Bosque seco tropical: (bs-T)

Los bosques secos tropicales se ubican en la parte intermedia del distrito de Matapalos, que se caracteriza por predominar un clima subhúmedo.

Altitudinalmente los bosques secos tropicales se extienden entre los 200 y 600 msnm, con temperatura oscilante entre los 24 y 25°C y la precipitación fluctúa entre los 1000 y 2000 mm. Presenta un relieve suave a colinado hasta empinado, predominando los terrenos ondulados, de suelos profundos, arcillosos y de naturaleza calcárea. Se caracteriza por presentar vegetación natural, conformada por bosques altos con especies perennifolias y caducifolias. También, presenta sotobosque que está compuesto principalmente por plantas arbustivas y herbáceas muy dispersas, permitiendo entrar al bosque sin dificultad. Además, presenta plantas xerofíticas y especies arbóreas dispersas asociados principalmente con gramíneas perennes anuales, como principal indicador de este tipo de zona (GORE-Tumbes, 2006), (véase Foto 4-3).

En esta zona de vida, donde existen instalada 6 estaciones climatológicas y 7 pluviométricas, la biotemperatura media anual máxima es de 25.1 C ((Juanju1, San Martin) y la media anual mínima, de 23.9ºC (Sirialo, Cuzco). El promedio máximo de precipitación total por año es de

1391 milímetros (Juan-jui. San Martin) y el promedio mínimo, de 1020 milímetros (Tinge de Ponaza, san Martín).

Foto 4-3: Bosque seco tropical (bs-T)

Fuente: https://www.conservamospornaturaleza.org/img/2018/08/WHW3897a.jpg

4.4.6.4 Bosque seco - Premontano Tropical (bs-PT)

En la zona de vida bosque seco-Premontano Tropical (bs-PT), donde existen 7 estaciones climatológicas y 24 pluviométricas, la biotemperatura media anual máxima es de 25.1ºC (Bellavista San Martín) y la media anual mínima de 17.4ºC (Santa Cruz, Cajamarca).

4.5 ASPECTOS BIOLÓGICOS

Para la descripción biológica, se usó como fuente de información a la contenida en el plan de manejo de la reserva ecológica Arenillas, la propuesta de definiciones conceptuales y sistematización para los ecosistemas en la leyenda preliminar del mapa nacional de ecosistemas del Perú, la cobertura vegetal Cantón Milagro y especies forestales bosques secos Ecuador. Los documentos mencionados identifican especies de flora y fauna propia del bosque seco, bosque húmedo y manglar, ecosistemas predominantes en el área de estudio.

Es importante mencionar que como parte de la flora identificada en el área de estudio hay especies nativas, introducidas y endémicas, las cuales son agrupadas según su especie; es decir, árboles, arbustos y especies leñosas cultivadas. A continuación, se describe brevemente a las especies de flora y fauna identificadas en el área de estudio.

4.5.1 Flora

El área de estudio registra variedad de especies en los bosques secos, seguido de los bosques húmedos y finalmente, los manglares. Es importante mencionar que en los bosques secos encontramos especies de importancia comercial como Caoba, Palo santo, Palo vaca, entre otros.

Manglar

El ecosistema Manglar se caracteriza por albergar especies típicas, las cuales están distribuidas en 22 familias y 36 géneros; además, registra 41 especies florísticas. Estas especies que alberga el manglar se caracterizan por ser tolerantes a niveles altos de salinidad, así como a la inundación. Entre las especies que pueden sobrevivir en este ecosistema tenemos al mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle colorado (*Rhizophora harrisonii*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), mangle salado (*Avicennia germinans*), mangle prieto (*Avicenia tomentosa*) y mangle piña (*Conocarpus erectus*). Así mismo, existen pequeñas plantas de agua salobre como la *Batis maritima* y *Sesuvium portulacastrum* (GTME-MINAM, 2016).

Bosque Seco

El árbol más representativo de los bosques secos es el ceibo (*Ceiba trischistandra*) (véase Foto 4-4), especie de color verde, tronco abultado y cubierto de espinas. También, se encuentran especies como el algarrobo (*Prosopis pallida*), charan (*Caesalpinia paipai*), palo verde (*Parkinsonia aculeata*), guayacán (*Tabebuia chrysantha*), pego-pego (*Cordia lutea*), guarapo (*Terminalia valverdae*), cabo de hacha (*Machaerium millei*), pooroporo (*Cochlospermum vitifolium*), barbasco (*Piscidia carthagenensis*), chaquiro (*Pithecellobium excelsum)* (Mendoza, 2012).

También registra especies como el ébano (Ziziphus thyrsiphlora), palo santo (Bursera graveolens), salvajina (Tillandsia usneoides), pretino (Cavanillesia platanifolia), cedro (Cedrela montana), laurel (Cordia eriostigma), pechiche (Vitex gigantea) y palo de balsa (Ochroma pyramidale) (INDECI, 2008).

Entre los arbustos más representativos tenemos el papelillo (*Bouganvilea peruviana*), borrachera (*Iponeacarnea*), epífitas como la salvajina (*Tillandsia usnioides*) y las achupallas (*Tillandsia sp*) y, en los niveles más bajos están las cactáceas filamentosas de los géneros *Hylocereus sp* y *Rhipsallis sp* (INDECI, 2008). Otras especies representativas de los bosques secos encontramos al *Cecropia litorales*, *Anacardium occidentale*, *Adenaria floribunda*, *Discophora aff. Guianensis*, *Sapium laurifolium*, *Inga espectabilis* (CLIRSEN, 2009).

Foto 4-4: Ceibo (Ceiba trischistandra)

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ecuador-_Manabi_-_Ceibo.JPG

Bosque Húmedo

En los bosques húmedos encontramos especies arbóleas altas que se caracterizan por superar los 30 metros. Entre las especies resaltantes tenemos los higuerones (*Ficus spp*), el palo de vaca (*Alseis peruviana*), el palo amarillo (*Centrolobium acroxylon*), el cedro (*Cedrela sp.*), el cetico (*Cecropia sp*), guayacán (*Tabebuia sp*), hualtaco (*Loxopterygium huasango*), pretino (*Cavanillesia platanifolia*), entre otras como el palo barrigón, la lúcuma, el ajo-ajo, el basayo, el palo balsa; así como varias especies de palmeras. Cabe indicar que los árboles más altos están cubiertos por epifitas (bromelias y orquídeas) y lianas.

4.5.2 Fauna

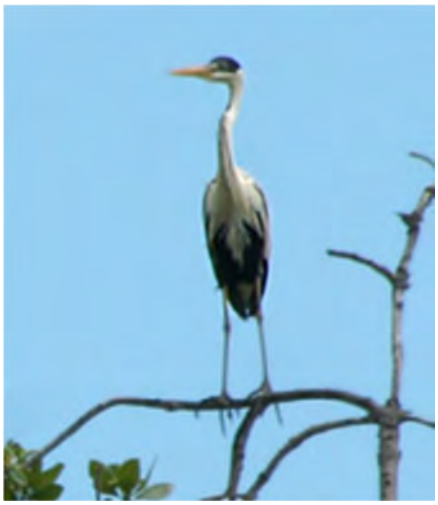
El área de estudio alberga especies terrestres, dulceacuícolas y marinos, siendo esta última de importancia económica para la región Tumbes. A continuación, detalles de la fauna más representativa en los manglares, bosque seco y bosque húmedo, zonas de vida identificadas en el área de estudio.

Manglares

Los manglares no cuentan con especies propias; sin embargo, alberga 33 especies de gasterópodos, 34 de crustáceos, 24 especies de pelecípodos y 39 especies de peces. Entre los crustáceos y moluscos destacan el cangrejo de manglar (*Ulcides accidentalis*) y los moluscos como: la concha negra (*Anadara tuberculosa*), concha huequera (*Anadara similis*), concha pata de burro (*Anadara grandis*), concha rayada (*Chione subrugosa*), concha lampa (*Atrina maura*) y el mejillón (*Mytella guyanensis*). Entre los peces destaca principalmente el bagre, robalo, periche, pez sapo brujo, lisa, barbudo, entre otros. El área también alberga cocodrilos (*Cocodrylus acutus*) y una especie terrestre considerada como rara, el perro conchero o cabeza de mate (*Proscyon contr ivorus*).

También encontramos en los manglares aves migratorias entre ellas a la garza cuca (*Ladea cocol*) (véase Foto 4-5), águila pescadora (*Sandión heliaectus*), fregata (*Fregata magnificens*), playero blanco (*Calidrys alba*), tordo (*Dives wa rszewiczi*), ibis blanco (*Eudocimus albus*), negro manglero (*Quiscallus mexicanus*) y el gavilán de mangle (*Buteogallussuvtilis*).

Foto 4-5: Garza Cuca



Fuente: https://www.go2peru.com/spa/guia_viajes/tumbes/foto_aves_manglar_1.htm#!prettyPhoto[gallery1]/4/ (Foto © J. Mazzotti)

Bosque Seco

Las aves son el grupo dominante en los bosques secos destacando la tortolita (*Columbina buckleyi*). También se tiene a especies como la pava aliblanca, chachalaca de cabeza rufa, picaflor de tumbes, estrellita de cola corta, loros (de frente roja), palomas (de vientre ocráceo, peruana blanca) y pericos (*pachaloro y macareño*). Entre los mamíferos se tiene al oso hormiguero, la ardilla de nuca blanca, ratón orejón gerbito, gato montés, venado de cola blanca y sajino. Dentro del grupo de reptiles se encuentra la iguana (*Iguana iguana*), lagartija (*Tropydurus peruvianus*) y el jergón (*Bothrops s*p).

Bosques Húmedos

Los bosques húmedos albergan 230 especies de vertebrados, 175 aves, 4 anfibios, 36 mamíferos y 6 reptiles especies. Entre ellos destacan el mono machín blanco (Cebus albifrons), mono coto (Alouatta palliata), los shihui u oso hormiguero mediano (*Tamandua tetradáctila*), el sajino (*Tayassu tajacu*), ardilla nuca blanca (*Céreus stramineus*), manco o hualilla (*Eir abarbara*); el armadillo de nueve bandas, el perezoso y el único conejo silvestre de América del Sur. Entre los carnívoros destacan el jaguar, otorongo (*Panthera onca*), el puma, el ocelote, el zorro de Sechura y el zorrino enano. Es también común encontrar el sajino, el venado colorado, el venado gris y el oso de anteojos o cañón de ucumares (ucumari es el nombre del oso en quechua).

Las investigaciones sobre aves en los bosques húmedos señalan que existen 389 especies, de los que destacan el loro cabeza roja (*Aratinga erythroptera*) y pericos macareños (*Brotogerys pyrrhopterus*).

Los bosques húmedos están declarados por la UNESCO como patrimonio de la humanidad porque forma parte de la Reserva de Biosfera del Noroeste y alberga especies en peligro de extinción (Solari, 2015).

4.5.3 Áreas Protegidas

El 25.13% del área de la cuenca del rio Zarumilla se encuentra bajo alguna categoría de manejo o de protección como estrategia para la sostenibilidad de los recursos naturales por su función ecosistémica y la previsión de servicios ambientales, principalmente relacionados a los recursos hídricos. En la Tabla 4-13 se muestra los detalles de las tres áreas protegidas identificadas en y alrededor del área de estudio.

Tabla 4-13: Áreas Naturales Protegidas

N°	País	Perú	Superficie Total (ha)	Fecha de Creación
1	Ecuador	Reserva Ecológica Arenillas	2721.35	07/06/2001
2	Perú	Parque Nacional Cerros de Amotape	14626.19	22/07/1975
3		Área de Conservación Regional Angostura Faical	4639.51	18/03/2011
Total			**21987.05**	

Fuente: Ministerio del Ambiente del Ecuador 2017; Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), Ministerio del Ambiente de Perú. 2017; Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP).

Dos de las tres áreas protegidas se encuentran en territorio peruano, especialmente en la parte alta de la cuenca hidrográfica Zarumilla, tal como se puede observar en la Figura 4-11.

A continuación, se describe brevemente cada una de las áreas protegidas ubicadas en el área de estudio.

4.5.3.1 Reserva Ecológica Arenillas (REA)

La Reserva Ecológica Arenillas se encuentra reconocida por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) e integra por los subsistemas: Patrimonio de Áreas Naturales del Estado (PANE), Áreas protegidas de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADS), Áreas protegidas comunitarias y Áreas protegidas privadas. Su reconocimiento tiene como objetivo conservar la diversidad biológica y los recursos genéticos contenidos en el SANP, brindar alternativas de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y la protección de bienes y servicios ambientales, así como; contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población.

Es la única área protegida dentro del territorio ecuatoriano. Tiene una extensión de 13170.025 ha, de las cuales 2721.35 ha se encuentra en la cuenca Zarumilla. Cuenta con dos ecosistemas, Bosque bajo y arbustal deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo (BdTc02) y el Bosque Deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo (BdTc01). (Ambiente, 2014). Sitio importante para contener especies claves, es decir; amenazadas, de distribución restringida y endémicas; especialmente aves terrestres y mamíferos. Registra 159 especies de fauna, 79 especias de ave, 26 especies de mamíferos, 29 especies de herpetofauna, 12 especies de ictiofauna y 23 especies de macroinvertebrados (véase Foto 4-6).

Foto 4-6: Fauna en Reserva Ecológica Arenilla

Fuente:https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fimage.slidesharecdn.com%2Freservae-arenillas-120521130646-phpapp02%2F95%2Freserva-e-arenillas-

La reserva se encuentra amenazada por litigios de tenencia de tierra, invasiones del área de la reserva ecológica; extracción de especies forestales; incremento de las presiones debido a actividades agrícolas y acuícolas; fenómenos naturales; inducción de especies, contaminación del agua, incendios forestales, tala de bosques y ladrilleras. (Ambiente, 2014).

Figura 4-11: Áreas Protegidas

4.5.3.2 Parque Nacional Cerros de Amotape

El Parque Nacional Cerros de Amotape fue creado en el año 1975 como área protegida del norte del Perú y declarada como núcleo de la Reserva de Biosfera del Noroeste, el 1 de marzo de 1977. Tiene una extensión de 151767.49 ha de las cuales el 9.64% se encuentran dentro de la cuenca del Zarumilla, es decir 14626.19 ha.

Tiene la categoría de Parque Nacional debido a que contiene varios ecosistemas (véase Foto 4-7), diversidad biológica relevante, procesos sucesivos, ecológicos y evolutivo; además, de ser estética y tener un paisaje relevante. Todo ello es de uso indirecto como investigación, educación, turismo y recreación (Consorcio UTPL-ADEPLAN, 2018).

El Parque Nacional Cerros de Amotape es reconocida como un área importante para la conservación de aves o IBA (Important Bird Area) (Código P001), también registra alrededor de 400 especies, de las cuales 50 son endémicas, 4 especies catalogadas en peligro de extinción (EN), 10 vulnerables (VU) y 2 casi amenazadas (NT). Cuenta con Plan Maestro aprobado por SERNANP (Tabla 4-14).

Tabla 4-14: Especies Representativas de Avifauna del PN Cerros de Amotape

N°	Especie	Nombre Común	Familia	Estado de Amenaza
1	*Leucopternis occidentalis*	Gavilán dorsigris	Accipitridae	EN (En peligro)
2	*Brotogeris pyrrhopterus*	Periquito macareño	Psittacidae	EN (En peligro)
3	*Synallaxis tithys*	Colaespina abecinegruzca	Furnariidae	EN (En peligro)
4	*Pachyramphus spodiurus*	Cabezón pizarroso	Tityridae	EN (En peligro)
5	*Alouatta palliata*	Mono aullador	Atelidae	LC (Preocupación menor)
6	*Lontra longicaudis*	Nutria, Perro de agua	Mustelidae	Datos insuficientes
7	*Panthera onca*	Jaguar	Felidae	NT (Casi amenazado)
8	*Leopardus pardalis*	Tigrillo	Felidae	LC (Preocupación menor)

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

Foto 4-7: Vista de PN Cerros de Amotape

Fuente: https://www.landscare.org/paraje/parque-nacional-cerros-amotape; https://walac.pe/cerros-de-amotape-donde-los-bosques-se-unen-al-mar/

Tiene como principal amenaza por ambos territorios (peruano y ecuatoriano) las actividades como la ganadería, la caza psitácida y la tala. A ello se le suma la falta de conocimiento de la población sobre los servicios ambientales, importancia de la diversidad biológica que posee, así como las fuentes de agua y turismo.

4.5.3.3 Área de Conservación Regional Angostura Faical

Mediante D.S N° 006-2011 se aprueba el Área de Conservación Angostura Faical, con el objetivo de incrementar la superficie de Bosque Seco Ecuatorial, actualmente protegido por el Parque Nacional Cerros de Amotape, garantizando de esta forma el uso de los recursos de flora y fauna por las poblaciones locales bajo prácticas sostenibles (SERNANP, 2013).

El área de conservación se ubica en los distritos de Pampas de Hospital y San Juan de la Virgen de la provincia de Tumbes y en el distrito de Matapalo, de la provincia de Zarumilla; del departamento de Tumbes. Cuenta con una extensión de 8794.50 ha, de la cual el 5.3% (4639.51 ha) se encuentran en la cuenca Zarumilla.

Cuenta con ecosistemas como el Bosque seco de colinas altas (Bsca) y principalmente con el Bosque seco de colinas bajas (Bscb), véase Foto 4-8.

Alberga aproximadamente 130 especies de flora, destacando el hualtaco, el palo santo y el guayacán. Así mismo, estudios científicos han encontrado cerca de 375 árboles.

Foto 4-8: Área de Conservación Regional Angostura Faical

Fuente: http://ficha.sigmincetur.mincetur.gob.pe/index.aspx?cod_Ficha=7510

4.6 CLIMATOLOGÍA

4.6.1 Variables Climáticas

4.6.1.1 Precipitación

El área de estudio se ubica entre la intercuenca 13951 y Zarumilla, perteneciente a la región hidrográfica del Pacifico, la caracterización climatológica hará uso de la siguiente información:

- Registros de estaciones meteorológicas climáticas y pluviométricas a cargo del SENAMHI.
- Información de precipitación entre los años 1998 y 2017 del Satélite de Investigación TRMM (The Tropical Rainfall Measuring Mission), administrada en misión conjunta por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos – (NASA, por sus siglas en Ingles) y la Agencia Aeroespacial de Japón.
- Información de precipitación GPM Imerg diaria desde 1/1/2001 hasta 31/12/2018 de la red de satélites GPM (Global Precipitation Measurement), administrada en misión conjunta por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos – (NASA, por sus siglas en Ingles) y la Agencia Aeroespacial de Japón, con resolución espacial de 0.1°.
- Mapa topográfico a resolución de 30 m de ASTGTM (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) y Global Digital Elevation Model (GDEM) of NASA y Japan's Ministry of Economy.

Para la caracterización se emplearon los registros pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador y al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Perú, para la caracterización climática cuyos parámetros, periodo de registro y fuente de la información están considerados en el Anexo I-B. Los nombres y ubicación de las estaciones, y periodos de registro se muestran en la Tabla 4-15 y Tabla 4-16.

Tabla 4-15: Ubicación de Estaciones Pluviométricas Alrededor del Área de Estudio

Estación	País	Coordenadas Geográficas		Elevación (msnm)
		Longitud (grados)	Latitud (grados)	
Arenillas	Ecuador	-80.06	-3.54	26
La Cuca	Ecuador	-80.08	-3.50	32
Palmales	Perú	-80.10	-3.67	120
Quebrada Seca	Ecuador	-80.18	-3.67	80
Chahuarhuaico	Ecuador	-80.31	-4.02	290
El Limo	Ecuador	-80.13	-3.99	1156
Puyango	Ecuador	-80.08	3.90	305
Cabo Inga	Perú	-80.40	-3.98	237
Matapalo	Perú	-80.20	-3.68	118
Papayal	Perú	-80.23	-3.57	50
Rica Playa	Perú	-80.51	-3.81	61

Tabla 4-16: Periodos de información de Estaciones Pluviométricas alrededor del Área de Estudio

Del documento“ Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Río Zarumilla” (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018) , se obtuvieron los promedios mensuales, los cuales son coherentes con los análisis preliminares de información de precipitación de las estaciones alrededor del área de estudio, cuyos valores se muestran en la Tabla 4-17.

La Figura 4-12 presenta la ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas en la caracterización de las variables climáticas.

Tabla 4-17: Precipitación (mm) Promedio Mensual de las Estaciones de SENAMHI e INAMHI en el Área de Estudio

Estación	Precipitación Media Mensual (mm)												Media Anual (mm)
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Arenillas	97.3	156.3	151.7	105.7	39.7	19.7	11.4	8.3	11.7	13.9	12.6	36.6	663.3
La Cuca	68.8	98.6	98.3	75.3	31.1	12.5	6.1	1.9	3.3	5.1	5.6	22.0	413.3
Palmales	111.7	195.1	169.3	111.6	44.3	18.7	6.6	3.2	7.4	9.1	10.9	50.1	712.6
Quebrada Seca	93.0	146.8	126.0	87.5	44.2	14.2	4.0	3.2	4.3	6.0	6.3	32.3	548.7
Chahuarhuaico	153.0	255.3	273.2	197.0	82.3	22.5	6.0	2.0	4.5	10.1	12.7	59.7	1039.4
El Limo	284.5	447.8	411.7	338.8	118.8	43.1	13.9	4.1	8.3	24.3	43.2	105.5	1780.0
Puyango	139.0	216.0	238.2	173.5	46.3	13.9	5.3	1.4	6.9	15.6	26.3	56.1	905.5
Cabo Inga	130.3	245.7	226.3	200.3	88.1	20.0	3.0	0.2	3.0	3.9	7.6	36.8	940.9
Matapalo	143.6	215.6	168.3	119.0	74.6	15.6	5.0	3.2	2.0	6.7	8.9	38.7	779.4
Papayal	76.2	141.2	126.9	90.5	43.8	8.2	1.8	0.3	1.0	2.0	7.5	27.5	512.9
Rica Playa	98.4	180.2	163.3	113.6	61.3	11.2	1.6	0.2	1.6	1.7	4.7	28.6	639.3

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

Figura 4-12: Estaciones Meteorológicas

4.6.1.2 Temperatura

La Tabla 4-1, en el ítem 4.1.2, presentó los metadatos de la información obtenida de la NASA para las 4 estaciones climática usadas para la caracterización climática.

La ubicación geoespacial de las estaciones climáticas se puede observar en la Figura 4-13, como también el registro de clima de cada estación climática se presenta en el Anexo I-A.

En el área de estudio la temperatura promedio mensual alcanza los 24.3 °C, variando hasta una temperatura mínima de 15.4 °C y una temperatura máxima de 31.6 °C. Esto valores se obtuvieron del análisis de los datos que se muestran en las Tablas 4-18 a 4-21 y los Gráficos 4-8 a 4-11.

Tabla 4-18: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 1

Temperatura / Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.	Mín.	Máx.
Temperatura Máxima	26.7	26.1	26.2	26.8	27.4	27.7	28.1	29.0	29.2	28.2	27.7	27.3	27.5	26.1	29.2
Temperatura Mínima	17.0	17.4	17.4	17.2	16.7	15.9	15.4	15.4	15.8	16.2	16.2	16.7	16.5	15.4	17.4
Temperatura Promedio	21.0	20.9	21.0	21.1	21.1	20.8	20.8	21.2	21.5	21.2	21.0	21.1	21.1	20.8	21.5

Fuente: NASA

Gráfico 4-8: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 1

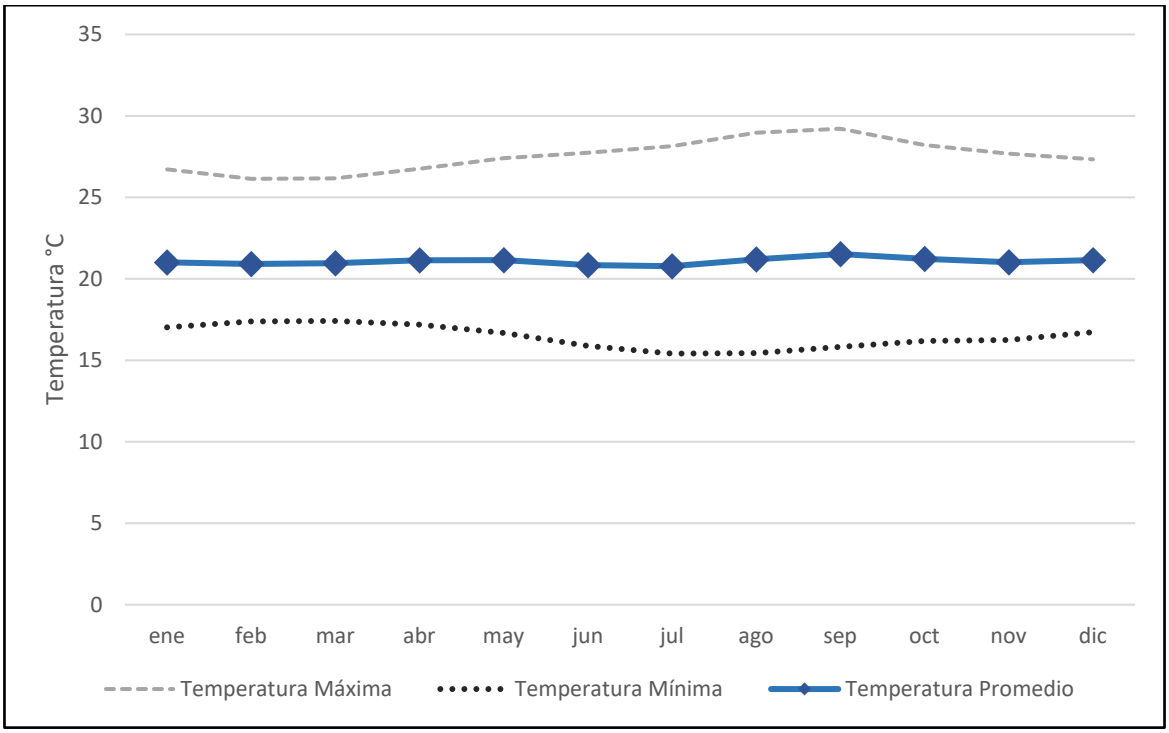


Figura 4-13: Estaciones Climáticas

Tabla 4-19: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 2

Temperatura / Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.	Mín.	Máx.
Temperatura Máxima	29.6	29.1	29.2	29.9	30.7	31.1	31.3	31.6	31.3	30.4	29.9	30.0	30.3	29.1	31.6
Temperatura Mínima	20.9	21.3	21.3	21.0	20.5	19.5	18.9	18.7	19.1	19.4	19.6	20.4	20.0	18.7	21.3
Temperatura Promedio	24.4	24.4	24.5	24.6	24.7	24.3	24.0	24.1	24.2	24.0	23.9	24.3	24.3	23.9	24.7

Fuente: NASA

Gráfico 4-9: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 2

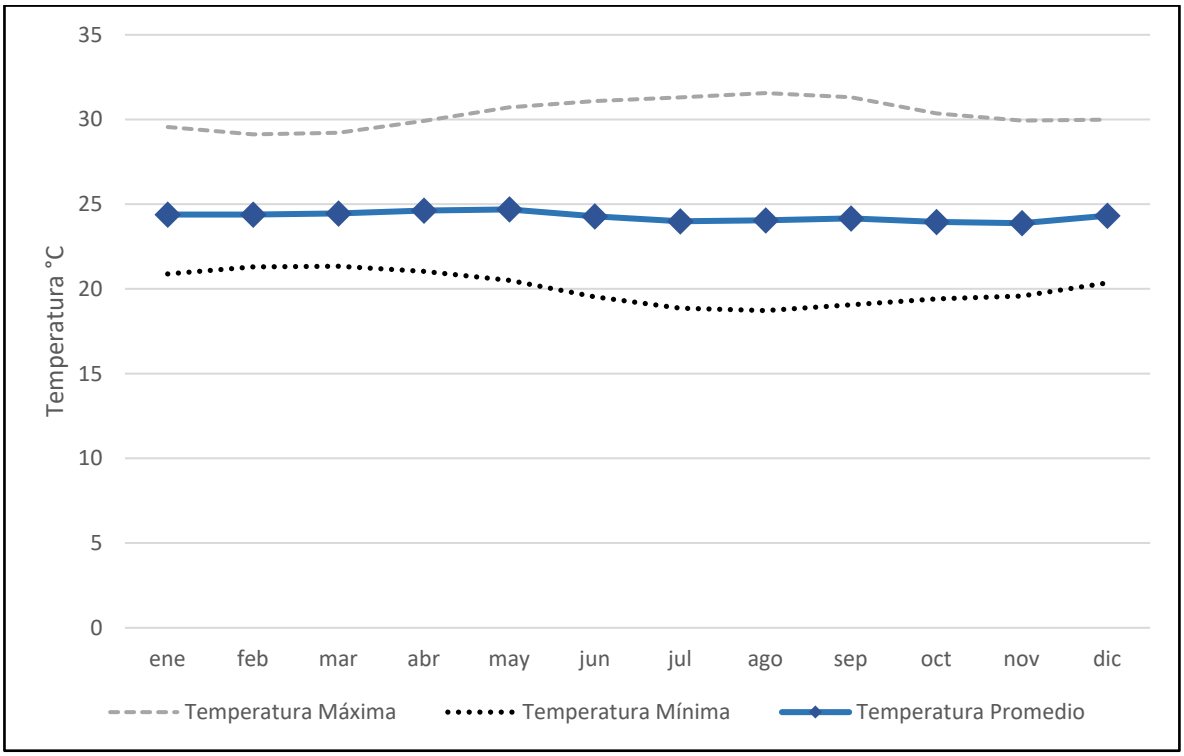


Tabla 4-20: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 3

Temperatura/ Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.	Mín.	Máx.
Temperatura Máxima	26.7	26.1	26.2	26.8	27.4	27.7	28.1	29.0	29.2	28.2	27.7	27.3	27.5	26.1	29.2
Temperatura Mínima	17.0	17.4	17.4	17.2	16.7	15.9	15.4	15.4	15.8	16.2	16.2	16.7	16.5	15.4	17.4
Temperatura Promedio	21.0	20.9	21.0	21.1	21.1	20.8	20.8	21.2	21.5	21.2	21.0	21.1	21.1	20.8	21.5

Fuente: NASA

Gráfico 4-10: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 3

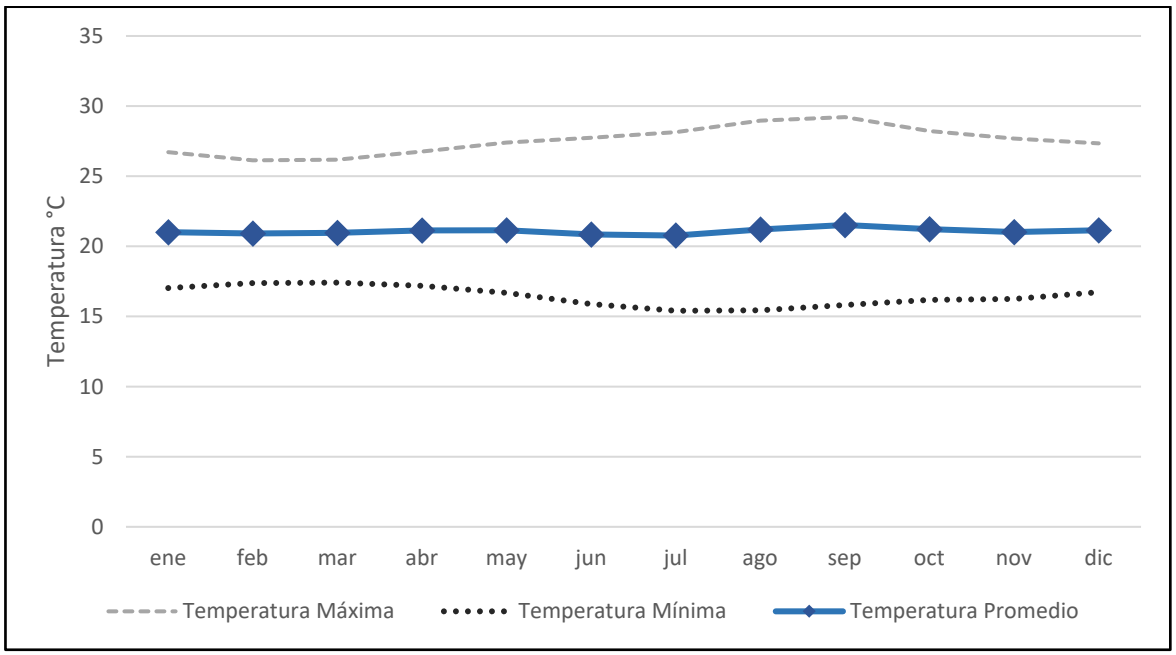
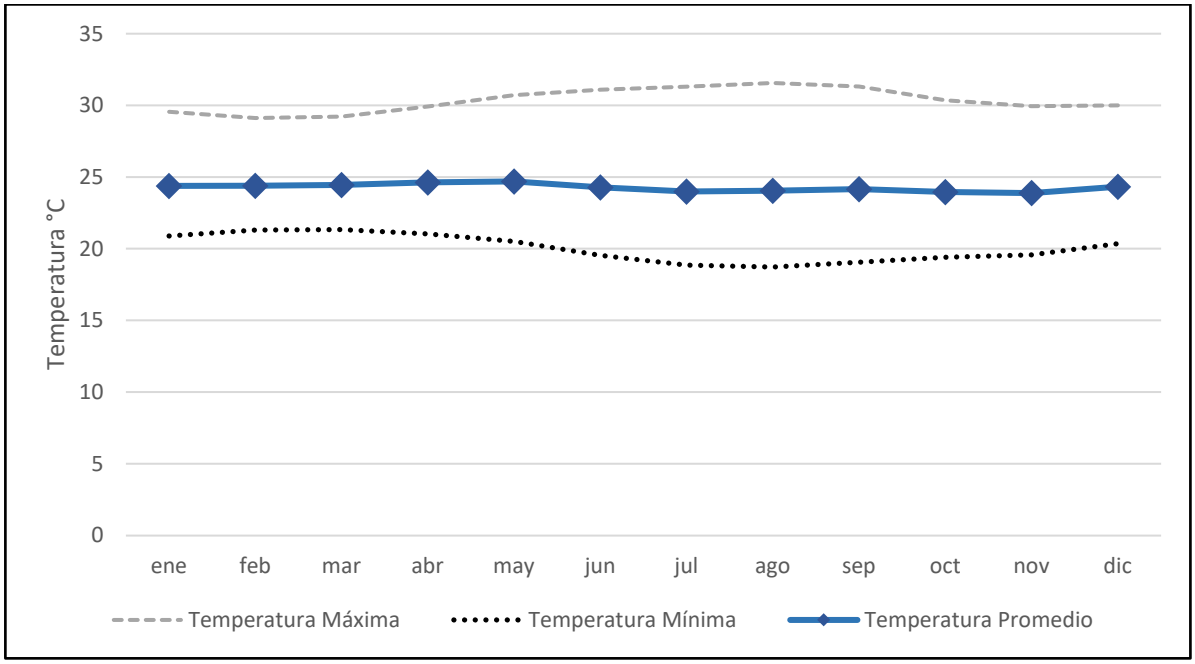


Tabla 4-21: Temperatura (°C) Promedio Mensual Periodo 1984-2018 de la Estación Climática 4

Temperatura/ Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.	Mín.	Máx.
Temperatura Máxima	29.6	29.1	29.2	29.9	30.7	31.1	31.3	31.6	31.3	30.4	29.9	30.0	30.3	29.1	31.6
Temperatura Mínima	20.9	21.3	21.3	21.0	20.5	19.5	18.9	18.7	19.1	19.4	19.6	20.4	20.0	18.7	21.3
Temperatura Promedio	24.4	24.4	24.5	24.6	24.7	24.3	24.0	24.1	24.2	24.0	23.9	24.3	24.3	23.9	24.7

Fuente: NASA

Gráfico 4-11: Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Mensual de la Estación Climática 4



Mapa de Isotermas

Del documento "Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Río Zarumilla (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018), se obtuvieron los promedios anuales de temperatura y altitud correspondientes, cuyos valores se muestran en la Tabla 4-22.

Tabla 4-22: Promedio Anual de Temperatura versus Altitud de las Estaciones Alrededor del Área de Estudio

Estación	Temperatura Promedio Anual (ºC)	Altitud (msnm)
CIA Tumpis	25.20	18.00
Arenillas	23.70	26.00
La Cuca	25.40	32.00
Papayal L	25.90	50.00
Rica Playa	27.00	61.00
Cabo Inga	26.90	237.00
Marcabeli	24.40	520.00

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

En base a la temperatura anual vs. la altitud, cuyos datos se muestran en la Tabla 4-22, se ha realizado una interpolación de tipo *spline*, para obtener una distribución de la temperatura y con ello las isotermas, las cuales se muestran en la Figura 4-14.

Figura 4-14: Mapa de la Distribución Espacial de la Temperatura en el Área de Estudio

4.6.1.3 Radiación Solar

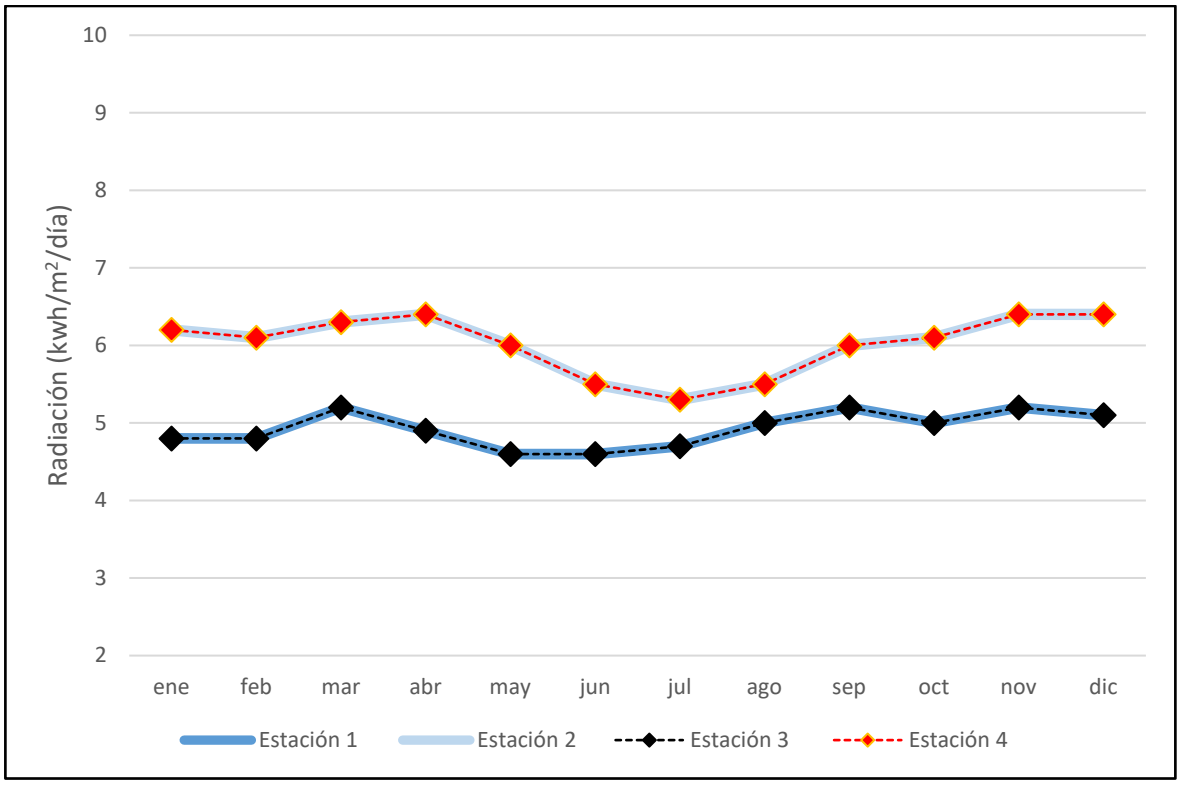
Los datos de la radiación promedio mensual en las 4 estaciones, alcanzan valores promedio anuales entre 4.9 y 6.0 kwh/m^2/día. Un mínimo de 4.6 y 5.3 kmh/m^2/día, y un máximo de 5.2 y 6.4 kwh/m^2/día. Estos valores se muestran en la Tabla 4-23 y en el Gráfico 4-12.

Tabla 4-23: Radiación Solar (kwh/m^2/día) Promedio Mensual Periodo 1984-2017

Radiación Solar/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom	Mín	Máx
Estación 1	4.8	4.8	5.2	4.9	4.6	4.6	4.7	5	5.2	5	5.2	5.1	4.9	4.6	5.2
Estación 2	6.2	6.1	6.3	6.4	6	5.5	5.3	5.5	6	6.1	6.4	6.4	6.0	5.3	6.4
Estación 3	4.8	4.8	5.2	4.9	4.6	4.6	4.7	5	5.2	5	5.2	5.1	4.9	4.6	5.2
Estación 4	6.2	6.1	6.3	6.4	6	5.5	5.3	5.5	6	6.1	6.4	6.4	6.0	5.3	6.4

Fuente: NASA

Gráfico 4-12: Radiación Promedio Mensual de las Estaciones Climáticas del Área de Estudio



4.6.1.4 Humedad Relativa

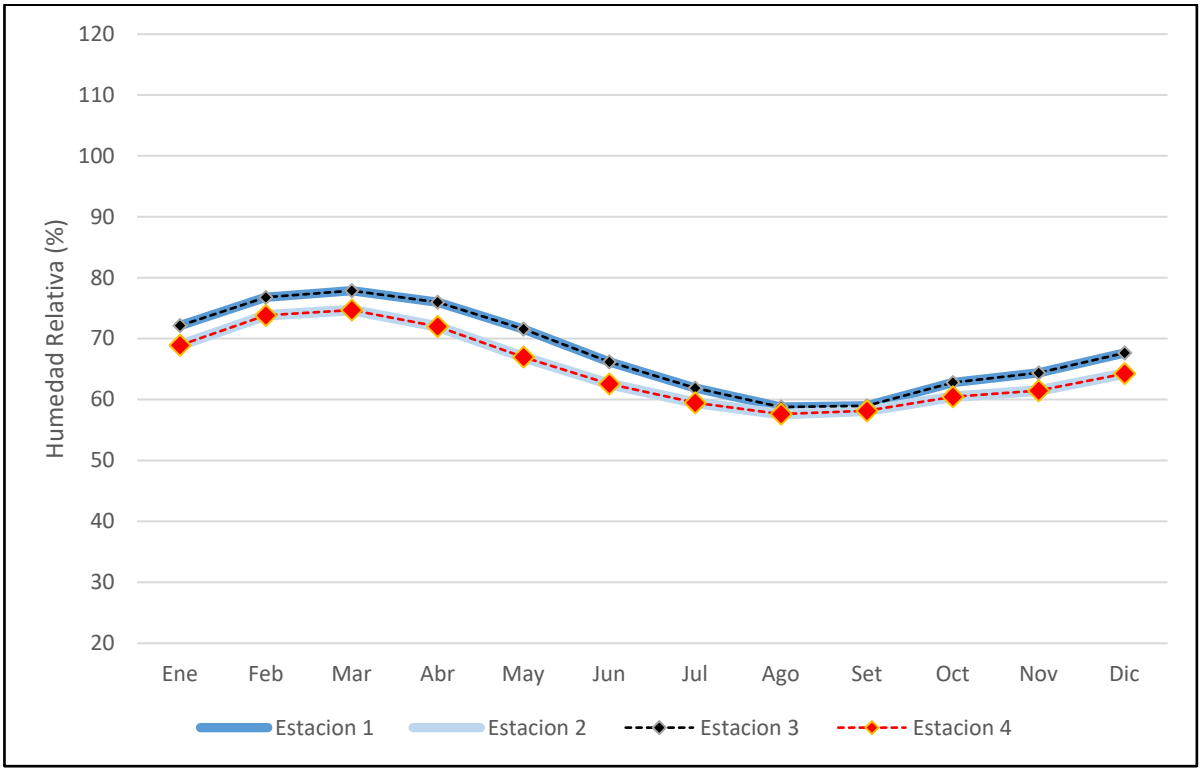
Los datos de humedad relativa de las 4 estaciones climáticas alcanzan valores promedio anuales entre y 65.1% y 67.9, con un mínimo entre 57.5% y 58.9% y un máximo entre 74.7% y 77.9%. Estos valores se muestran en la Tabla 4-24 y en el Gráfico 4-13.

Tabla 4-24: Humedad Relativa (%) Promedio Mensual Periodo 1984-2018

Humedad Relativa/ Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom	Mín	Máx
Estación 1	72.1	76.7	77.9	76.0	71.6	66.3	61.9	58.9	59.1	62.8	64.3	67.6	67.9	58.9	77.9
Estación 2	68.9	73.7	74.7	72.0	67.0	62.7	59.5	57.7	58.2	60.5	61.4	64.2	65.1	57.7	74.7
Estación 3	72.1	76.7	77.9	76.0	71.6	66.3	61.9	58.9	59.1	62.8	64.3	67.6	67.9	58.9	77.9
Estación 4	68.9	73.7	74.7	72.0	67.0	62.7	59.5	57.7	58.2	60.5	61.4	64.2	65.1	57.7	74.7

Fuente: NASA

Gráfico 4-13: Humedad Relativa Promedio Mensual de las Estaciones Climáticas del Área de Estudio



4.6.1.5 Velocidad y Dirección del Viento

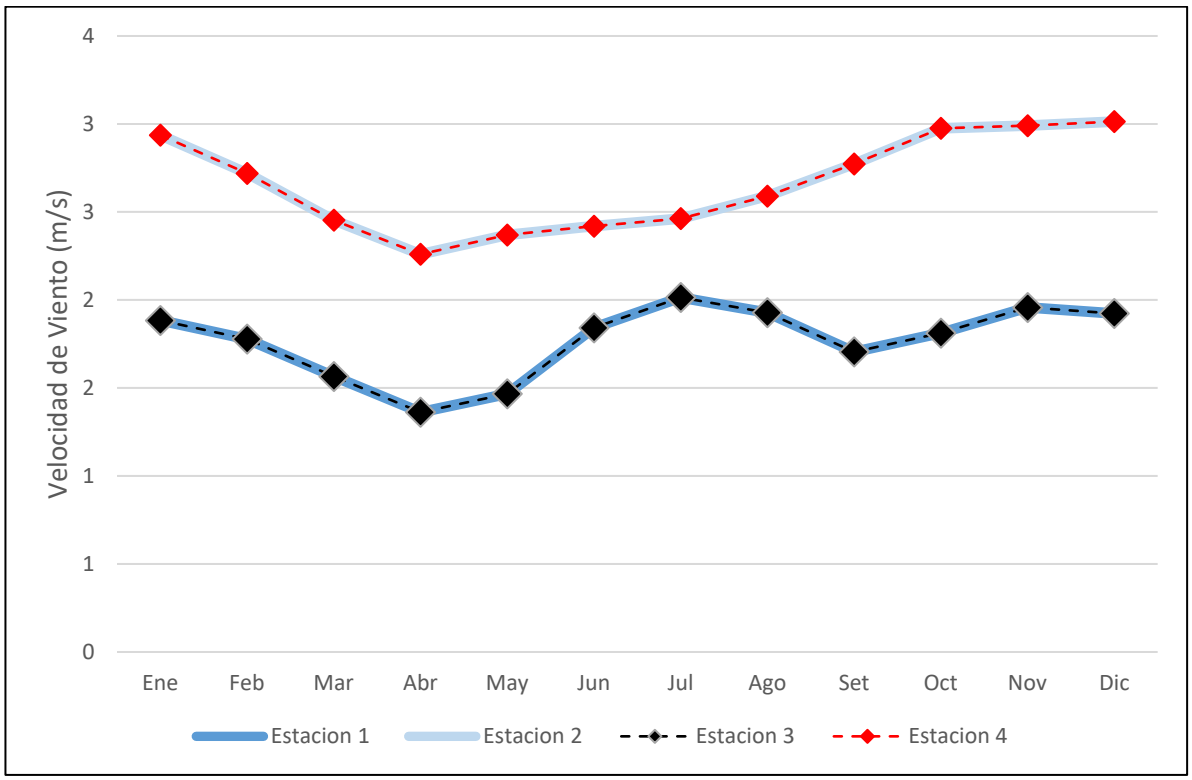
Los datos de velocidad promedio anual de las 4 estaciones climáticas se dan entre 1.8 m/s y 2.7 m/s, un promedio anual mínimo entre 1.4 m/s y 2.3 m/s, y un promedio de los máximos entre 2.0 m/s y 3.0 m/s. Estos valores se muestran en la Tabla 4-25 y el Gráfico 4-14.

Tabla 4-25: Velocidad del Viento (m/s) Promedio Mensual periodo 1979-2014

Velocidad de Viento/Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom	Mín	Máx
Estación 1	1.9	1.8	1.6	1.4	1.5	1.8	2.0	1.9	1.7	1.8	2.0	1.9	1.8	1.4	2.0
Estación 2	2.9	2.7	2.5	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0	3.0	3.0	2.7	2.3	3.0
Estación 3	1.9	1.8	1.6	1.4	1.5	1.8	2.0	1.9	1.7	1.8	2.0	1.9	1.8	1.4	2.0
Estación 4	2.9	2.7	2.5	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0	3.0	3.0	2.7	2.3	3.0

Fuente: NCEP (The National Centers for Environmental Prediction)

Gráfico 4-14: Velocidad del Viento Promedio Mensual en Estaciones Alrededor del Área de Estudio

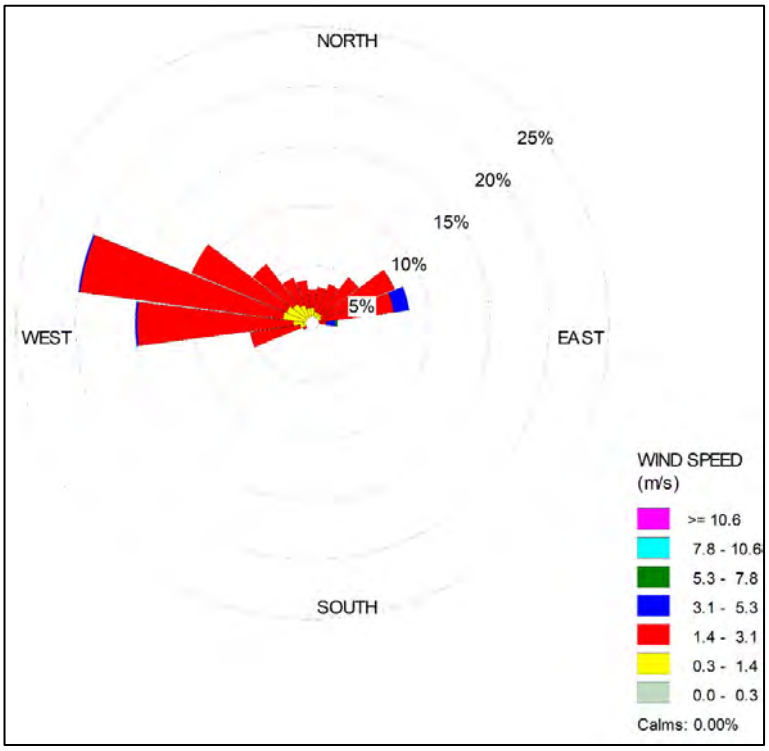


Igualmente se muestra la dirección de viento en las estaciones 1 y 2 a través del Gráfico 4-15 y Gráfico 4-16, respectivamente.

El análisis de la variación de velocidad y dirección de los vientos se ha realizado considerando la información meteorológica del registro diario de las 4 estaciones climáticas, cuyos datos se presentan en el Anexo I-A, incluyendo el consolidado de frecuencias porcentuales de velocidad y dirección del viento para las estaciones climáticas 1 y 2.

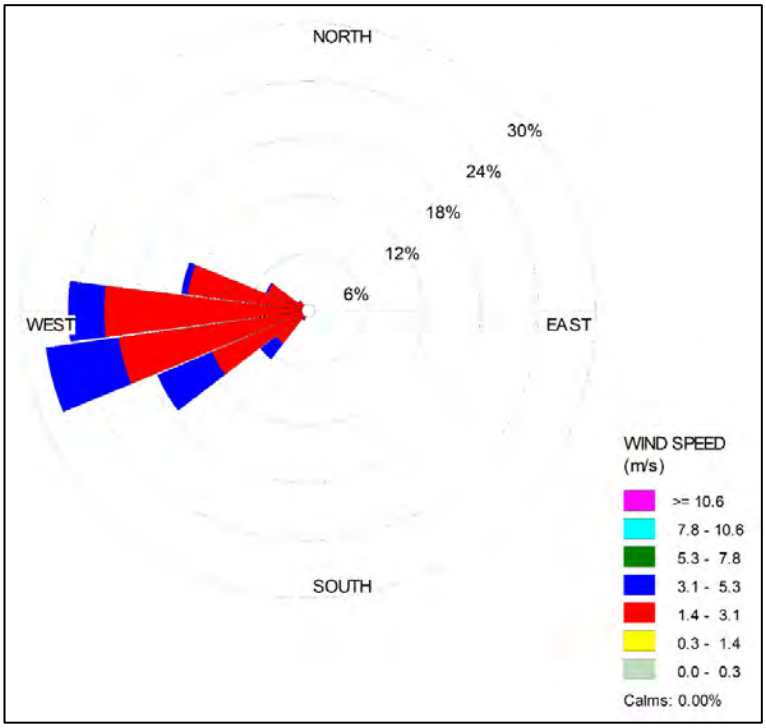
En la estación 1 los vientos dominantes soplan del sector noreste (NE), con una frecuencia del 3.7%, del sector Sureste (SE) con una frecuencia del 0.1%, del sector Norte Noreste (NNE) con una frecuencia del 3.2% y desde el sector Norte con una frecuencia del 2.9% con una velocidad media de 1.77 m/s. En la estación 2 los vientos dominantes soplan del sector noreste (NE), con una frecuencia del 0.1%, del sector Sureste (SE) con una frecuencia del 0.1%, del sector Norte Noreste (NNE) con una frecuencia del 0.1% y desde el sector Norte con una frecuencia del 0.1% con una velocidad media de 2.66 m/s.

Gráfico 4-15: Rosa de Viento de la Estación Climática 1



Fuente: Nasa

Gráfico 4-16: Rosa de Viento de la Estación Climática 2



Fuente: Nasa

4.6.2 Clasificación Climática

La clasificación climática según el método de Thornthwaite para Perú e INAMHI de Ministerio de Energía y Minas de Ecuador para el área de estudio, se muestra en la Figura 4-15.

Figura 4-15: Mapa de Zonas Climáticas

4.7 PLUVIOMETRÍA

4.7.1 Red de Estaciones Pluviométricas

La red de pluviometría se muestra en la Tabla 4-26, información que se tomará como referencia para la caracterización climática. En el Anexo I-B se presentan los datos de precipitación de las estaciones en y alrededor del área de estudio consideradas.

Tabla 4-26: Precipitación (mm) Promedio Mensual de Estaciones de SENAMHI y INAMHI en el Área de Estudio

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media Anual
Arenillas	97.3	156.3	151.7	105.7	39.7	19.7	11.4	8.3	11.7	13.9	12.6	36.6	663.3
La Cuca	68.8	98.6	98.3	75.3	31.1	12.5	6.1	1.9	3.3	5.1	5.6	22.0	413.3
Palmales	111.7	195.1	169.3	111.6	44.3	18.7	6.6	3.2	7.4	9.1	10.9	50.1	712.6
Quebrada Seca	93.0	146.8	126.0	87.5	44.2	14.2	4.0	3.2	4.3	6.0	6.3	32.3	548.7
Chahuarhuaico	153.0	255.3	273.2	197.0	82.3	22.5	6.0	2.0	4.5	10.1	12.7	59.7	1039.4
El Limo	284.5	447.8	411.7	338.8	118.8	43.1	13.9	4.1	8.3	24.3	43.2	105.5	1780.0
Puyango	139.0	216.0	238.2	173.5	46.3	13.9	5.3	1.4	6.9	15.6	26.3	56.1	905.5
Cabo Inga	130.3	245.7	226.3	200.3	88.1	20.0	3.0	0.2	3.0	3.9	7.6	36.8	940.9
Matapalo	143.6	215.6	168.3	119.0	74.6	15.6	5.0	3.2	2.0	6.7	8.9	38.7	779.4
Papayal	76.2	141.2	126.9	90.5	43.8	8.2	1.8	0.3	1.0	2.0	7.5	27.5	512.9
Rica Playa	98.4	180.2	163.3	113.6	61.3	11.2	1.6	0.2	1.6	1.7	4.7	28.6	639.3

4.7.1.1 Análisis Espacial – temporal del Comportamiento de la Precipitación en la Cuenca y Análisis de Estaciones Priorizadas para el Estudio

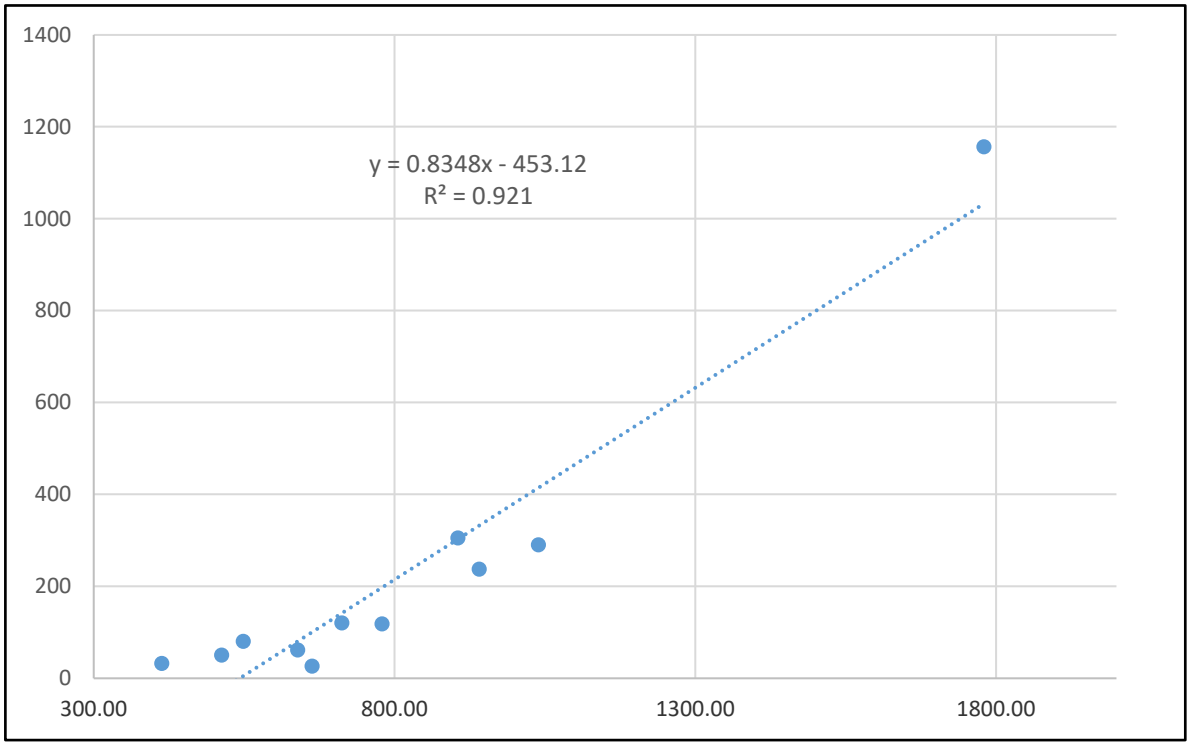
En base a la precipitación de las estaciones mostradas en la Tabla 4-26 con respecto a la altitud se presentan los datos incluidos en la Tabla 4-27.

Tabla 4-27: Precipitación Promedio Mensual (mm) de las Estaciones Pluviométricas versus Altitud

Estación	Precipitación Promedio Anual (mm/año)	Elevación (msnm)
Arenillas	663.30	26.00
La Cuca	413.30	32.00
Palmales	712.60	120.00
Quebrada Seca	548.70	80.00
Chahuarhuaico	1039.40	290.00
El Limo	1780.00	1156.00
Puyango	905.50	305.00
Cabo Inga	940.90	237.00
Matapalo	779.40	118.00
Papayal	512.90	50.00
Rica Playa	639.30	61.00

Basado en los datos de precipitación promedio anual y altitud para cada estación, mostrados en la Tabla 4-27, se ha calculado el coeficiente de determinación, R2 = 0.921 (véase Gráfico 4-17), observando que es cercano a 1, lo cual nos indica que existe una correspondencia fuerte entre la altitud y la precipitación promedio anual para las estaciones pluviométricas.

Gráfico 4-17: Regresión Lineal entre Altitud y Promedio Anual de Precipitación de las estaciones Pluviométricas



Para obtener la distribución espacial de la precipitación se aplicó el concepto de interpolación *spline* que nos permitirá la distribución semicontinua de la precipitación a lo largo de las subcuencas en el área de estudio cuyo resultado se muestra en la Figura 4-16.

Figura 4-16: Mapa de Distribución Espacial de la Precipitación

4.7.1.2 Complementación y Extensión de la Información Pluviométrica Mensual

Debido a distintos y en algunos casos cortos periodos de información, que no permiten un registro continuo de información de precipitación para todas las estaciones, según se observa en la Tabla 4-16, es conveniente usar las estaciones grilladas de información de precipitación satelital GPM Imerg, que brindará información diaria continua en el mismo periodo para todas las estaciones desde 1/1/2001 hasta 31/12/2018 de la red de satélites GPM (*Global Precipitation Measurement*), el cual al realizar la corrección del sesgo por el promedio al producto IMERG, se obtiene la información de precipitación del GPM, la cual se muestra en la Tabla 4-28**.**

Tabla 4-28: Precipitación Promedio Mensual (mm) de las Estaciones Grilladas GPM en el Área de Estudio

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media Anual
Arenillas_GPM	86.3	145.4	189.6	105.2	38.0	17.6	6.6	5.4	10.3	15.8	16.6	28.2	664.9
La Cuca_GPM	56.2	95.0	122.7	66.0	26.3	10.9	4.2	3.1	5.9	9.9	10.9	17.5	428.6
Palmales_GPM	94.5	172.0	222.5	115.8	40.6	16.5	6.3	3.5	7.9	15.3	15.7	27.4	738.0
Quebrada Seca_GPM	72.7	132.4	171.2	89.1	31.2	12.7	4.8	2.7	6.1	11.8	12.1	21.1	567.8
Chahuarhuaico GPM	105.3	244.4	403.6	173.7	42.2	17.9	9.6	4.5	8.6	17.9	19.7	30.8	1078.3
El Limo_GPM	199.5	399.3	604.2	296.8	95.2	40.2	16.9	11.8	19.4	42.5	45.3	72.8	1843.9
Puyango_GPM	100.1	200.4	292.1	145.1	51.9	22.4	12.8	7.4	11.5	23.7	26.5	44.6	938.5
Cabo Inga_GPM	106.2	228.2	363.1	156.9	39.3	13.0	6.1	2.7	4.5	11.4	11.9	21.5	965.0
Matapalo_GPM	98.9	193.7	252.7	128.8	39.6	15.8	7.3	3.6	7.8	14.4	15.3	25.0	803.0
Papayal_GPM	66.2	126.4	164.1	83.1	26.7	11.0	4.7	2.3	5.7	10.6	10.3	17.1	528.0
Rica Playa_GPM	80.4	163.2	254.6	105.9	21.2	6.5	3.1	1.9	2.6	6.9	6.4	14.5	667.0

Antes de usar estas estaciones, se calcula la bondad del ajuste o fiabilidad del modelo de estaciones GPM con respecto a las estaciones del SENAMHI e INAMHI.

4.7.1.3 Validación de las Estaciones de SENAMHI e INAMHI versus las Estaciones del Producto GPM

Para validar la estación SENAMHI e INAMHI vs. GPM, se utilizaron métodos estadísticos aplicados a datos hidrogeológicos, esto es para hallar la precisión de los modelos simulados (datos de la estación GPM) versus los observados (datos de la estación SENAMHI e INAMHI), usando los siguientes 6 índices:

- r (Coeficiente de correlación),
- R^2 (Coeficiente de determinación),
- d (Índice de concordancia),
- NSE (Eficiencia de Nash-Sutcliffe),
- RSR (La proporción entre la raíz del error cuadrático medio y desviación estándar de los datos medidos) y

- PBIAS (Porcentaje de Bias).

Los cálculos de estos índices fueron realizados utilizando un programa diseñado en Lenguaje R, el cual es un entorno de programación con un enfoque al análisis estadístico, versión 3.3.3.

Los resultados del cálculo de los índices estadísticos se muestran en la Tabla 4-29.

Tabla 4-29: Resumen de los Indicadores Estadísticos para la Comparación de las Series de Tiempo Promedio Mensuales de las Estaciones SENAMHI e INAMHI vs. GPM

Estaciones	r	R2	NSE	RSR	d	PBIAS
Arenillas	0.98	0.96	0.95	0.22	0.99	0
	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
La Cuca	0.97	0.95	0.94	0.23	0.99	0
	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Palmales	0.96	0.93	0.92	0.28	0.98	0
	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Quebrada Seca	0.96	0.91	0.9	0.3	0.98	0
	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Chahuarhuaico	0.94	0.88	0.81	0.42	0.96	0
	Muy Bueno	Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
El Limo	0.93	0.87	0.84	0.39	0.96	0
	Muy Bueno	Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Pte. Puyango	0.97	0.93	0.93	0.25	0.98	0
	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Cabo Inga	0.92	0.84	0.76	0.47	0.95	0
	Muy Bueno	Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Matapalo	0.92	0.85	0.82	0.4	0.96	0
	Muy Bueno	Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Papayal	0.96	0.93	0.92	0.27	0.98	0
	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
Rica Playa	0.93	0.86	0.78	0.45	0.95	0
	Muy Bueno	Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno

Los análisis estadísticos obtenidos y mostrados en la Tabla 4-29, indican que las series de promedios mensuales para las estaciones SENAMHI e INAMHI vs estaciones GPM, son similares y equivalentes, con indicadores que muestran valores muy buenos.

Basados en los análisis realizados anteriormente, la información de precipitación GPM obtenida, se ha considerado representativa y confiable para el área de estudio.

Consecuentemente se utilizarán las estaciones GPM, mostrados en la Tabla 4-28, las cuales se encuentra alrededor del área de estudio, obtenida de los productos GPM, a partir de la

información de precipitación de la NASA, con periodos de precipitación diaria desde 1/1/1999 al 31/12/2018.

4.7.1.4 Análisis de Consistencia de la Información Pluviométrica

Para determinar la calidad de la información de las estaciones, se realizó el análisis exploratorio de la data histórica de las estaciones alrededor del área de estudio.

Además, en vez de comparar dos por dos estaciones por correlación o doble masa como se hace en los métodos clásicos, a partir de los datos disponibles, se generará una estación ficticia que sea una especie de promedio de todas las estaciones del área de estudio, con la cual vamos a comparar cada una de las estaciones.

Se aplicó el método del Vector Regional de Índices Pluviométricas (MVR), ejecutando el programa de cómputo HYDRACCESS (Vauchel, 2004). El MVR, el cual es un método de crítica de datos (G. Hiez, 1977 y Brunet Moret, 1979). Con el método se determinó la calidad de los datos de cada estación, basado en los resultados de los parámetros como:

- La Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D), que compara la desviación de una estación respecto al vector.
- Correlación entre la estación y el vector.
- Gráfico de índices anuales del vector y gráficos acumulados.

Después de la aplicación del método MVR, se obtuvo los resultados mostrado en la Tabla 4-30, Gráfico 4-18 y Gráfico 4-19.

Tabla 4-30: Principales Parámetros de Crítica de Datos

Estaciones GPM	Número de Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. /Vector
Arenillas	18	203.5	0.306	0.055	0.728	0.99
La Cuca	18	126.1	0.294	0.066	0.714	0.989
Palmales	18	245.8	0.333	0.038	0.303	0.994
Quebrada Seca	18	189.1	0.333	0.038	0.275	0.994
Chahuarhuaico	18	476.1	0.442	0.119	0.831	0.977
El Limo	18	638.0	0.346	0.084	0.446	0.968
Puente Puyango	18	302.5	0.322	0.098	0.453	0.955
Cabo Inga	18	417.0	0.432	0.096	0.86	0.991
Matapalo	18	281.4	0.35	0.054	0.524	0.987
Papayal	18	179.2	0.339	0.066	0.198	0.98
Rica Playa	18	290.8	0.436	0.122	0.825	0.972

Según el análisis, basado en los resultados mostrados en la Tabla 4-29, se aprecia que:

- La correlación de cada estación con respecto al Vector, son calificadas de muy buena, por lo tanto, se encuentran dentro de una zona homogénea.
- Los valores de desviación estándar de los desvíos no varían mucho; por lo tanto, las estaciones están sometidas a un mismo régimen multianual (véase Tabla 4-30).

Gráfico 4-18: Análisis de Confianza – Índices Anuales

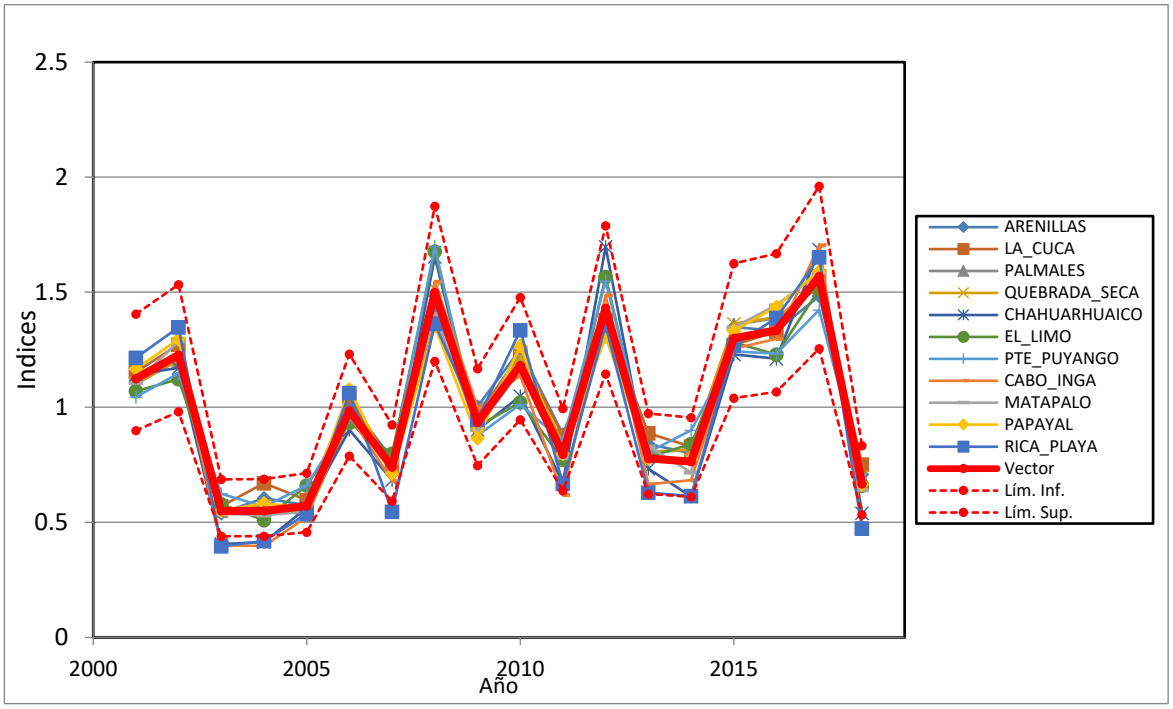
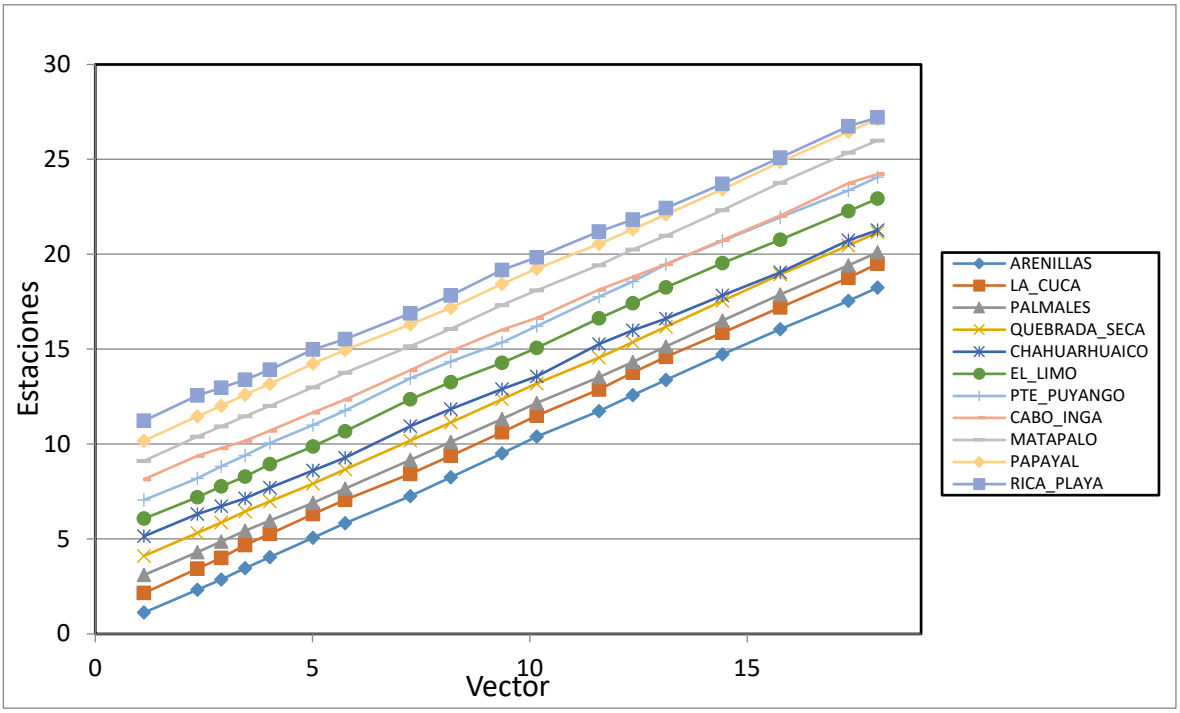


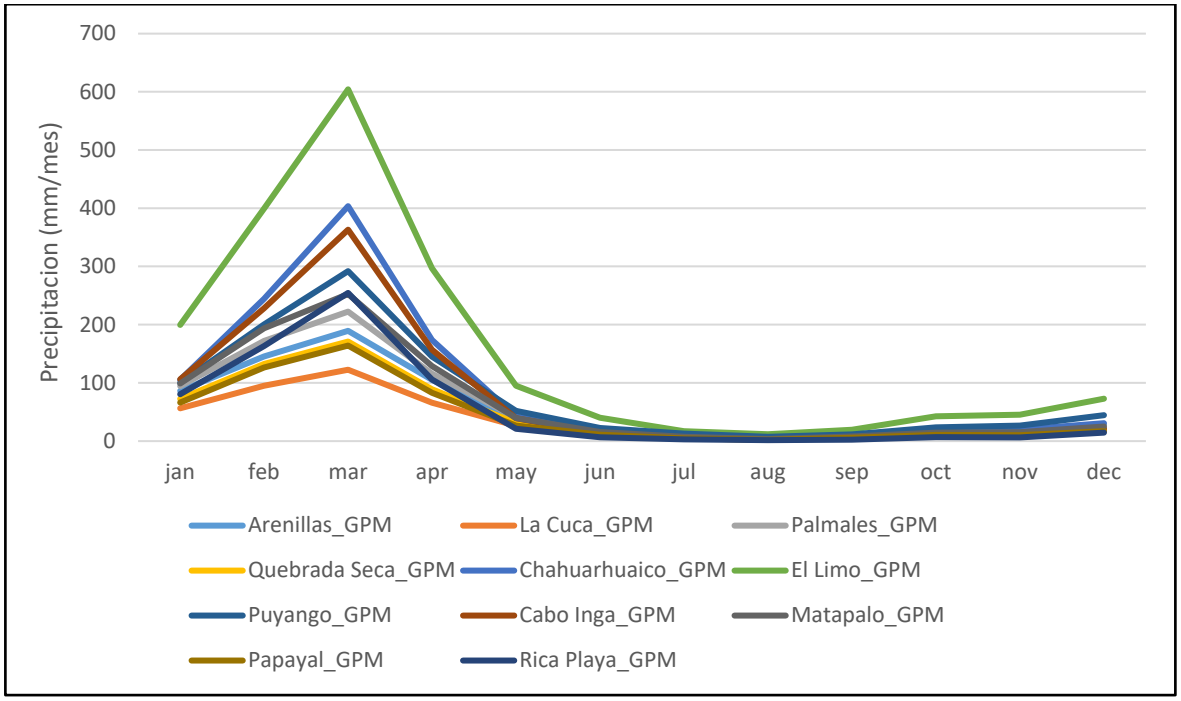
Gráfico 4-19: Análisis de Confianza – Suma de Índices Anuales



4.7.2 Régimen de la Precipitación Anual

El régimen pluviométrico, es el comportamiento de las lluvias a lo largo del año, promediando el monto de las precipitaciones mes a mes, obtenidas a lo largo de un número considerable de años. Dicha información resulta fundamental en climatología y será descrita a partir de la información de precipitación de la NASA, por el producto GPM, con periodos de precipitación diaria desde 1/1/2001 al 31/12/2018. Y basado en la información promedio mensual de las estaciones GPM mostrada en la Tabla 4-28, cuyo resultado se muestra en el Gráfico 4-20**.**

Gráfico 4-20: Promedio Mensual de las Estaciones GPM, Alrededor del Área de Estudio



En el Gráfico 4-20 podemos observar que el comportamiento y régimen mensual y anual de las 11 estaciones GPM, es similar debido a la similitud de sus pisos altitudinales. Los datos completos de precipitación para las estaciones GPM, en versión digital, se presentan en el Anexo I-B.

4.7.3 Estimación de Años Secos y Húmedos

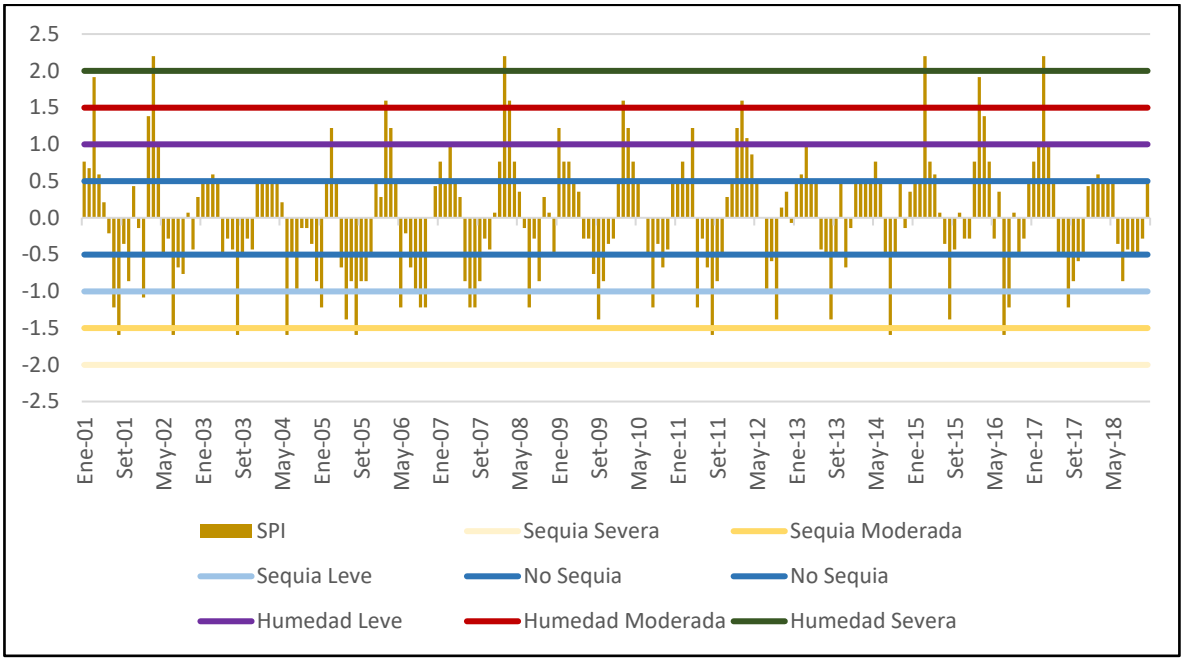
Las condiciones de déficit o exceso de precipitación han sido determinados utilizando el método de Índice de Precipitación Estandarizado (SPI por sus siglas en inglés) a partir de registros de precipitación disponible en el área de estudio. En cuanto a la clasificación de cada año, existen distintas categorías según el valor del SPI obtenido. Una de las clasificaciones utilizadas se muestra en la Tabla 4-31.

Tabla 4-31: Rango de Índice de Precipitación Estandarizada

Categoría	SPI
Sequía Extrema	SPI ≤ -2
Sequía Severa	-2.0 < SPI ≤ 1.5
Sequía Moderada	-1.5 < SPI ≤ -1.0
Sequía Leve	-1.0 < SPI ≤ -0.5
No Sequía	-0.5 < SPI ≤ 0.5
Humedad Leve	0.5 < SPI ≤ 1.0
Humedad Moderada	1.0 < SPI ≤ 1.5
Humedad Severa	1.5 < SPI ≤ 2.0
Humedad Extrema	SPI > 2

En el Gráfico 4-21 se presentan las clasificaciones obtenidas mediante el análisis del SPI identificándose las diferentes categorías de húmedo, normal y seco. El período común para analizar estuvo comprendido entre 2001 y 2018.

Gráfico 4-21: Índice de Precipitación Estandarizada – Qda. Seca GPM



En base a los cálculos obtenidos del SPI (índice de precipitación estándar), las probabilidades de déficit o exceso de precipitación han sido determinados y los resultados se muestran en la Tabla 4-32 y Tabla 4-33.

Según la Tabla 4-32 y Tabla 4-33, la probabilidad que exista sequía severa es pequeña pero significativa 3.7%.

Tabla 4-32: Probabilidades de Exceso por Precipitación

Categoría	Probabilidades (%)
Normal	60.6
Humedad Leve	30.6
Humedad Moderada	4.2
Humedad Severa	2.8
Humedad Extrema	1.9

Tabla 4-33: Probabilidades de Déficit por Precipitación

Categoría	Probabilidades (%)
Normal	68.1
Sequía Leve	19.9
Sequía Moderada	8.3
Sequía Severa	3.7
Sequía Extrema	0.0

4.7.4 Gradiente de Precipitación – Altitud

El cálculo de la gradiente es de gran interés para conocer, de una forma general, la influencia de los distintos factores geográficos en el clima. Para este caso es posible establecer un modelo muy simple de precipitación y una variable geográfica altitud (geográficas versus climáticas).

Para calcularlo, se ha utilizado la técnica de la regresión simple con una variable independiente, que es la altitud, y como variable dependiente la precipitación media anual, utilizando la información de precipitación mostrada en la Tabla 4-34.

Tabla 4-34: Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones GPM versus Altitud

Estación	Precipitación Promedio Anual (mm/año)	Altitud (msnm)
Arenillas_GPM	664.9	26.00
La Cuca_GPM	428.6	32.00
Palmales_GPM	738.0	120.00
Quebrada Seca_GPM	567.8	80.00
Chahuarhuaico_GPM	1078.3	290.00
El Limo_GPM	1843.9	1156.00
Puyango_GPM	938.5	305.00
Cabo Inga_GPM	965.0	237.00
Matapalo_GPM	803.0	118.00
Papayal_GPM	528.0	50.00
Rica Playa_GPM	667.0	61.00

A través de la regresión lineal entre los promedios anuales de precipitación de las estaciones GPM y la altitud mostrada en el Gráfico 4-22, se encontró la ecuación que ajusta a este conjunto de datos: **y = 1.1473x + 580.31,** donde **R^2= 0.9243,** que muestra una relación muy buena entre estas dos variables, y que el modelo de regresión explica el 92.43% de la variable precipitación.

Además, se establece un gradiente de precipitación de aproximadamente 114.73 mm por cada 100 metros para altitudes mayores a 20 msnm. El resultado se presenta en la Figura 4-17.

Gráfico 4-22: Regresión Lineal entre Altitud y Promedio Anual de Precipitación GPM

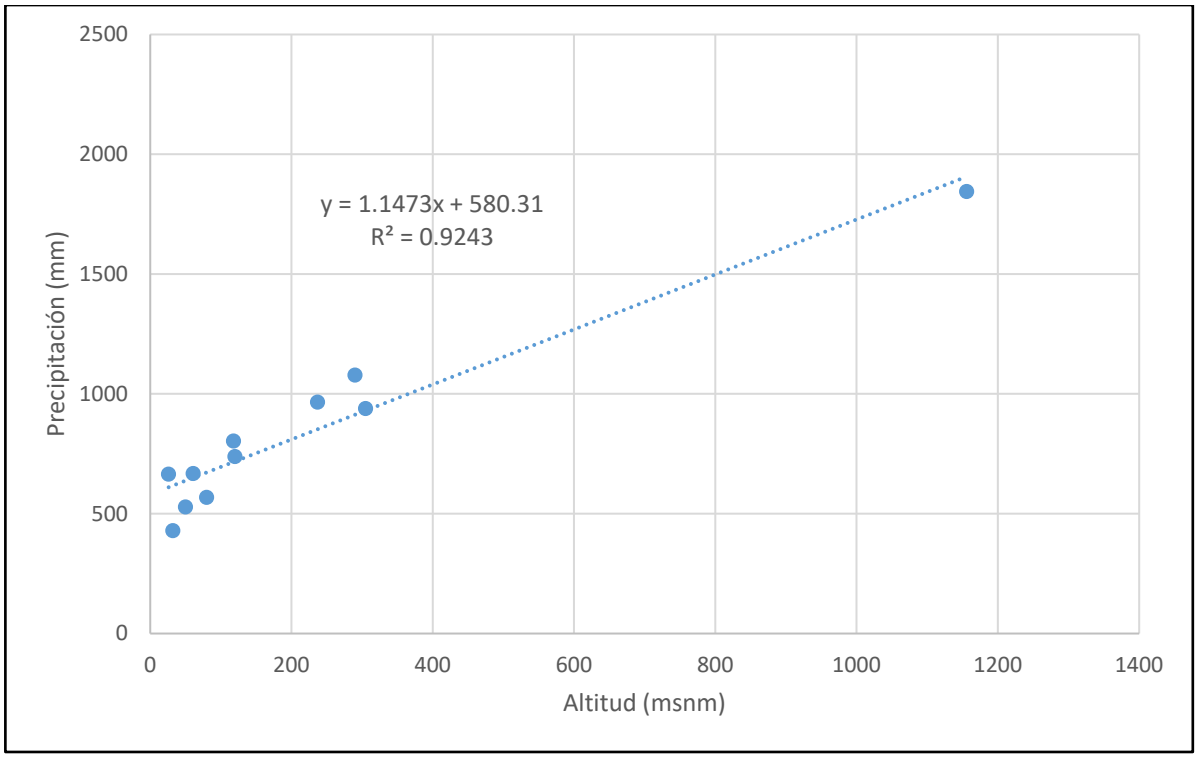


Figura 4-17: Mapa de Distribución Espacial de la Precipitación por Gradiente

4.7.5 Variabilidad Espacial de la Precipitación y las Curvas de Variación Estacional y de Duración

Utilizando la información de altitud del mapa topográfico a resolución de 1 km de ASTGTM (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) y Global Digital Elevation Model (GDEM) of NASA y Japan's Ministry of Economy y la sustitución de la altitud(x) según **y = 1.1473x + 580.31,** se obtuvo la variabilidad espacial de la precipitación, el cual se realizó sobre la plataforma ArcGIS, cuyo resultado se muestra en la Figura 4-17.

4.7.5.1 Curvas de Variación Estacional

En base a las precipitaciones mensuales de enero de 1999 hasta diciembre del 2018, de cada una de las 11 estaciones GPM que describen la precipitación en el área de estudio, se ha procedido hallar las curvas de variación estacional.

Estas curvas proporcionan información sobre la distribución de los valores de precipitación respecto al tiempo y la probabilidad de que dichos eventos serán igualados o superados. Con esta opción se puede averiguar la ocurrencia de las magnitudes de la precipitación con probabilidades del 70%, 75%, 80% a partir de datos mensuales cuyos resultados se muestran en las Tablas 4-35 a 4-45 y Gráficos 4-23 a 4-33.

Tabla 4-35: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Arenillas GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	41.2	35.95	30.88	25.86	20.7	14.87
Febrero	76.94	68.57	60.31	51.93	43.03	32.56
Marzo	130.29	120.92	111.27	100.99	89.39	74.61
Abril	78.36	73.61	68.65	63.3	57.15	49.13
Mayo	11.51	9.51	7.68	6	4.39	2.76
Junio	2.85	2	1.35	0.86	0.48	0.21
Julio	1.08	0.78	0.54	0.35	0.21	0.09
Agosto	1.09	0.85	0.64	0.46	0.3	0.16
Setiembre	4.32	3.66	3.05	2.46	1.88	1.26
Octubre	7.16	6.27	5.4	4.54	3.65	2.64
Noviembre	8.43	7.46	6.51	5.56	4.56	3.39
Diciembre	14.92	13.22	11.55	9.87	8.1	6.04

Gráfico 4-23: Curvas de Variación Estacional para la Estación Arenillas GPM

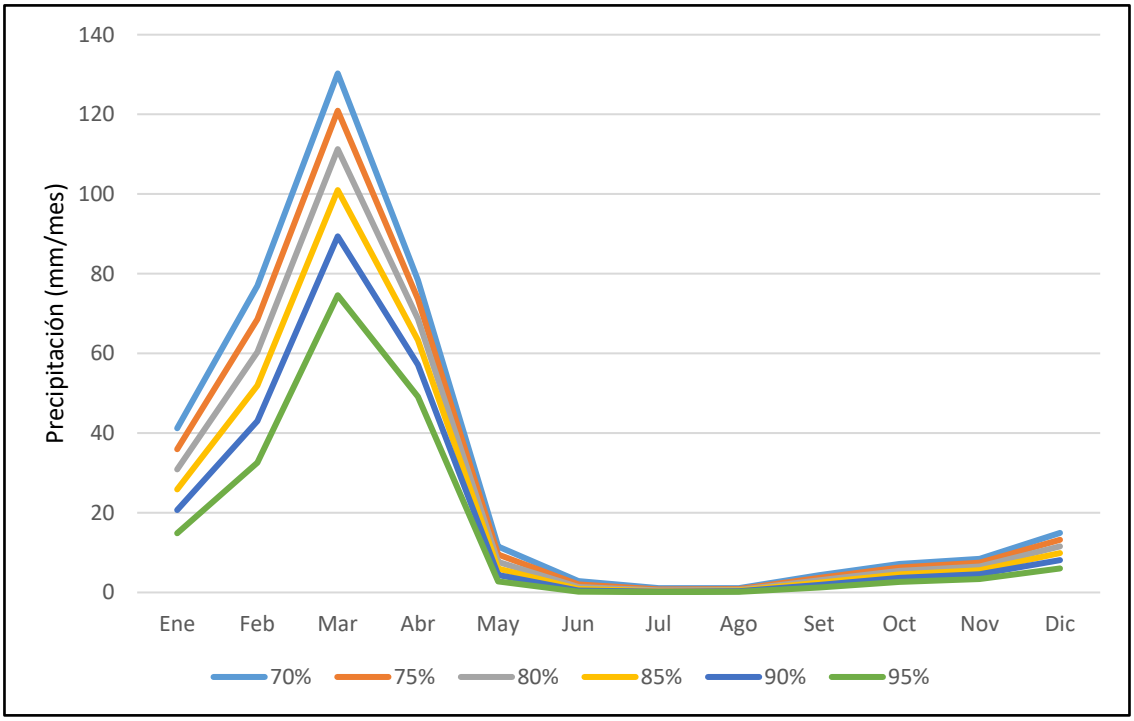


Tabla 4-36: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación La Cuca GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	35.66	32.59	29.49	26.24	22.65	18.22
Febrero	50.27	44.69	39.21	33.65	27.77	20.89
Marzo	85.61	79.66	73.52	66.96	59.53	50.01
Abril	50.71	47.9	44.96	41.76	38.06	33.17
Mayo	9	7.54	6.19	4.92	3.68	2.4
Junio	1.66	1.17	0.8	0.51	0.29	0.13
Julio	1.1	0.89	0.69	0.52	0.36	0.21
Agosto	0.68	0.54	0.41	0.3	0.2	0.11
Setiembre	2.98	2.63	2.29	1.94	1.58	1.17
Octubre	4.63	4.06	3.51	2.97	2.4	1.75
Noviembre	5.25	4.59	3.96	3.33	2.67	1.93
Diciembre	7.84	6.77	5.74	4.74	3.72	2.61

Gráfico 4-24: Curvas de Variación Estacional para la Estación La Cuca GPM

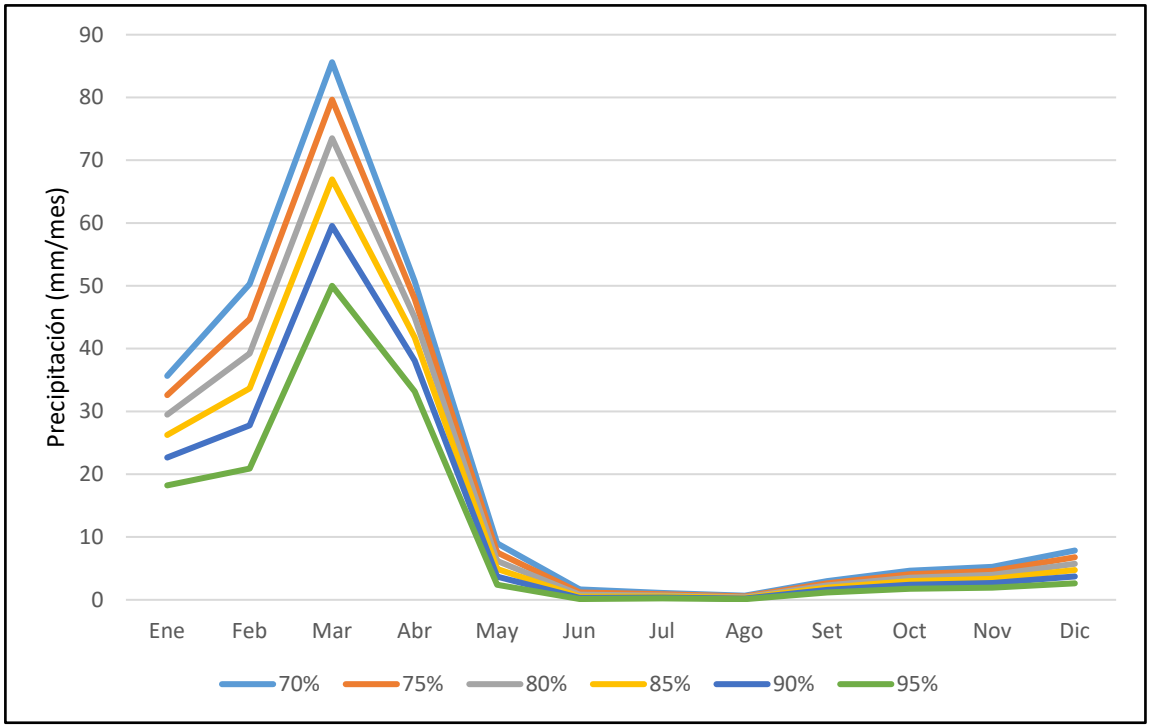


Tabla 4-37: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Palmales GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	33.67	28.07	22.92	18.09	13.44	8.65
Febrero	94.47	84.86	75.3	65.51	54.98	42.41
Marzo	148.4	137.07	125.46	113.16	99.39	82
Abril	80.28	74.59	68.73	62.47	55.4	46.37
Mayo	11.95	9.91	8.06	6.32	4.66	2.97
Junio	2.34	1.64	1.1	0.69	0.39	0.16
Julio	1.02	0.73	0.51	0.33	0.19	0.09
Agosto	0.13	0.08	0.05	0.03	0.01	0
Setiembre	3.19	2.73	2.29	1.87	1.45	0.99
Octubre	7.2	6.33	5.48	4.64	3.76	2.75
Noviembre	11.1	10.35	9.58	8.76	7.82	6.61
Diciembre	17.72	16.24	14.74	13.16	11.41	9.24

Gráfico 4-25: Curvas de Variación Estacional para la Estación Palmales GPM

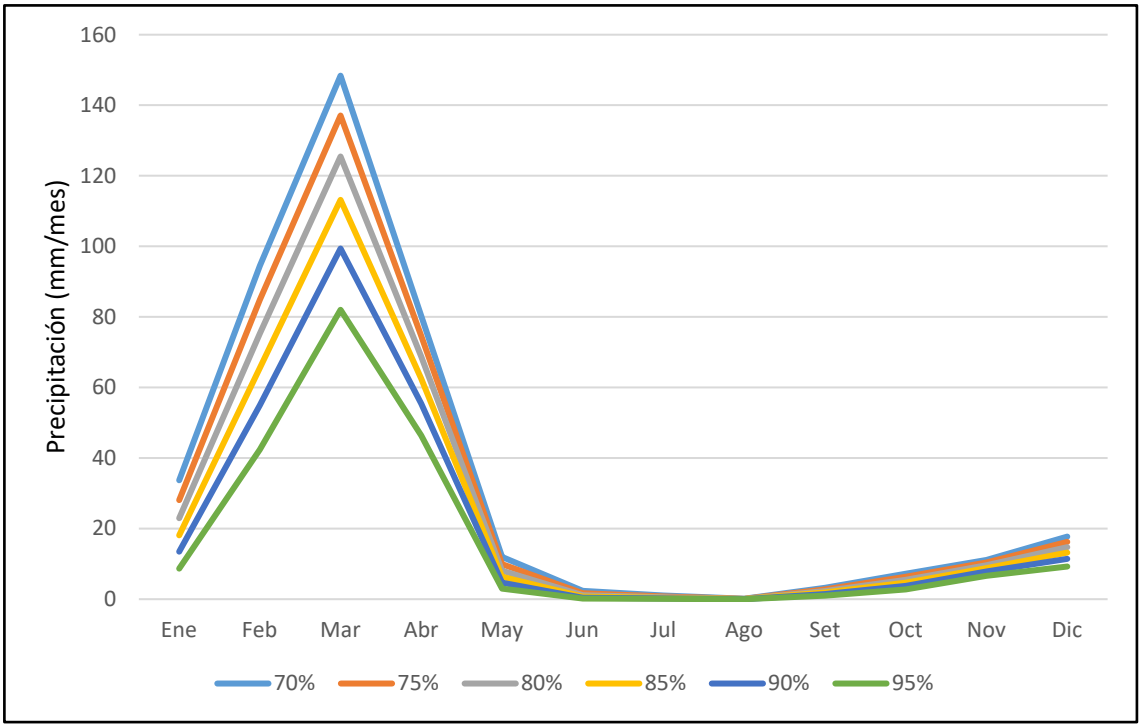


Tabla 4-38: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Quebrada Seca GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	25.91	21.59	17.63	13.92	10.34	6.66
Febrero	72.68	65.29	57.94	50.4	42.3	32.63
Marzo	114.18	105.46	96.53	87.07	76.47	63.09
Abril	61.77	57.39	52.88	48.06	42.63	35.68
Mayo	9.19	7.63	6.2	4.87	3.59	2.29
Junio	1.89	1.33	0.9	0.57	0.32	0.14
Julio	0.82	0.6	0.42	0.28	0.16	0.08
Agosto	0.11	0.07	0.04	0.02	0.01	0
Setiembre	2.46	2.1	1.76	1.44	1.11	0.76
Octubre	5.54	4.87	4.22	3.57	2.89	2.12
Noviembre	8.54	7.97	7.37	6.74	6.01	5.08
Diciembre	13.64	12.5	11.34	10.13	8.78	7.11

Gráfico 4-26: Curvas de Variación Estacional para la Estación Quebrada Seca GPM

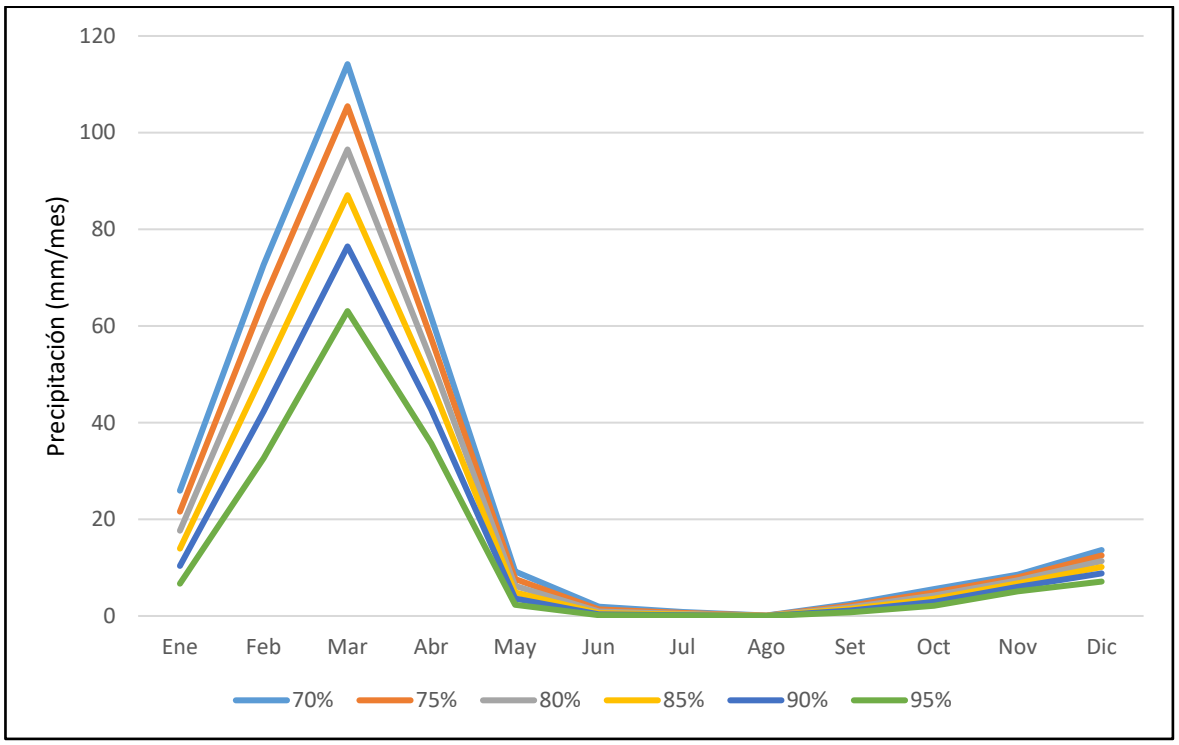


Tabla 4-39: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Chahuarhuaico GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	46.71	40.55	34.65	28.83	22.89	16.25
Febrero	117.37	103.75	90.42	77.04	62.97	46.71
Marzo	241.16	218.8	196.34	173.04	147.62	116.66
Abril	104.14	94.72	85.23	75.35	64.54	51.31
Mayo	10.42	8.41	6.62	5.01	3.53	2.1
Junio	2.97	2.09	1.41	0.89	0.5	0.22
Julio	1.27	0.9	0.61	0.39	0.22	0.09
Agosto	0.17	0.1	0.06	0.03	0.01	0
Setiembre	1.09	0.78	0.53	0.34	0.2	0.09
Octubre	9.27	8.29	7.31	6.32	5.25	4
Noviembre	12.09	11.03	9.96	8.85	7.62	6.1
Diciembre	23.05	21.66	20.22	18.66	16.87	14.52

Gráfico 4-27: Curvas de Variación Estacional para la Estación Chahuarhuaico GPM

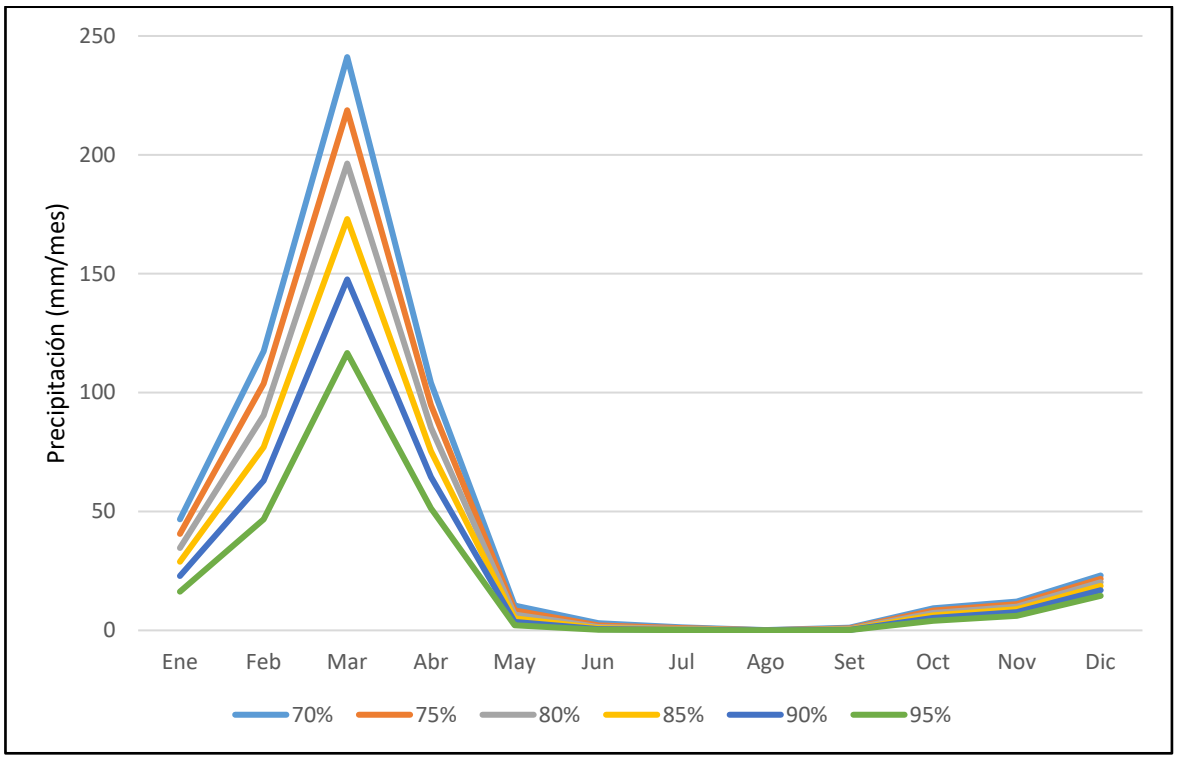


Tabla 4-40: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación El Limo GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	79.18	67.19	55.95	45.21	34.57	23.23
Febrero	241.15	219.75	198.15	175.63	150.9	120.51
Marzo	396.74	365.15	332.91	298.91	261.02	213.53
Abril	199.46	184.44	169.05	152.72	134.4	111.21
Mayo	37.74	32.48	27.48	22.62	17.7	12.31
Junio	5.41	3.69	2.41	1.47	0.79	0.31
Julio	2.57	1.81	1.22	0.77	0.43	0.19
Agosto	0.36	0.21	0.11	0.06	0.02	0.01
Setiembre	9.81	8.68	7.57	6.45	5.27	3.92
Octubre	19.8	17.3	14.89	12.5	10.02	7.23
Noviembre	31.16	28.93	26.63	24.17	21.41	17.88
Diciembre	53.94	50.57	47.06	43.28	38.96	33.33

Gráfico 4-28: Curvas de Variación Estacional para la Estación El Limo GPM

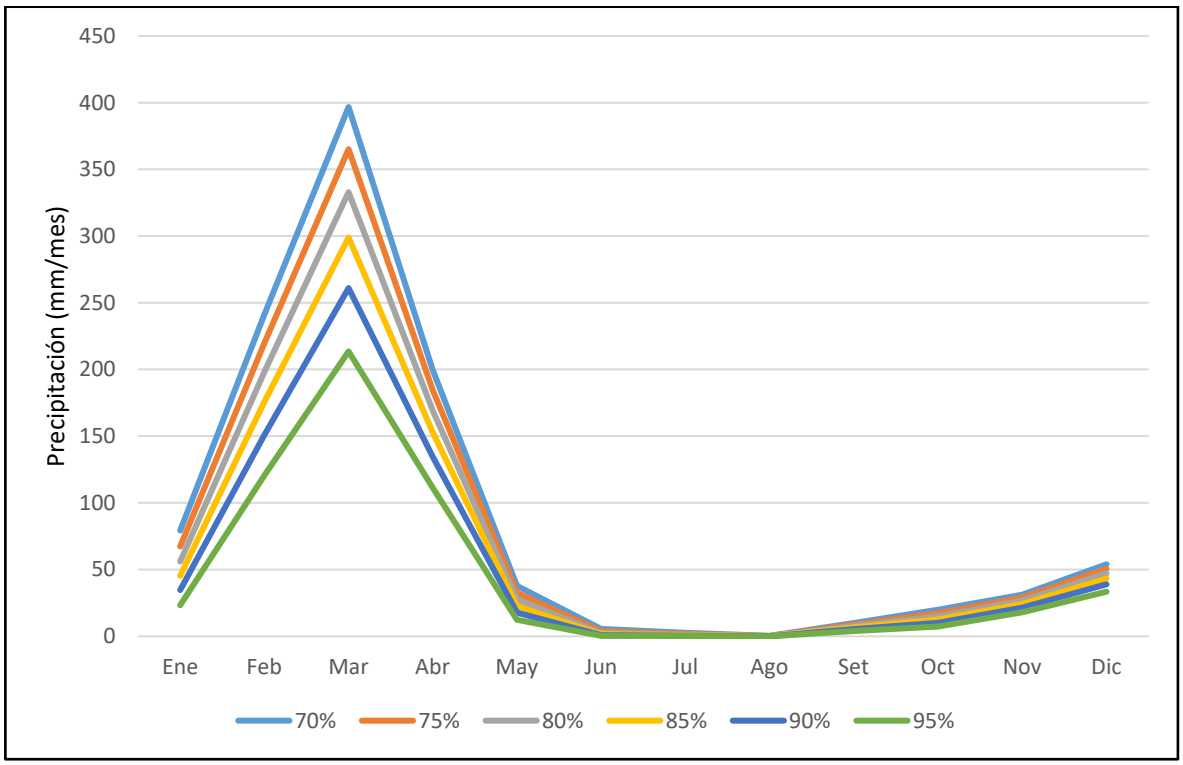


Tabla 4-41: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de precipitación para los Meses del Año en la Estación Puente Puyango GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	45.47	39.36	33.52	27.79	21.95	15.48
Febrero	120.34	109.56	98.68	87.36	74.94	59.71
Marzo	203.02	188.65	173.85	158.04	140.19	117.37
Abril	105.2	98.45	91.44	83.9	75.29	64.12
Mayo	20.57	17.68	14.93	12.27	9.58	6.64
Junio	3.14	2.18	1.45	0.9	0.5	0.21
Julio	7.52	6.81	6.1	5.37	4.57	3.61
Agosto	0.46	0.29	0.18	0.1	0.05	0.02
Setiembre	4.37	3.71	3.09	2.5	1.91	1.28
Octubre	10.11	8.66	7.3	5.97	4.65	3.2
Noviembre	18.53	17.24	15.91	14.49	12.89	10.83
Diciembre	36.53	34.92	33.2	31.31	29.08	26.07

Gráfico 4-29: Curvas de Variación Estacional para la Estación Puente Puyango GPM

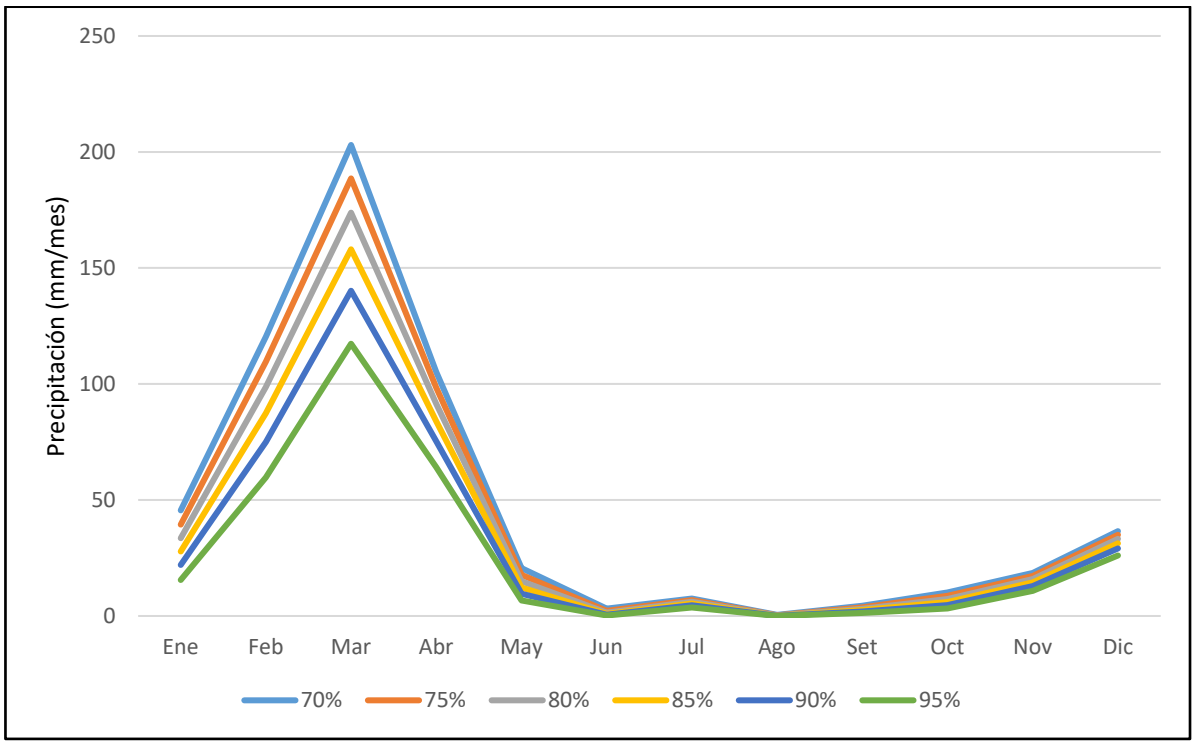


Tabla 4-42: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Cabo Inga GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	43.23	37.11	31.31	25.68	20.02	13.84
Febrero	106.62	93.69	81.13	68.6	55.54	40.63
Marzo	207.64	187.03	166.48	145.35	122.54	95.15
Abril	91.76	83.15	74.51	65.56	55.82	43.97
Mayo	8.79	7.11	5.61	4.26	3.01	1.8
Junio	2.12	1.51	1.03	0.66	0.38	0.16
Julio	0.86	0.62	0.43	0.28	0.16	0.07
Agosto	0.16	0.1	0.06	0.04	0.02	0.01
Setiembre	0.62	0.45	0.31	0.2	0.12	0.05
Octubre	5.03	4.41	3.8	3.2	2.58	1.87
Noviembre	5.97	5.31	4.65	3.99	3.29	2.47
Diciembre	11.81	10.59	9.37	8.13	6.79	5.21

Gráfico 4-30: Curvas de Variación Estacional para la Estación Cabo Inga GPM

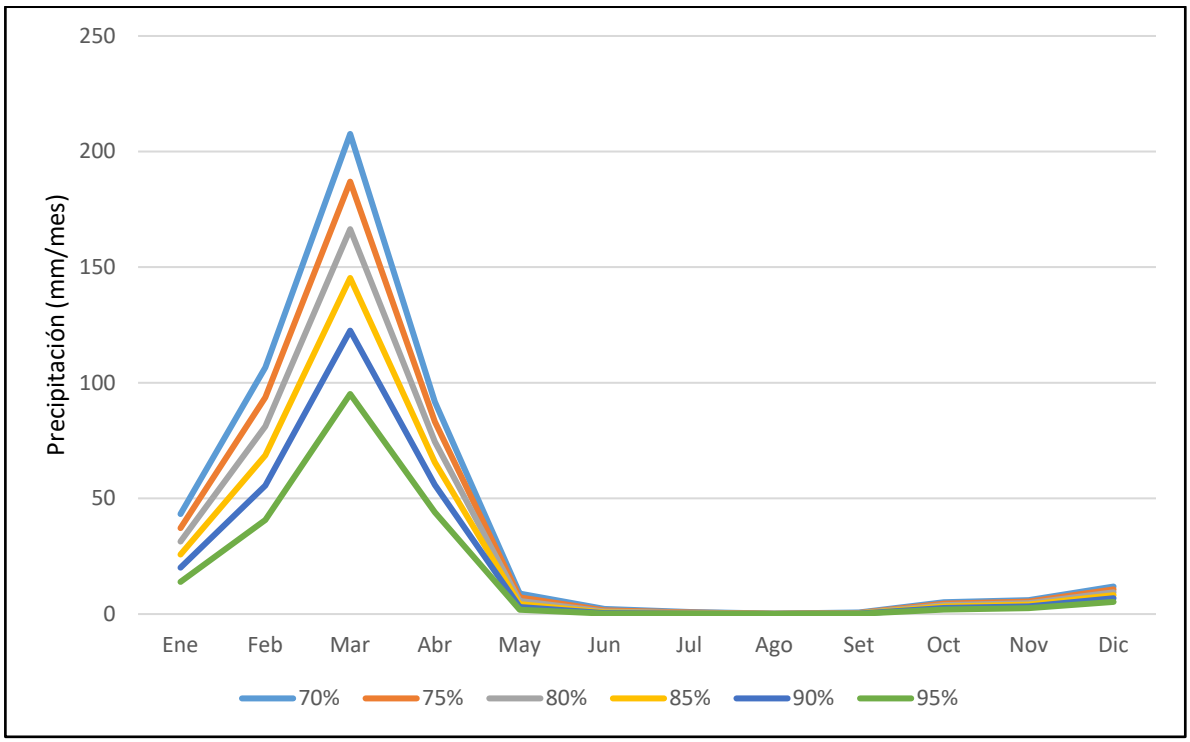


Tabla 4-43: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Matapalo GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	35.4	29.56	24.19	19.15	14.27	9.22
Febrero	101.83	90.99	80.26	69.35	57.7	43.94
Marzo	164.13	151.01	137.64	123.53	107.82	88.14
Abril	89.26	82.93	76.41	69.45	61.59	51.54
Mayo	11.15	9.16	7.36	5.7	4.13	2.56
Junio	2.29	1.6	1.07	0.68	0.38	0.16
Julio	1.3	0.94	0.66	0.43	0.25	0.12
Agosto	0.15	0.09	0.05	0.03	0.01	0
Setiembre	2.21	1.78	1.41	1.07	0.75	0.45
Octubre	7.06	6.26	5.47	4.68	3.84	2.87
Noviembre	7.62	6.7	5.81	4.91	3.98	2.92
Diciembre	11.34	9.88	8.47	7.08	5.65	4.05

Gráfico 4-31: Curvas de Variación Estacional para la Estación Matapalo GPM

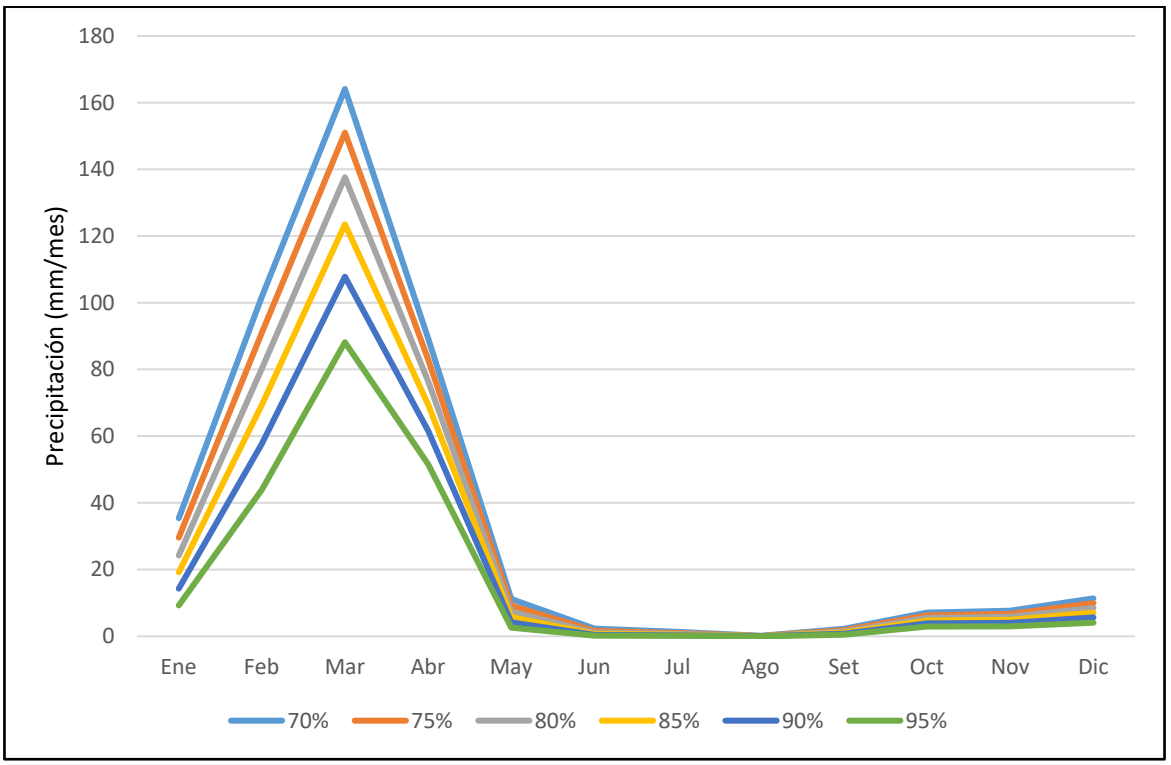


Tabla 4-44: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Papayal GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	32.91	28.91	25.02	21.14	17.11	12.5
Febrero	58.85	51.49	44.37	37.31	29.99	21.71
Marzo	105.69	97.19	88.52	79.39	69.23	56.51
Abril	60.01	56.13	52.1	47.76	42.81	36.41
Mayo	8.35	6.85	5.49	4.25	3.07	1.9
Junio	1.95	1.39	0.96	0.62	0.36	0.16
Julio	0.82	0.59	0.42	0.27	0.16	0.07
Agosto	0.11	0.07	0.04	0.02	0.01	0
Setiembre	1.26	0.97	0.72	0.51	0.33	0.18
Octubre	5.65	5.06	4.47	3.87	3.23	2.47
Noviembre	5.72	5.13	4.55	3.96	3.32	2.55
Diciembre	8.64	7.63	6.64	5.64	4.6	3.4

Gráfico 4-32: Curvas de Variación Estacional para la Estación Papayal GPM

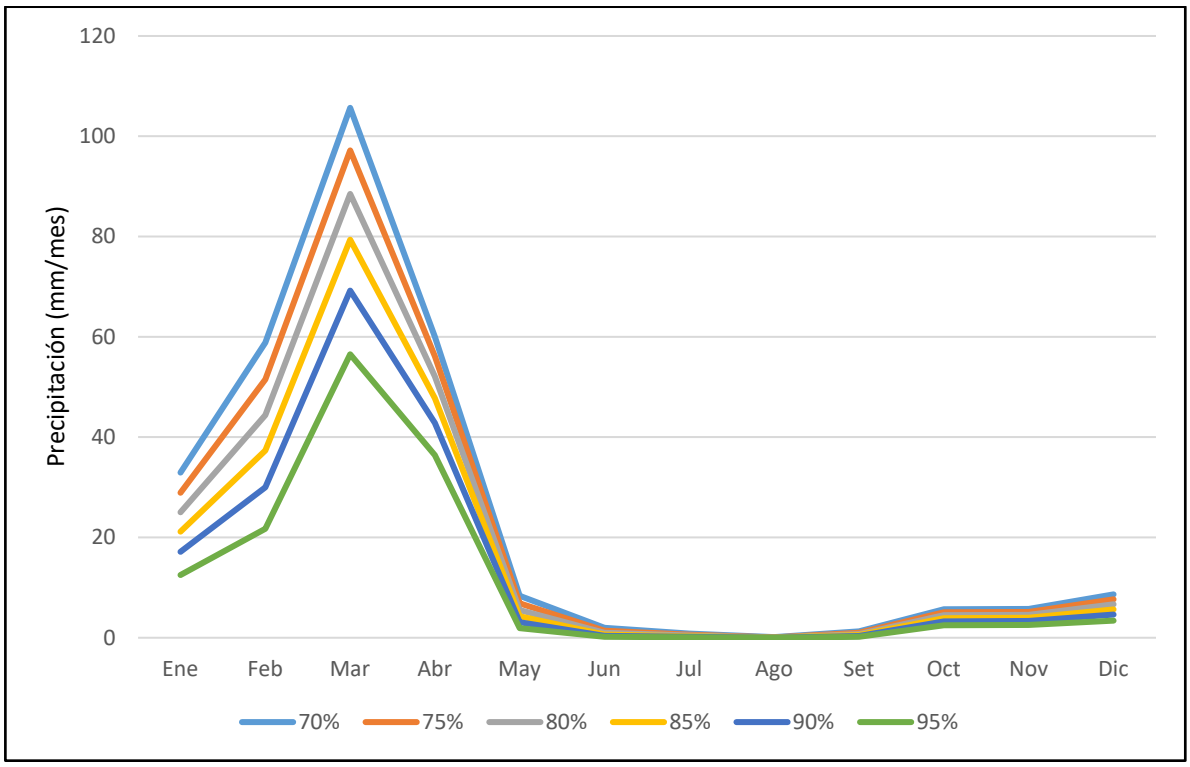
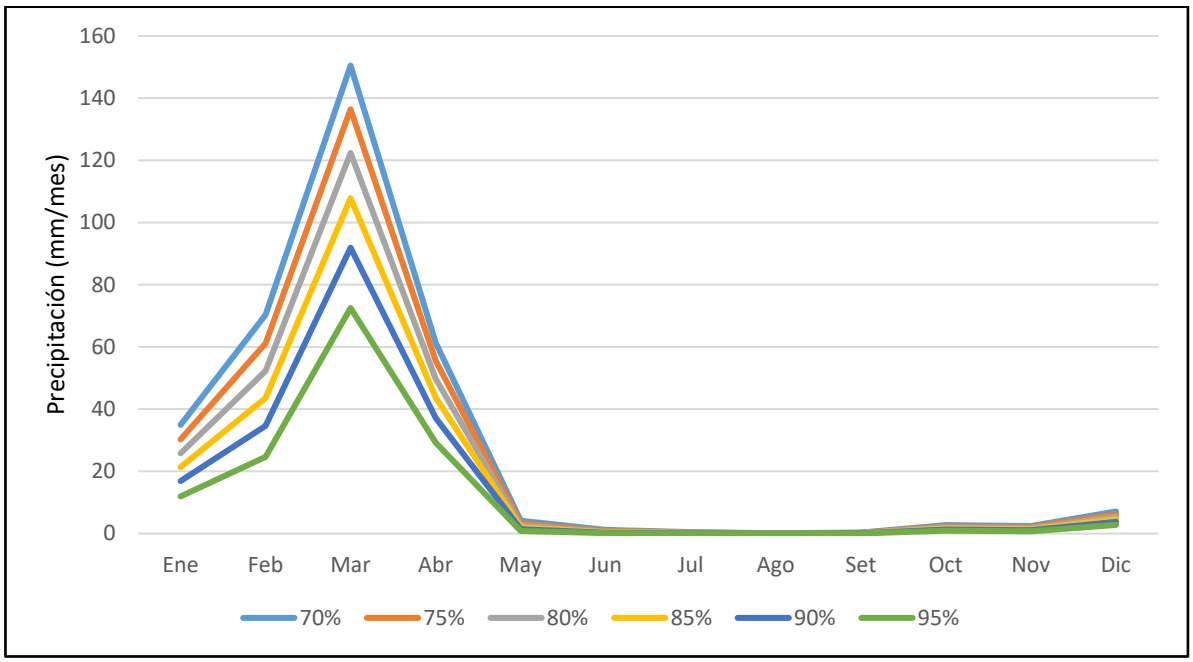


Tabla 4-45: Diferentes Probabilidades de la Ocurrencia de Precipitación para los Meses del Año en la Estación Rica Playa GPM

Meses	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Enero	34.9	30.22	25.74	21.35	16.88	11.91
Febrero	70.32	61.11	52.26	43.55	34.62	24.64
Marzo	150.47	136.46	122.39	107.8	91.9	72.54
Abril	61.33	55.52	49.71	43.69	37.14	29.2
Mayo	4.09	3.29	2.58	1.94	1.36	0.8
Junio	1.16	0.85	0.59	0.39	0.23	0.11
Julio	0.45	0.32	0.23	0.15	0.09	0.04
Agosto	0.11	0.07	0.04	0.02	0.01	0
Setiembre	0.31	0.23	0.16	0.1	0.06	0.03
Octubre	2.69	2.31	1.96	1.61	1.26	0.88
Noviembre	2.39	2.02	1.69	1.36	1.04	0.7
Diciembre	7.07	6.23	5.41	4.59	3.73	2.74

Gráfico 4-33: Curvas de Variación Estacional para la Estación Rica Playa GPM

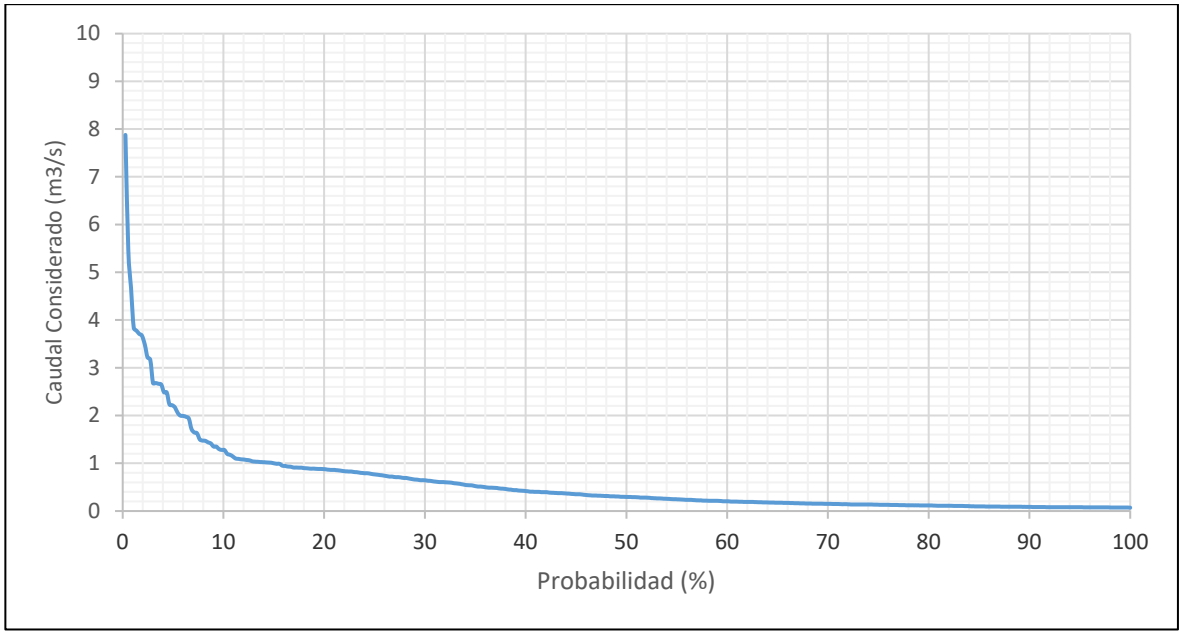


4.7.5.2 Curvas de Duración

Basándonos en los caudales promedios diarios para un periodo de enero del 1999 hasta diciembre del 2018, de cada una de las 7 subcuencas del área de estudio, se ha procedido a hallar las curvas de duración, la información detallada, en versión digital, se presenta en el Anexo I-C.

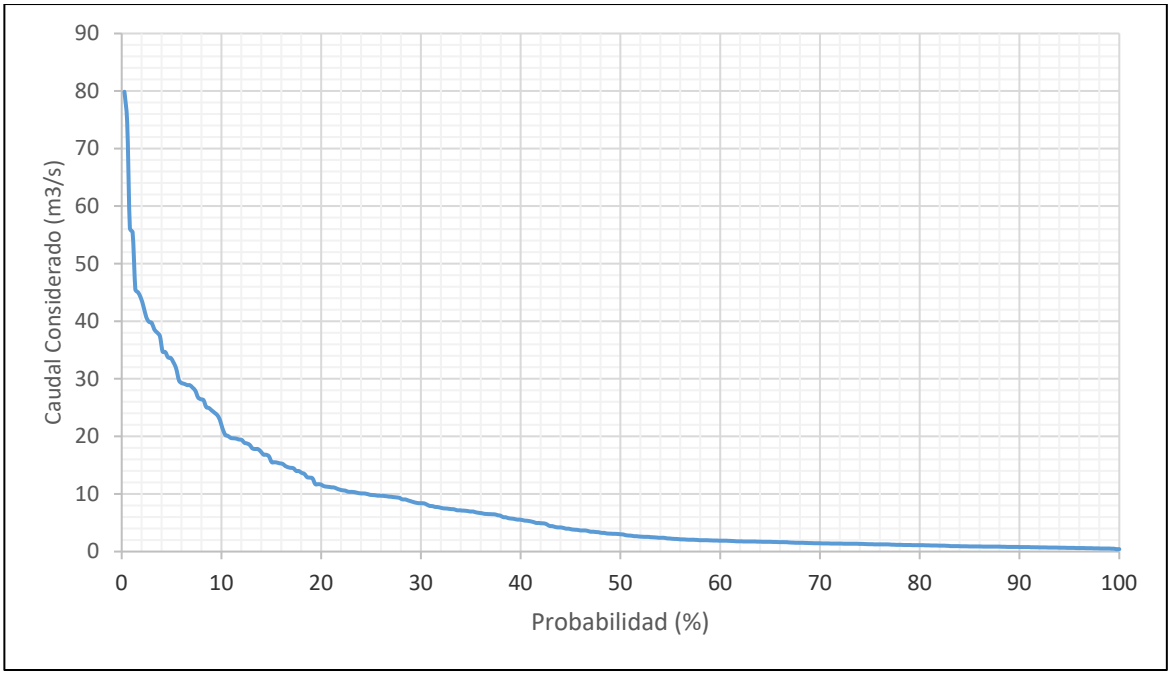
El resultado de la curva de duración para la Subcuenca 1, se muestra en el Gráfico 4-34. Donde el caudal de diseño obtenido: Q = 078940005 m^3/s, tiene una probalidad del 95 % de ser igualado o excedido.

Gráfico 4-34: Curvas de Duración de la Subcuenca 1



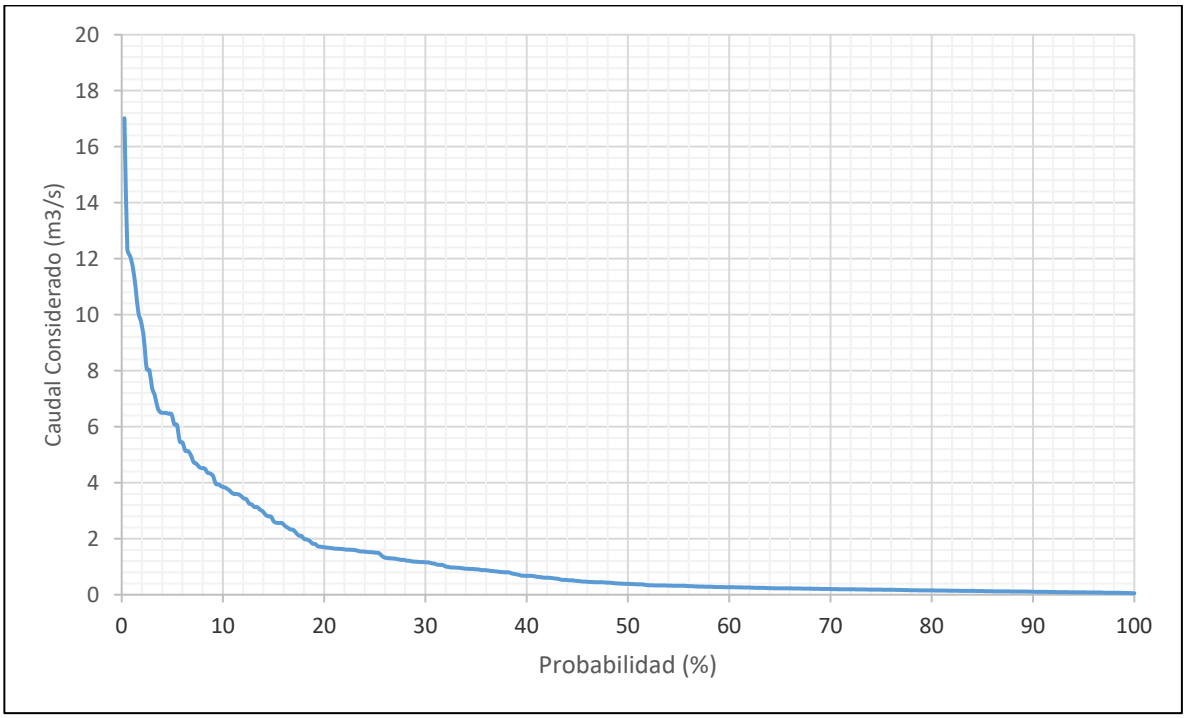
El resultado de la curva de duración para la Subcuenca 2, se muestra en la Gráfico 4-35. Donde el caudal de diseño obtenido : Q = 0.6364682 m^3/s, tiene una probalidad del 95 % de ser igualado o excedido.

Gráfico 4-35: Curvas de Duración de la Subcuenca 2



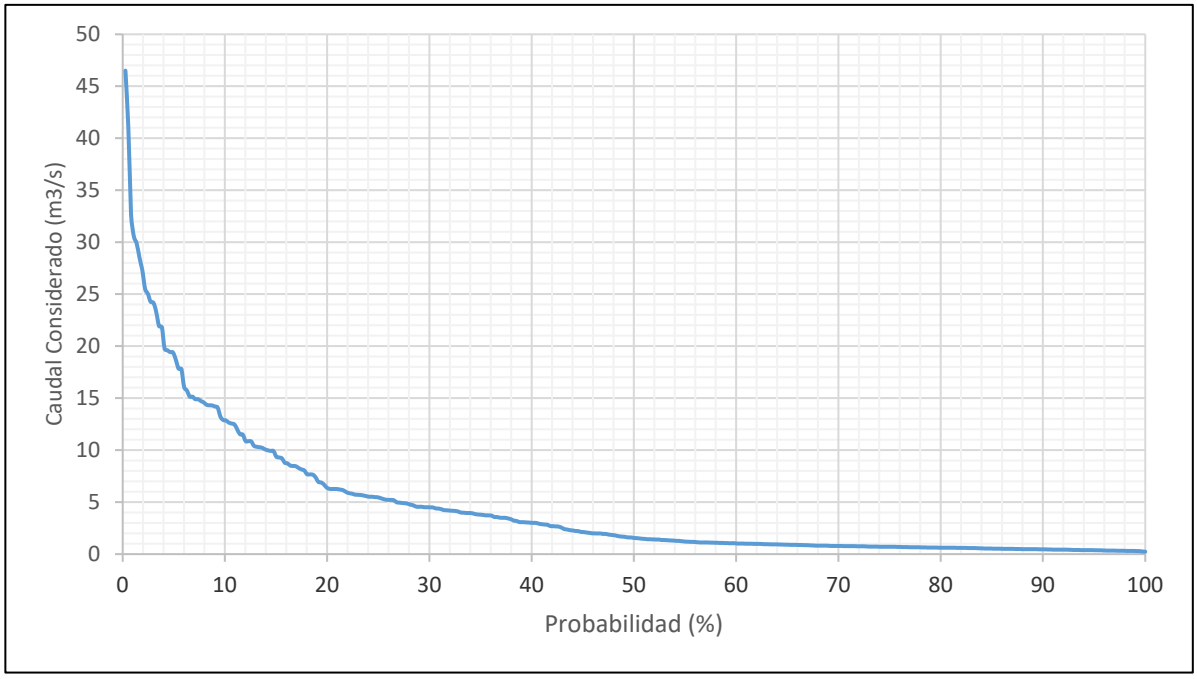
El resultado de la curva de duración para la Subcuenca 3, se muestra en la Gráfico 4-36. Donde el caudal de diseño obtenido : Q = 0.08497789 m^3/s, tiene una probalidad del 95 % de ser igualado o excedido.

Gráfico 4-36: Curvas de Duración de la Subcuenca 3



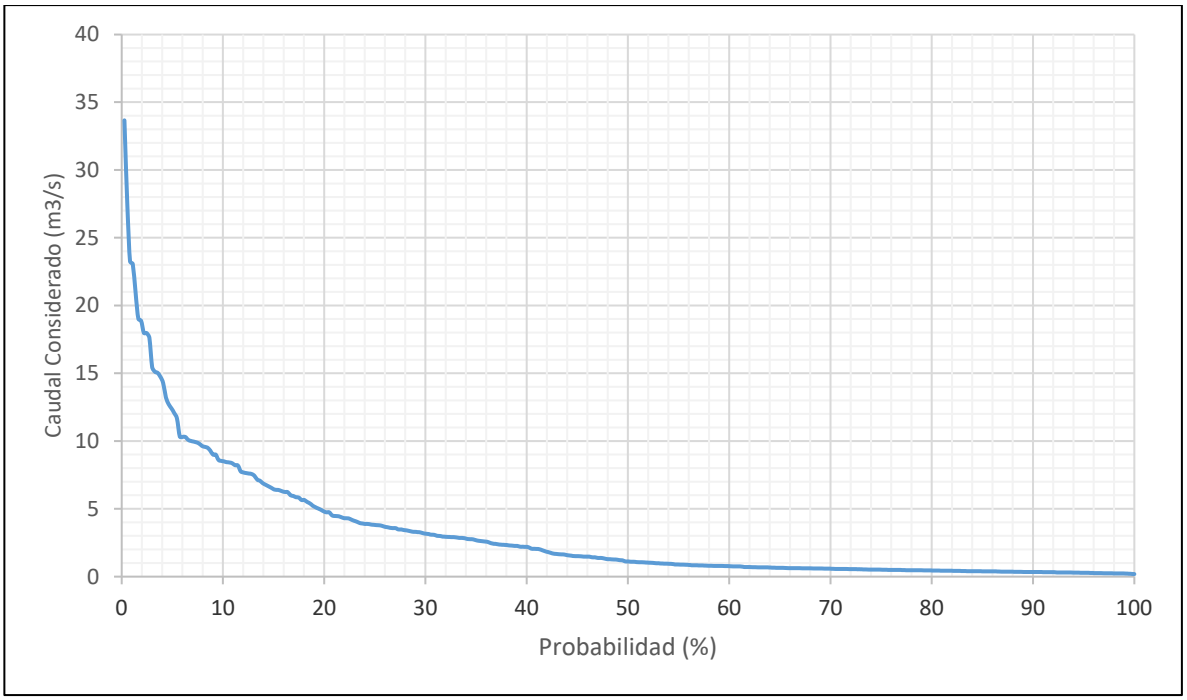
El resultado de la curva de duración para la Subcuenca 4, se muestra en la Gráfico 4-37. Donde el caudal de diseño obtenido: Q = 0.37752095 m³/s, tiene una probalidad del 95 % de ser igualado o excedido.

Gráfico 4-37: Curvas de Duración de la Subcuenca 4



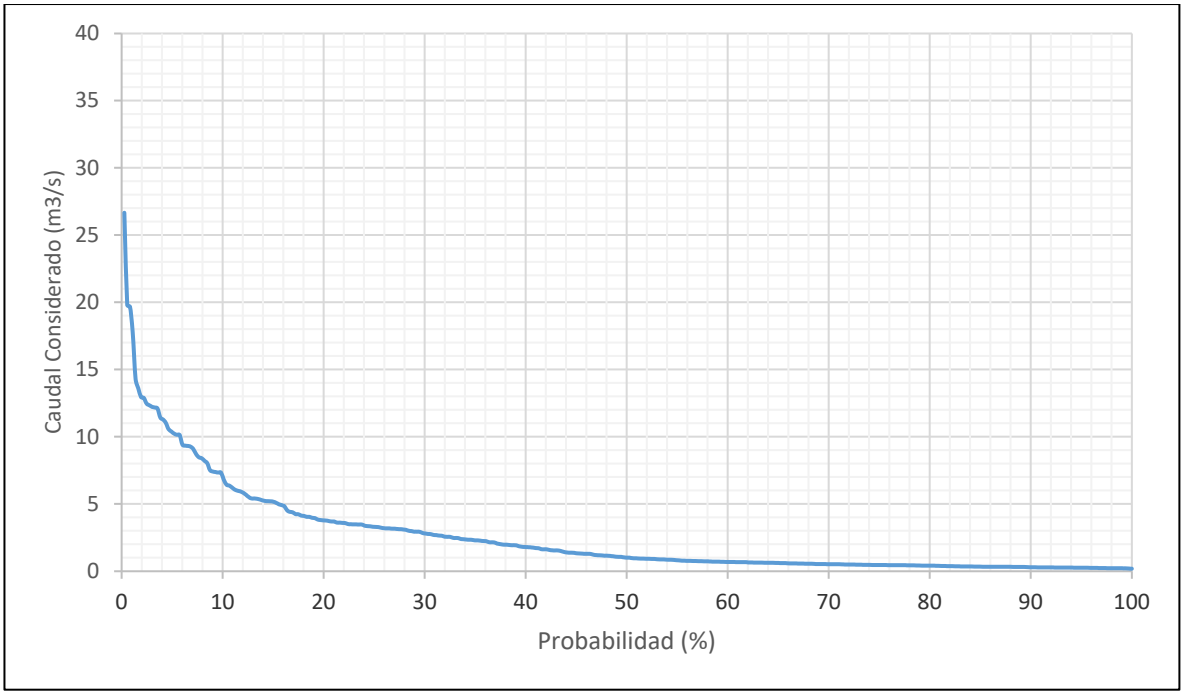
El resultado de la curva de duración para la Subcuenca 5, se muestra en la Gráfico 4-38. Donde el caudal de diseño obtenido: Q = 0.2804162 m³/s, tiene una probalidad del 95 % de ser igualado o excedido.

Gráfico 4-38: Curvas de Duración de la Subcuenca 5



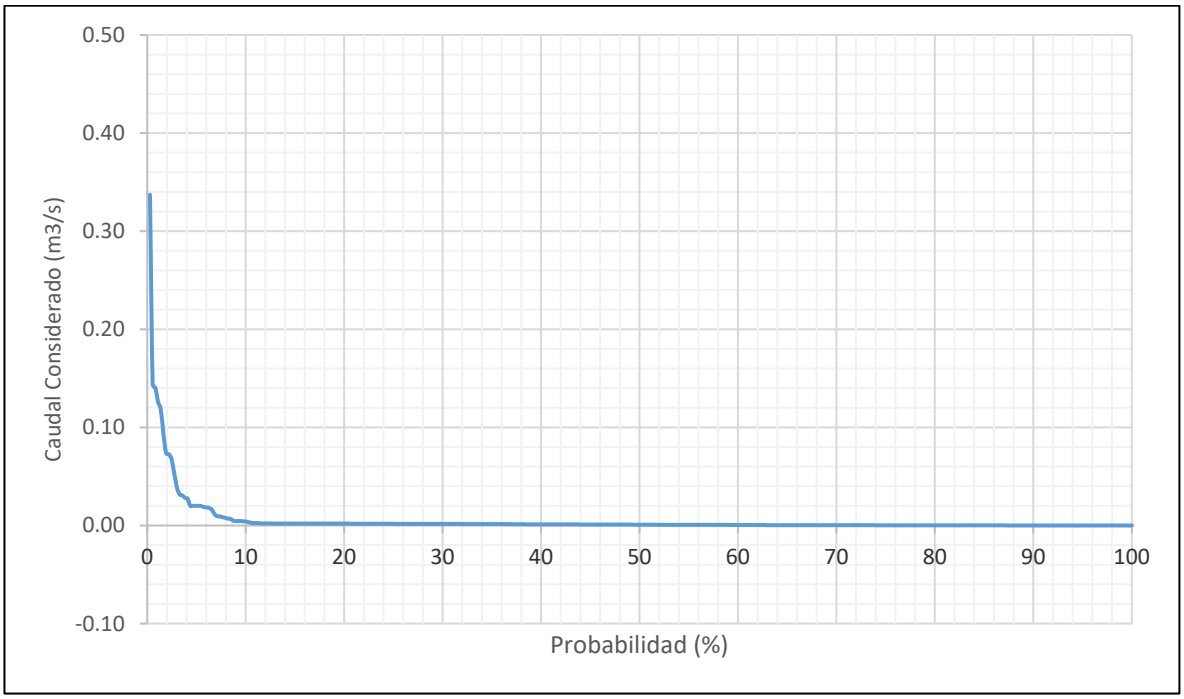
El resultado de la curva de duración para la Subcuenca 6, se muestra en la Gráfico 4-39. Donde el caudal de diseño obtenido: Q = 0.25892465 m³/s, tiene una probalidad del 95 % de ser igualado o excedido.

Gráfico 4-39: Curvas de Duración de la Subcuenca 6



El resultado de la curva de duración para la Subcuenca 7, se muestra en la Gráfico 4-40. Donde el caudal de diseño obtenido : Q = 00001 m³/s, tiene una probalidad del 95 % de ser igualado o excedido.

Gráfico 4-40: Curvas de Duración de la Subcuenca 7



4.7.6 Conclusiones

Después de contrastar las estaciones GPM, utilizando los 6 índices de validación para determinar cuanta precisión tienen los datos de precipitación modelados (GPM), se obtuvieron valores de índices buenos a muy buenos, y al analizar la calidad de los datos utilizando el método del Vector Regional, con las estaciones modeladas, se obtienen en buenos valores de correlación con el vector regional; por lo mencionado, se concluye de los resultados obtenidos que la precipitación derivada del satélite es representativa de toda el área de estudio, permitiéndonos la caracterización de la precipitación en el área de estudio.

4.8 BALANCE HÍDRICO

Para el desarrollo del balance hídrico y determinación de los parámetros como caudal, evapotranspiración y recarga al acuífero, considerando las características del área de estudio y los datos disponibles, se ha visto conveniente utilizar el programa SWAT (por sus siglas en inglés *Soil and Water Assessment Tool*).

El programa SWAT es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas.

4.8.1 Área de Dominio del Modelo y Tratamiento de la Información Pluviométrica

Para el modelamiento, el área de estudio se dividió en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo con las coberturas presentes.

SWAT tiene tres métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: Penman-Monteith, Hargreaves and Sammami y Priestley – Taylor. Las variables climáticas utilizadas como entradas por el SWAT son: la precipitación, la temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, las cuales fueron suministradas y analizadas en los capítulos anteriores. Como variables geomorfológicas de entrada al SWAT son: topografía, las definiciones de las cuencas de estudio, el tipo y uso de suelo.

4.8.1.1 Definición de las Subcuencas de Estudio

El área de estudio se encuentra entre la intercuenca 13951 y Zarumilla, perteneciente a la Región Hidrográfica del Pacifico. Se han definido 07 subcuencas en el área de estudio, las cuales se presentan en la Figura 4-18**.**

El estudio hidrológico se realizará a nivel local con las subcuencas dentro del límite del área de estudio hidrológico.

4.8.1.2 Suelos

El nombre de los tipos de suelo ha sido seleccionado de la base de datos del Modelo SWAT y es el que más se asemejan a los suelos presentes en el área de estudio hidrológico según se muestra en la Figura 4-19**.** El resumen de los parámetros hidráulicos de los suelos en el área de estudio se presenta en la Tabla 4-46.

Figura 4-18: Subcuencas del Área de Estudio

Figura 4-19: Mapa de Tipo de Suelo en el Área de Estudio según SWAT

Tabla 4-46: Características Hidrológicas de los Tipos de Suelos Derivados en Base a la Información Geológica del Área, según la base de SWAT

Tipo de Suelo	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	Arcilla	Limo	Arena	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1
AQUENTS	1.23	0.19	81.00	6.40	17.50	39.47	43.03	4.79	0.01	0.37
BENSON	1.40	0.16	19.00	2.33	20.00	37.83	42.17	12.77	0.01	0.28
BOMOSEEN	1.15	0.18	20.00	2.33	10.00	57.09	32.91	6.82	0.01	0.32
BUXTON	1.05	0.22	6.50	3.20	22.50	52.72	24.78	1.01	0.01	0.32
FARMINGTON	1.25	0.16	33.00	2.33	18.50	38.54	42.96	10.29	0.01	0.32
MUNSON	1.30	0.22	21.00	3.78	6.50	71.46	22.04	1.24	0.01	0.49
TACONIC	1.25	0.11	23.00	2.33	18.50	38.54	42.96	40.00	0.01	0.24
TEEL	1.27	0.22	5.10	2.33	13.00	72.68	14.32	1.22	0.01	0.49
URBAN LAND	1.50	0.10	500.00	0.00	15.00	30.00	55.00	20.00	0.23	0.28
VERGENNES	1.40	0.18	0.90	2.33	58.50	25.65	15.85	0.00	0.01	0.49
WALPOLE	1.13	0.19	400.00	2.91	4.00	34.85	61.15	6.81	0.01	0.20
WATER	1.72	0.00	260.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00

Donde:

(SOL_BD1 densidad húmeda del suelo (mg/m3)

SOL_AWC1 capacidad volumétrica de agua disponible en el suelo (mm/mm)

SOL_K1 conductividad hidráulica saturada (mm/hr)

CLAY1 % de arcilla

SILT1 % de limo

SAND1 % de arena

ROCK1 % área ocupada por roca

SOL_ALB1 albedo del suelo

USLE_K1 factor de erosión para la formula USLE).

4.8.1.3 Mapa de Uso de Suelos

La vegetación contenida en la zona de estudio se muestra en la Tabla 4-47 y su distribución espacial se muestra en la Figura 4-20.

Tabla 4-47: Parámetros de la Vegetación Según el Tipo de Uso de Tierra, según la Base de SWAT

Uso de Suelo	BIO_E	HVSTI	BLAI	FRGRW1	LAIMX1	FRGRW2	LAIMX2	DLAI	CHTMX	RDMX	T_OPT	T_BASE
AGRL	33.50	0.45	3.00	0.15	0.05	0.50	0.95	0.64	1.00	2.00	30.00	11.00
FRSE	15.00	0.76	5.00	0.15	0.70	0.25	0.99	0.99	10.00	3.50	30.00	0.00
FRST	15.00	0.76	5.00	0.05	0.05	0.40	0.95	0.99	6.00	3.50	30.00	10.00
RNGB	34.00	0.90	2.00	0.05	0.10	0.25	0.70	0.35	1.00	2.00	25.00	12.00
WATR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WETN	47.00	0.90	6.00	0.10	0.20	0.20	0.95	0.70	2.50	2.20	25.00	12.00

Donde:

(BIO_E	tasa biomasa/energía o eficiencia del uso de la radiación ((kg/ha)/ (MJ/m2))
HVSTI	Índice de cosecha o extracción ((kg/ha)/ (kg/ha))
BLAI	Índice de área foliar máxima potencial
FRGRW1	Fracción del BLAI correspondiente en el primer punto de desarrollo del área foliar optima en la curva de desarrollo
LAIMX1	Porcentaje de la época de crecimiento que corresponde al punto FRGRW1
FRGRW2	Fracción del BLAI correspondiente al segundo punto de desarrollo del área foliar optima en la curva de desarrollo
LAIMX2	Porcentaje de la época de crecimiento que corresponde al punto FRGRW2
DLAI	Fracción de la cobertura o de la época de crecimiento de la vegetación cuando las hojas empiezan a secarse
CHTMX	Altura máxima del dosel (m)
RDMX	Profundidad radicular máxima (m)
T_OPT	Temperatura óptima de crecimiento (°C)
T_BASE	Temperatura mínima de crecimiento (°C).

4.8.1.4 Mapa de Pendientes

El parámetro de la pendiente tiene una influencia en la cantidad de recarga que ingresa al acuífero, donde una pendiente plana permitirá una recarga mayor que en zonas de alta pendiente. La distribución de la pendiente en el área de estudio se muestra en la Figura 4-21.

Figura 4-20: Mapa de Uso de Suelo en el Área de Estudio según SWAT

Figura 4-21: Mapa de Pendientes en el Área de Estudio según SWAT

4.8.2 Resultados de las Simulaciones

4.8.2.1 Planteamiento de la Simulación

Las simulaciones se han concentrado entre el año 2001 y el año 2018 (usando un periodo de calentamiento de 4 años), considerando:

- La precipitación diaria disponible abarca desde el año 2001 hasta el año 2018 del satélite GPM,
- Los datos meteorológicos diarios de temperatura máxima y mínima (°C), humedad relativa (%), radiación solar (MJ/m2/día), velocidad del viento (m/s), se encuentran disponibles desde el 1 de enero del 1984, y
- Se hallará el balance hídrico para las subcuencas 2,3,4,5,6 y se realizará el balance hídrico para las subcuencas 1 y 2 solo para determinar la recarga en los límites del modelo.

4.8.2.2 Metodología de la Simulación

Para la determinación de los valores simulados, de las distintas variables hidrológicas como: precipitación, evapotranspiración, escorrentía y recarga al acuífero, entre otras variables, SWAT las realiza a través de la ecuación de equilibrio:

$$Agua\ Final = Agua\ Inicial + \Sigma(Precipitación - Escorrentía - Evapotranspiración - Percolación - Flujo\ de\ Retorno)$$

Donde:

Precipitación: es la cantidad en mm, de precipitación en un día.

Escorrentía: es la cantidad en mm, de escorrentía en un día.

Evapotranspiración: es la cantidad en mm, de evapotranspiración en un día.

Percolación: es la cantidad en mm, de percolación en un día, parte de esta se convierte en flujo de retorno que alimenta los ríos, otra parte en evapotranspiración que sale del acuífero superficial y otra recarga el acuífero profundo.

Flujo de Retorno: es la cantidad en mm, de flujo de retorno en un día, es parte de la percolación.

La subdivisión de la cuenca en pequeñas unidades de respuesta hidrológica (HRU) que realiza SWAT, en base al tipo y uso de suelo, y de la mano de la ecuación de equilibrio, permite una distribución geoespacial, con mayor precisión de las variables hídricas a través de la cuenca.

La precipitación se obtiene por simulación del modelo Nicks (1974), el cual convierte los datos puntuales de precipitación diaria suministrado de estaciones terrestres, a una superficie de distribución geoespacial semi continua de información de precipitación promedio anual, donde la información de precipitación diaria, para cada subdivisión de la cuenca en HRU´s, es guardada en una base de datos accesible por el usuario.

El cálculo de la evapotranspiración potencial se realiza a través de 3 opciones disponibles por SWAT, Hargreaves (Hargreaves et Al., 1985), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972), y Penman-Monteith (Monteith, 1965).

La escorrentía es calculada, utilizando una modificación del método de curva numérica del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1972).

Para la determinación del Balance Hídrico General promedio mensual para cada subcuenca se ha utilizado:

Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)

Dado que SWAT, calcula precipitación, evapotranspiración, percolación, escorrentía, flujo lateral (agua subsuperficial que alimenta a los ríos), flujo de retorno (agua de percolación que alimenta a los ríos) y rendimiento de agua, promedio mensual, entonces la recarga al acuífero es:

Recarga al Acuífero = Rendimiento de agua – Escorrentía – Flujo Lateral – Flujo de Retorno

Y el cálculo de la revaporación (almacenamiento) es:

Revaporación (Almacenamiento) = Precipitación – Evapotranspiración – Percolación – Escorrentía – Recarga al Acuífero

4.8.2.3 Balance Hidrológico de las Subcuencas de Estudio

De los resultados del modelamiento en SWAT, se procedió a realizar el balance hídrico para las subcuencas definidas en el área de estudio (véase Figura 4-19). Los resultados se presentan a continuación.

En la Figura 4-22 se presenta la ubicación de las estaciones de aforo definidas en cada una de las 7 subcuencas del área de estudio.

Análisis del Balance de Agua en la Subcuenca 1

El resultado del balance hidrológico es presentado en la Tabla 4-48 y Tabla 4-49, y el Gráfico 4-41. Se ha estimado que en promedio la precipitación anual es 516.8 mm por año con una evapotranspiración de 380.5 mm por año, la escorrentía 40.5 mm por año, mientras que la recarga en promedio es de 43.8 mm por año, con un caudal promedio es 598.1 l/s. Siendo el mes de marzo el de mayor aporte.

Tabla 4-48: Balance Hídrico en la Subcuenca 1

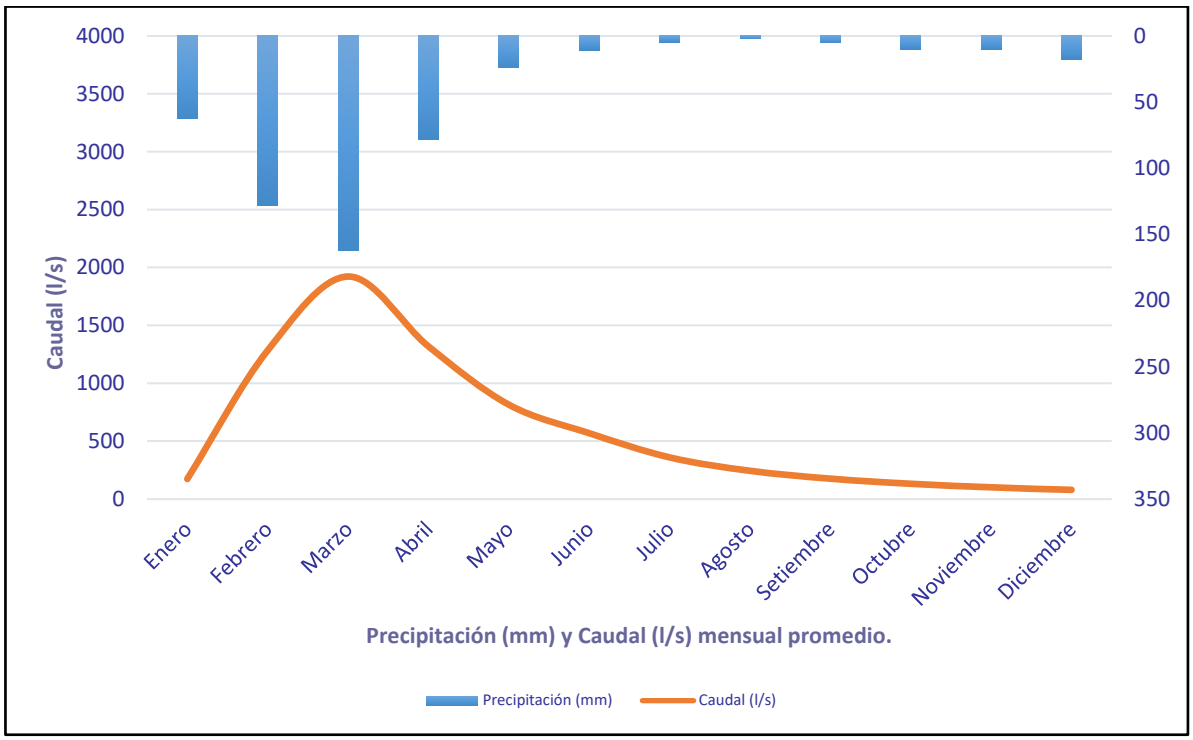
Parámetros (mm)	Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	62.7	128.1	162.1	78.5	24.2	11.0	4.7	2.1	5.2	10.0	10.3	17.9	516.8
Evapotranspiración (mm)	29.7	53.5	83.0	70.1	44.2	19.1	18.6	15.6	12.4	11.5	10.5	12.2	380.5
Escorrentía (mm)	0.9	13.3	19.6	6.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.5
Percolación (mm)	6.2	20.8	37.4	15.7	2.3	1.0	0.4	0.2	0.4	0.8	0.9	1.6	87.7
Recarga (mm)	1.3	1.6	3.6	6.0	7.1	6.2	5.3	4.1	3.0	2.4	1.8	1.5	43.8
Revaporación (Almacenamiento) (mm)	24.6	39.0	18.5	-19.9	-29.6	-15.3	-19.6	-17.8	-10.6	-4.8	-2.9	2.6	-35.7
Caudal (l/s)	174.4	1284.1	1922.8	1318.2	815.3	568.6	359.7	244.4	176.2	132.4	101.6	79.5	598.1

Figura 4-22: Mapa de Ubicación de Estaciones de Aforo

Tabla 4-49: Tasas que Explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 1

Relaciones entre Variables	Tasa
Caudal/Precipitación	0.14
Flujo Base/ Caudal Total	0.43
Escorrentía Superficial/Caudal Total	0.57
Percolación/Precipitación	0.17
Recarga del Acuífero Profundo/Precipitación	0.08
Evapotranspiración/Precipitación	0.74

Gráfico 4-41: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 1



Caudales Modelados por SWAT en la Subcuenca 1

La ubicación y los caudales promedio mensuales simulados y gráficos, obtenidos por la modelización en SWAT en la subcuenca, en el punto de aforo AF-01 (véase Figura 4-22 y Tabla 4-50), se muestran en la Tabla 4-51 y Gráfico 4-42, el cual nos muestra un caudal promedio de 598.1 l/s.

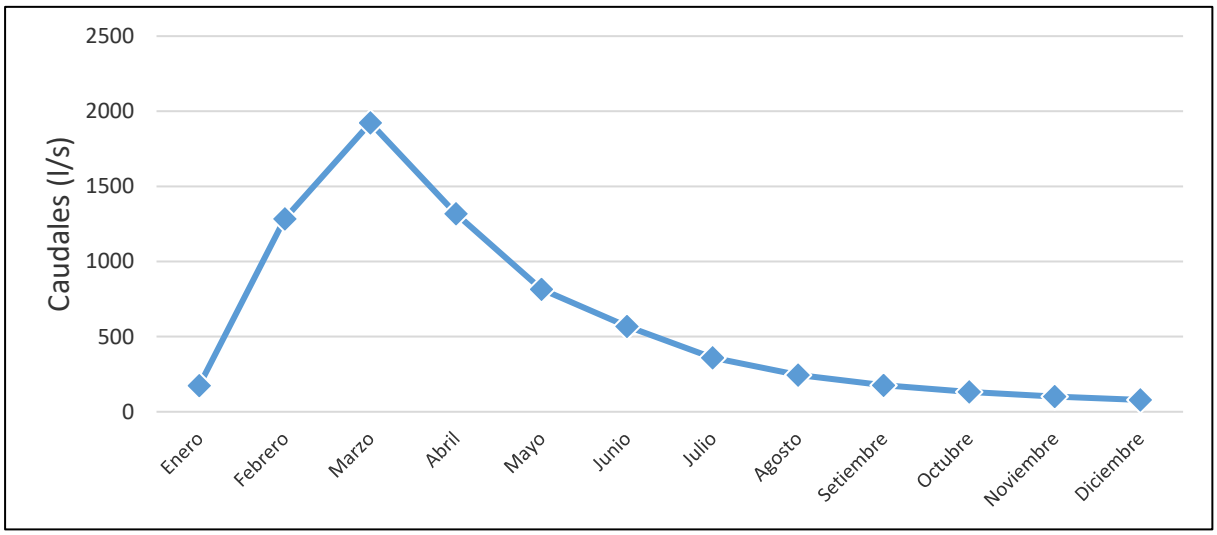
Tabla 4-50: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 1

Código	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Altitud (m)	Caudal (l/s)	Característica
	Este (m)	Norte (m)			
AF01	578359.9	9615720.8	6	598.1	Quebrada

Tabla 4-51: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1999-2018, en el Aforo de la Subcuenca 1

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
174.4	1284.1	1922.8	1318.2	815.3	568.6	359.7	244.4	176.2	132.4	101.6	79.5

Gráfico 4-42: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 1



Análisis del Balance de Agua en la Subcuenca 2

El resultado del balance hidrológico es presentado en la Tabla 4-52, Tabla 4-53 y el Gráfico 4-43, se tiene que en promedio la precipitación anual es 552.7 mm por año con una evapotranspiración de 397.3 mm por año, la escorrentía 54.1 mm por año, mientras que la recarga en promedio es de 36.9 mm por año, y el caudal en promedio es 8083.6 l/s. Siendo el mes de marzo el de mayor aporte.

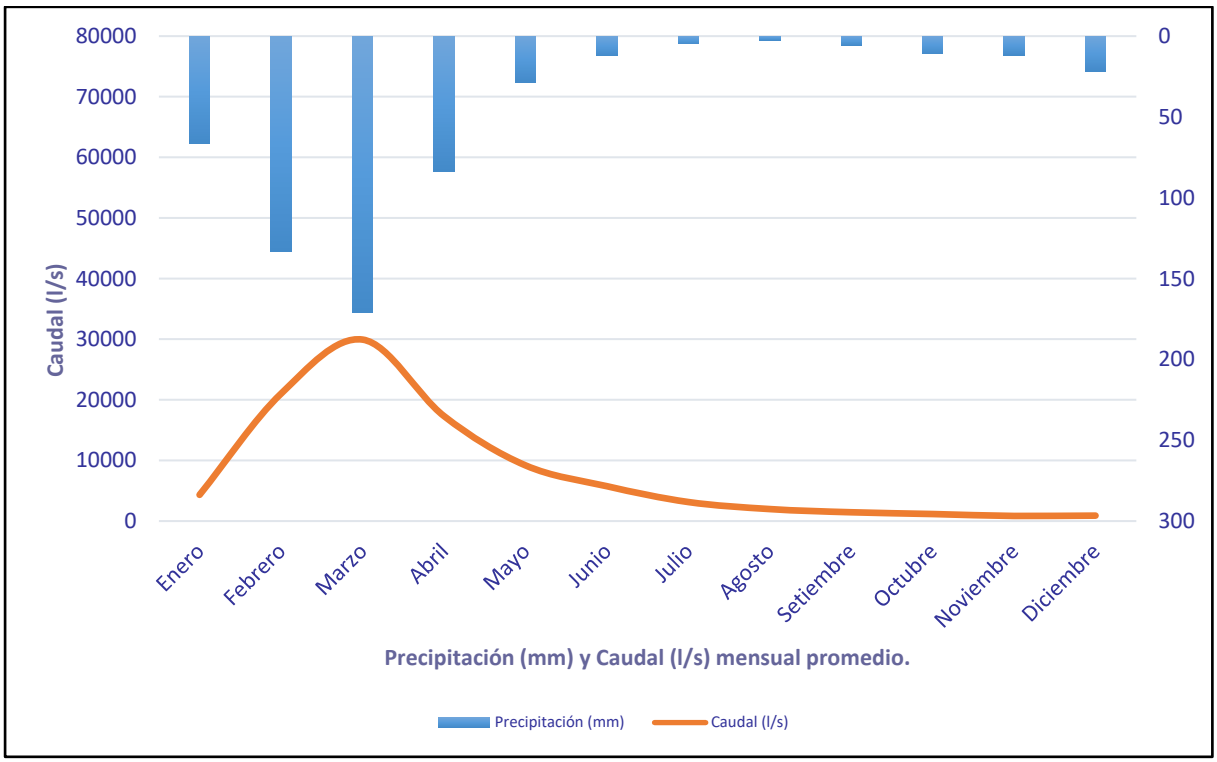
Tabla 4-52: Balance Hídrico en la Subcuenca 2

Parámetros (mm)	Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	66.6	133.2	171.0	83.5	28.4	12.2	4.8	2.6	5.8	10.9	12.1	21.8	552.7
Evapotranspiración (mm)	35.5	58.1	88.0	74.7	46.4	21.0	13.0	10.9	10.0	11.4	13.2	15.3	397.3
Escorrentía (mm)	3.0	18.5	23.5	8.3	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.1
Percolación (mm)	3.7	20.6	35.2	12.8	1.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	73.8
Recarga (mm)	0.8	1.0	2.9	5.4	6.3	5.5	4.5	3.5	2.5	1.9	1.4	1.1	36.9
Revaporación (Almacenamiento) (mm)	23.5	35.1	21.3	-17.6	-26.0	-14.6	-12.7	-11.8	-6.8	-2.5	-2.5	5.2	-9.4
Caudal (l/s)	4318.4	21023.0	29932.1	17312.9	9191.1	5741.0	3142.1	1978.3	1449.9	1157.4	852.0	905.4	8083.6

Tabla 4-53: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 2

Relaciones entre Variables	Tasa
Caudal/Precipitación	0.17
Flujo Base/ Caudal Total	0.42
Escorrentía Superficial/Caudal Total	0.58
Percolación/Precipitación	0.13
Recarga del Acuífero Profundo/Precipitación	0.07
Evapotranspiración/Precipitación	0.72

Gráfico 4-43: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 2



Caudales Modelados por SWAT en la Subcuenca 2

La ubicación y los caudales promedio mensuales simulados y gráficos, obtenidos por la modelización en SWAT en la microcuenca, en el punto de aforo AF-02 (véase Figura 4-22), se muestran en la Tabla 4-54, Tabla 4-55 y Gráfico 4-44, el cual muestra un caudal promedio de 8083.4 l/s.

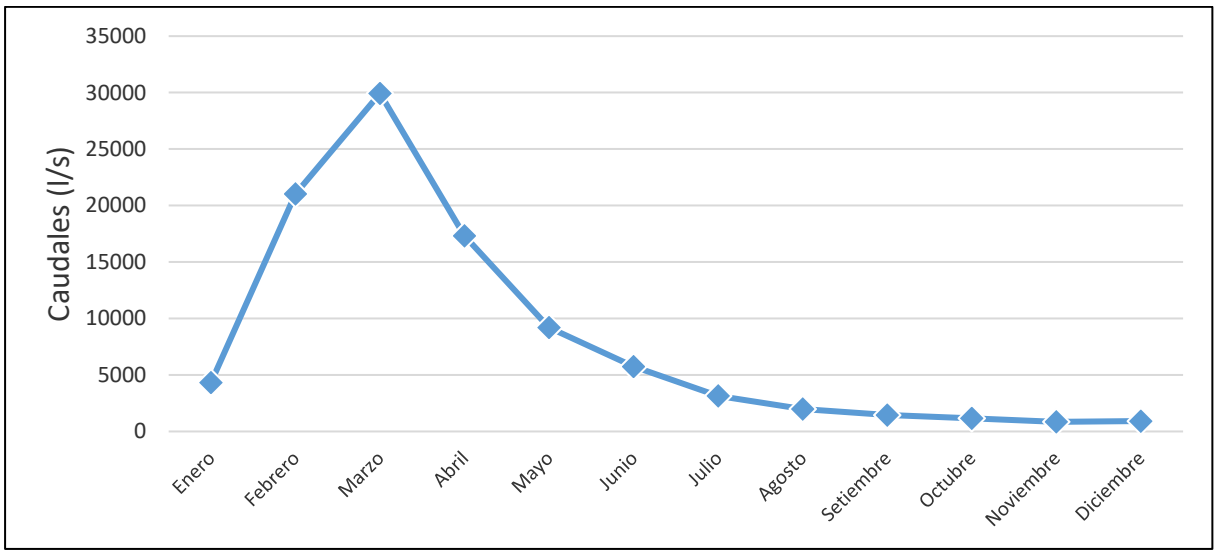
Tabla 4-54: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 2

Código	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Altitud (m)	Caudal (l/s)	Característica
	Este (m)	Norte (m)			
AF02	586485.3	9619816.2	7	8083.4	Quebrada

Tabla 4-55: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1999-2018, en el Aforo de la Subcuenca 2

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
4318.4	21023.0	29932.1	17312.9	9191.1	5741.0	3142.1	1978.3	1449.9	1157.4	852.0	905.4

Gráfico 4-44: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 2



Análisis del Balance de Agua en la Subcuenca 3

El resultado del balance hidrológico es presentado en la Tabla 4-56, Tabla 4-57 y el Gráfico 4-45, se tiene que en promedio la precipitación anual es 779.4 mm por año con una evapotranspiración de 439.6 mm por año, la escorrentía 147.6 mm por año, mientras que la recarga en promedio es de 52.5 mm por año, y el caudal en promedio es 1354.8 l/s. Siendo el mes de marzo el de mayor aporte.

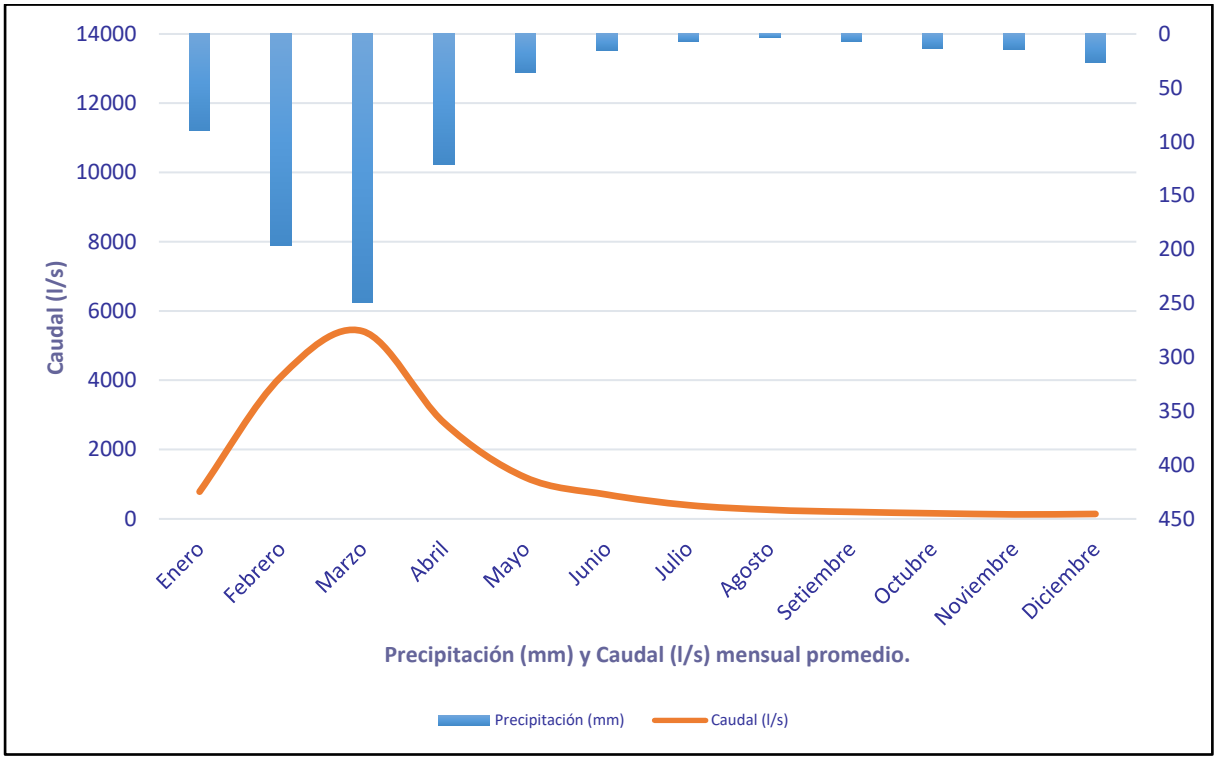
Tabla 4-56: Balance Hídrico en la Subcuenca 3

Parámetros (mm)	Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	90.1	196.3	249.0	121.2	35.7	15.0	7.2	3.5	7.2	13.3	14.6	26.2	779.4
Evapotranspiración (mm)	41.4	67.4	96.9	76.3	42.8	23.1	17.0	12.2	11.1	14.4	16.7	20.3	439.6
Escorrentía (mm)	7.1	49.5	67.4	22.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	147.6
Percolación (mm)	2.5	27.9	45.6	22.4	5.7	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	105.1
Recarga (mm)	1.2	1.3	3.8	7.0	8.8	7.9	6.7	5.2	3.8	3.0	2.1	1.6	52.5
Revaporación (Almacenamiento) (mm)	37.8	50.2	35.4	-6.4	-23.2	-16.6	-16.7	-14.0	-7.7	-4.1	-4.2	4.3	34.6
Caudal (l/s)	784.0	4106.9	5417.5	2773.5	1195.1	701.0	394.5	259.0	199.7	160.8	126.2	139.5	1354.8

Tabla 4-57: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 3

Relaciones entre variables	Tasa
Caudal/Precipitación	0.33
Flujo Base/ Caudal Total	0.43
Escorrentía Superficial/Caudal Total	0.57
Percolación/Precipitación	0.13
Recarga del Acuífero Profundo/Precipitación	0.07
Evapotranspiración/Precipitación	0.56

Gráfico 4-45: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 3



Caudales Modelados por SWAT en la Subcuenca 3

La ubicación y los caudales promedio mensuales simulados y gráficos, obtenidos por la modelización en SWAT en la microcuenca, en el punto de aforo AF-03 (véase Figura 4-22), se muestran en la Tabla 4-58, Tabla 4-59 y Gráfico 4-46, el cual nos muestra un caudal promedio de 1354.8 l/s.

Tabla 4-58: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 3

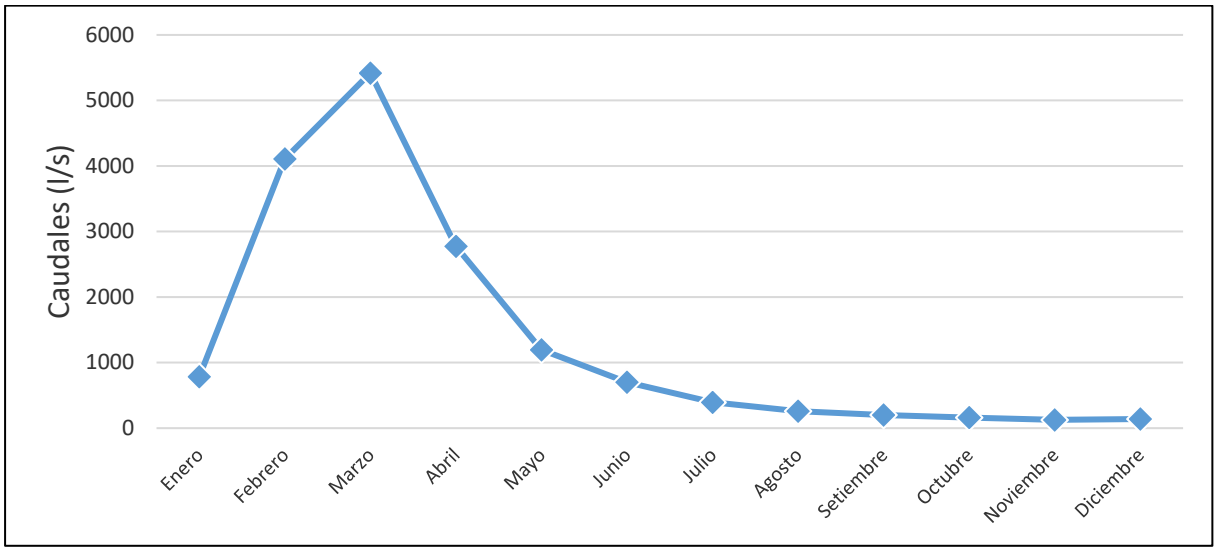
Código	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Altitud (m)	Caudal (l/s)	Característica
	Este (m)	Norte (m)			
AF03	588791.6	9592249.0	48	1354.8	Quebrada

Tabla 4-59: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1998-2017, en el Aforo de la Subcuenca 3

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic

784.0	4106.9	5417.5	2773.5	1195.1	701.0	394.5	259.0	199.7	160.8	126.2	139.5

Gráfico 4-46: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 3



Análisis del Balance de Agua en la Subcuenca 4

El resultado del balance hidrológico es presentado en la Tabla 4-60, Tabla 4-61 y Gráfico 4-47, se tiene que en promedio la precipitación anual es 554.9 mm por año con una evapotranspiración de 389.6 mm por año, la escorrentía 57.9 mm por año, mientras que la recarga en promedio es de 46.4 mm por año, y el caudal en promedio es 4589.0 l/s. Siendo el mes de marzo el de mayor aporte.

Tabla 4-60: Balance Hídrico en la Subcuenca 4

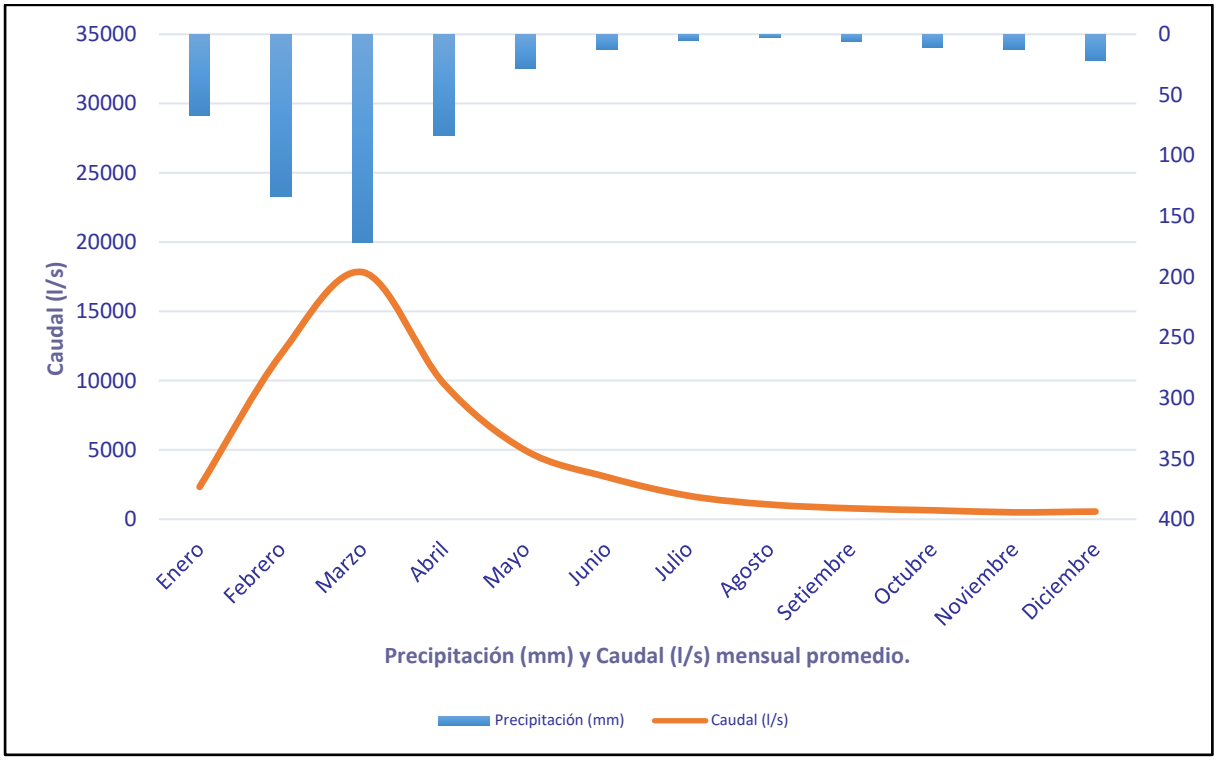
Parámetros (mm)	Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	66.8	133.8	171.7	83.8	28.5	12.2	4.8	2.6	5.8	10.9	12.1	21.9	554.9
Evapotranspiración (mm)	36.2	59.0	87.8	75.1	46.1	20.5	10.9	8.3	7.7	10.2	12.9	15.0	389.6
Escorrentía (mm)	3.0	20.7	24.5	7.9	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	57.0
Percolación (mm)	3.3	29.3	45.2	13.9	0.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.8
Recarga (mm)	1.0	1.2	3.8	6.9	8.1	6.9	5.7	4.3	3.1	2.4	1.7	1.3	46.4
Revaporación (Almacenamiento) (mm)	23.4	23.6	10.4	-20.0	-27.1	-15.5	-11.8	-10.0	-5.1	-1.7	-2.5	5.5	-30.7
Caudal (l/s)	2326.5	11901.4	17833.5	9768.4	4965.3	3047.6	1693.5	1054.6	784.7	644.1	495.4	553.2	4589.0

Tabla 4-61: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 4

Relaciones entre variables	Tasa
Caudal/Precipitación	0.16
Flujo Base/ Caudal Total	0.35
Escorrentía Superficial/Caudal Total	0.65

Relaciones entre variables	Tasa
Percolación/Precipitación	0.17
Recarga del Acuífero Profundo/Precipitación	0.08
Evapotranspiración/Precipitación	0.70

Gráfico 4-47: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 4



Caudales Modelados por SWAT en la Subcuenca 4

La ubicación y los caudales promedio mensuales simulados y gráficos, obtenidos por la modelización en SWAT en la microcuenca, en el punto de aforo AF-04 (véase Figura 4-22), se muestran en la Tabla 4-62, Tabla 4-63 y Gráfico 4-48 el cual nos muestra un caudal promedio de 4589.0 l/s.

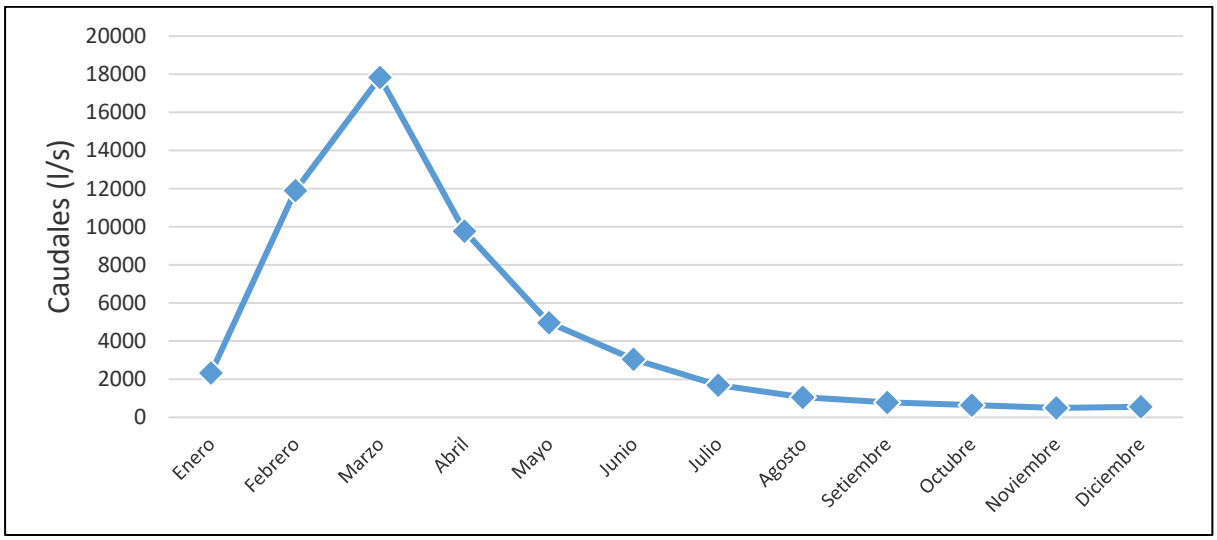
Tabla 4-62: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 4

Código	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Altitud (m)	Caudal (l/s)	Característica
	Este (m)	Norte (m)			
AF04	590203	9595760	41	4589.0	Quebrada

Tabla 4-63: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1998-2018, en el Aforo de la Subcuenca 4

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2326.5	11901.4	17833.5	9768.4	4965.3	3047.6	1693.5	1054.6	784.7	644.1	495.4	553.2

Gráfico 4-48: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 4



Análisis del Balance de Agua en la Subcuenca 5

El resultado del balance hidrológico es presentado en la Tabla 4-64, Tabla 4-65 y el Gráfico 4-49, se tiene que en promedio la precipitación anual es 918.8 mm por año con una evapotranspiración de 446.6 mm por año, la escorrentía 201.9 mm por año, mientras que la recarga en promedio es de 88.87.0 mm por año, y el caudal en promedio es 3186.1 l/s. Siendo el mes de marzo el de mayor aporte.

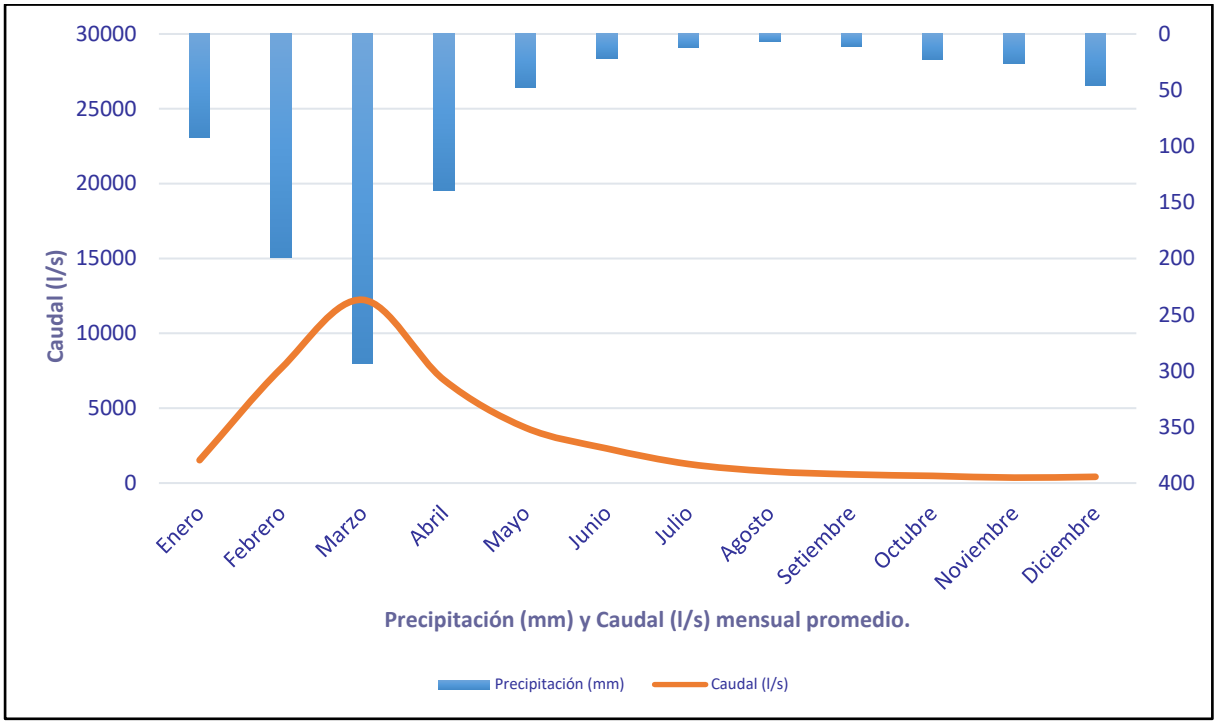
Tabla 4-64: Balance Hídrico en la Subcuenca 5

Parámetros (mm)	Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	92.2	199.3	293.3	139.1	47.5	22.0	12.3	6.8	11.0	22.6	26.7	46.0	918.8
Evapotranspiración (mm)	43.8	54.1	83.6	67.1	45.4	25.8	20.1	15.8	15.7	20.2	25.2	29.9	446.6
Escorrentía (mm)	9.1	59.4	98.1	30.6	4.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	201.9
Percolación (mm)	9.8	39.8	70.1	42.2	11.8	2.3	0.5	0.1	0.0	0.2	0.1	1.0	177.9
Recarga (mm)	2.2	2.6	6.3	11.3	14.4	13.3	11.5	9.0	6.6	5.1	3.7	2.8	88.8
Revaporación (Almacenamiento) (mm)	27.4	43.4	35.2	-12.1	-28.1	-19.3	-19.8	-18.1	-11.4	-3.0	-2.3	12.0	3.7
Caudal (l/s)	1527.3	7661.3	12243.6	6886.8	3705.7	2306.8	1277.8	782.2	577.3	479.7	369.1	415.4	3186.1

Tabla 4-65: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 5

Relaciones entre variables	Tasa
Caudal/Precipitación	0.39
Flujo Base/ Caudal Total	0.44
Escorrentía Superficial/Caudal Total	0.56
Percolación/Precipitación	0.19
Recarga del Acuífero Profundo/Precipitación	0.10
Evapotranspiración/Precipitación	0.49

Gráfico 4-49: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 5



Caudales Modelados por SWAT en la Subcuenca 5

La ubicación y los caudales promedio mensuales simulados y gráficos, obtenidos por la modelización en SWAT en la microcuenca, en el punto de aforo AF-05 (véase Figura 4-22), se muestran en la Tabla 4-66, Tabla 4-67 y Gráfico 4-50, el cual nos muestra un caudal promedio de 3186.1 l/s.

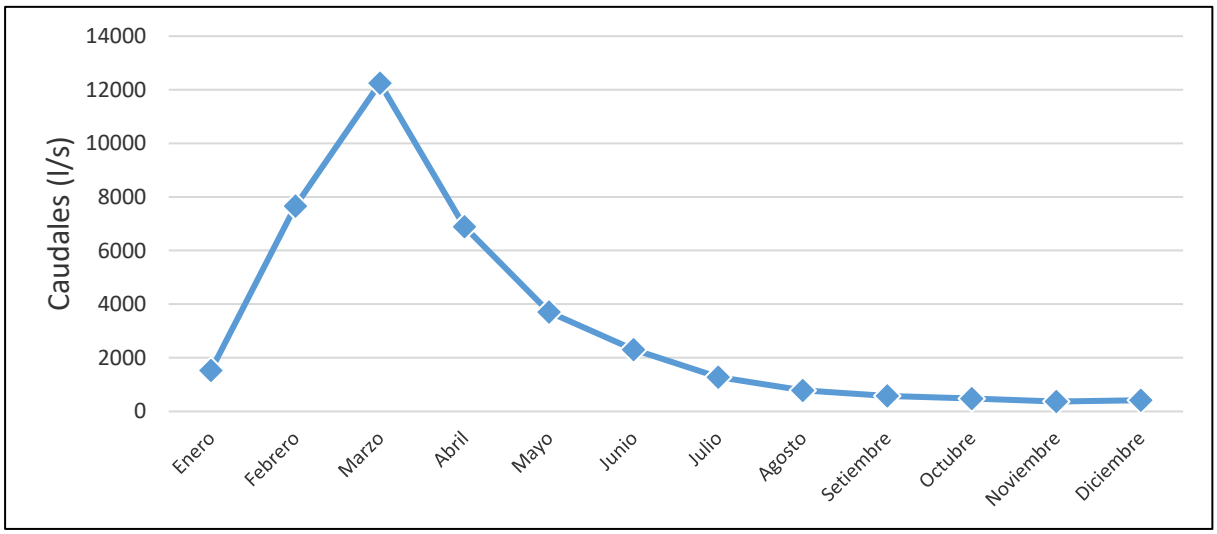
Tabla 4-66: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 5

Código	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Altitud (m)	Caudal (l/s)	Característica
	Este (m)	Norte (m)			
AF05	588845	9592263.6	53	3186.1	Quebrada

Tabla 4-67: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 1999-2018, en el Aforo de la Subcuenca 5

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1527.3	7661.3	12243.6	6886.8	3705.7	2306.8	1277.8	782.2	577.3	479.7	369.1	415.4

Gráfico 4-50: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 5



Análisis del Balance de Agua en la Subcuenca 6

El resultado del balance hidrológico es presentado en la Tabla 4-68, Tabla 4-68 y el Gráfico 4-51, se tiene que en promedio la precipitación anual es 722.2 mm por año con una evapotranspiración de 375.7 mm por año, la escorrentía 123 mm por año, mientras que la recarga en promedio es de 75.6 mm por año, y el caudal en promedio es 2604.4 l/s. Siendo el mes de marzo el de mayor aporte.

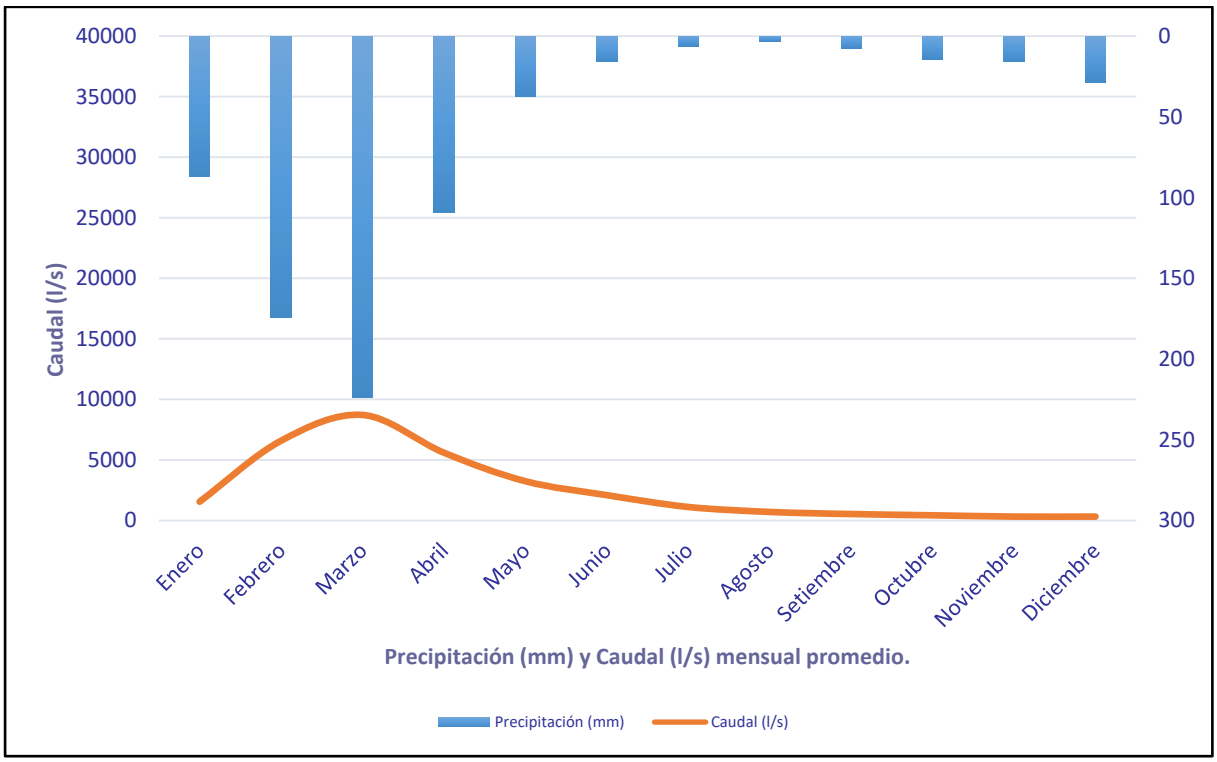
Tabla 4-68: Balance Hídrico en la Subcuenca 6

Parámetros (mm)	Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	87.0	174.1	223.5	109.0	37.1	15.9	6.2	3.4	7.5	14.2	15.8	28.5	722.2
Evapotranspiración (mm)	36.9	50.7	77.0	60.8	40.5	20.5	14.6	11.7	12.1	14.6	16.9	19.3	375.7
Escorrentía (mm)	7.9	41.4	52.0	18.6	2.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	123.0
Percolación (mm)	9.0	39.6	62.7	30.2	8.3	1.3	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	151.5
Recarga (mm)	1.7	2.2	5.8	10.2	12.5	11.2	9.6	7.4	5.4	4.2	3.0	2.3	75.6
Revaporación (Almacenamiento) (mm)	31.5	40.1	26.0	-10.8	-26.5	-17.8	-18.1	-15.7	-10.1	-4.7	-4.2	6.7	-3.6
Caudal (l/s)	1553.3	6588.5	8719.1	5600.6	3248.3	2096.4	1120.4	711.9	535.3	432.6	323.5	323.3	2604.4

Tabla 4-69: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 6

Relaciones entre Variables	Tasa
Caudal/Precipitación	0.34
Flujo Base/ Caudal Total	0.50
Escorrentía Superficial/Caudal Total	0.50
Percolación/Precipitación	0.21
Recarga del Acuífero Profundo/Precipitación	0.10
Evapotranspiración/Precipitación	0.52

Gráfico 4-51: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 6



Caudales Modelados por SWAT en la Subcuenca 6

La ubicación y los caudales promedio mensuales simulados y gráficos, obtenidos por la modelización en SWAT en la microcuenca, en el punto de aforo AF-06 (véase Figura 4-22), se muestran en la Tabla 4-70, Tabla 4-71 y Gráfico 4-52, el cual nos muestra un caudal promedio de 2604.4 l/s.

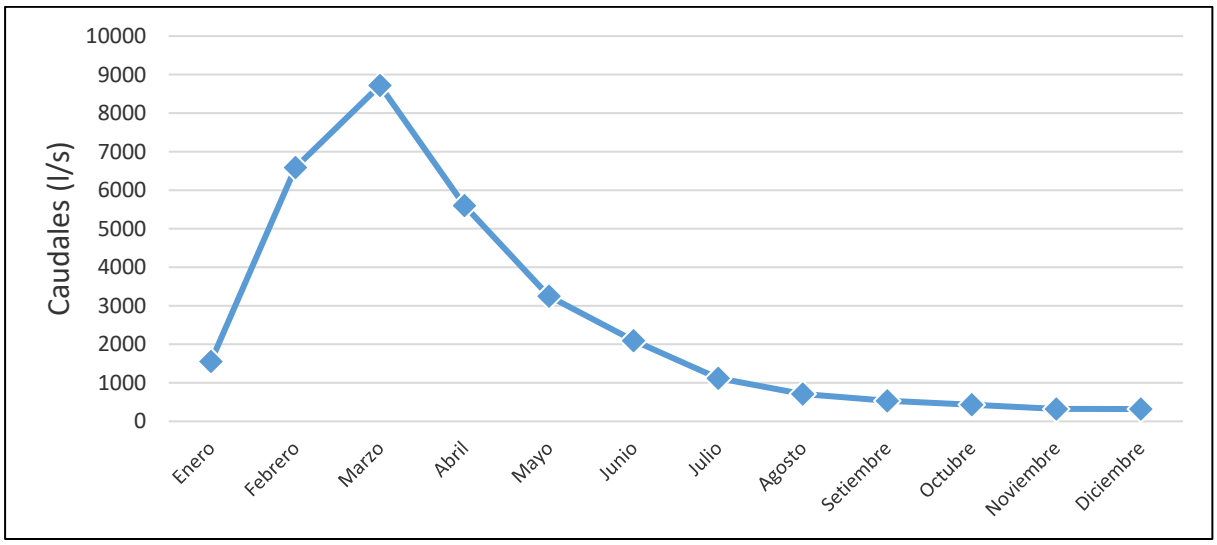
Tabla 4-70: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 6

Código	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Altitud (m)	Caudal (l/s)	Característica
	Este (m)	Norte (m)			
AF06	590279	9595781	44	2604.4	Quebrada

Tabla 4-71: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 2001-2018, en el Aforo de la Subcuenca 6

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1553.3	6588.5	8719.1	5600.6	3248.3	2096.4	1120.4	711.9	535.3	432.6	323.5	323.3

Gráfico 4-52: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 6



Análisis del Balance de Agua en la Subcuenca 7

El resultado del balance hidrológico es presentado en la Tabla 4-72, Tabla 4-73 y el Gráfico 4-53, se tiene que en promedio la precipitación anual es 422.2 mm por año con una evapotranspiración de 418.3 mm por año, la escorrentía 1.3 mm por año, mientras que la recarga en promedio es de 0.3 mm por año, y el caudal en promedio es 5.4 l/s. Siendo el mes de marzo el de mayor aporte.

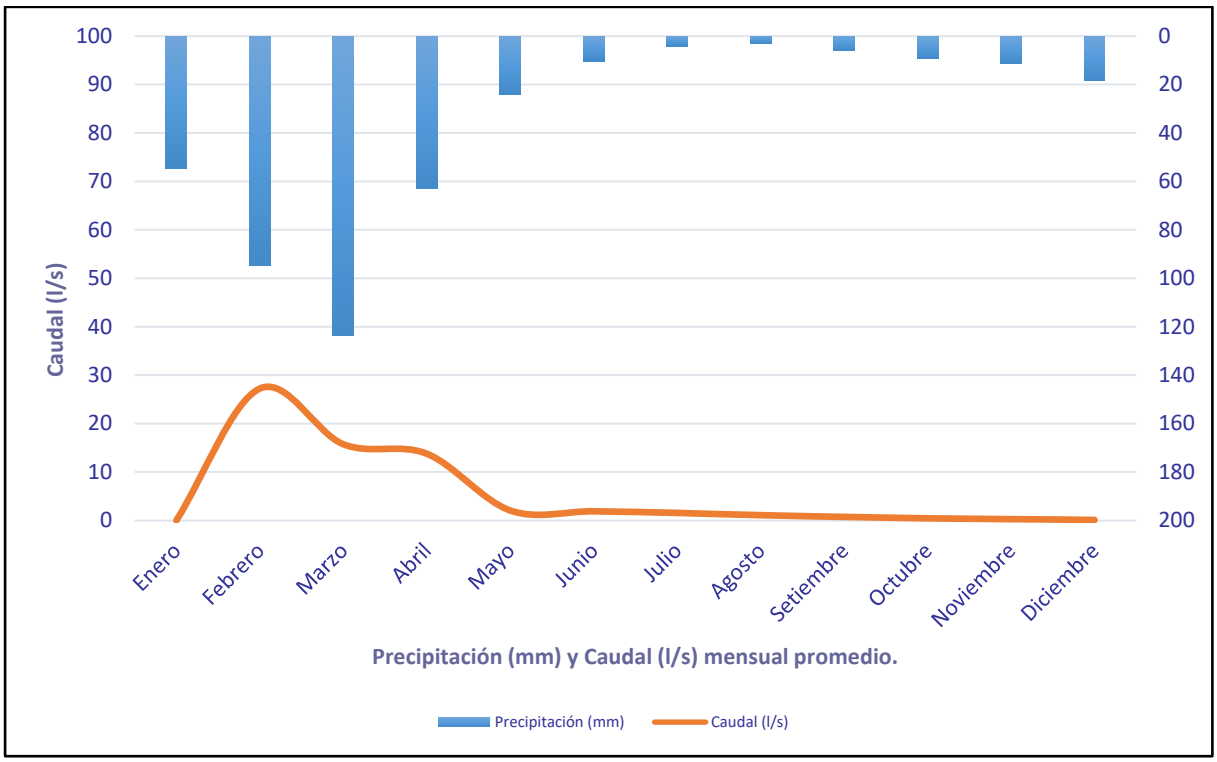
Tabla 4-72: Balance Hídrico en la Subcuenca 7

Parámetros (mm)	Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	54.6	94.7	123.8	62.9	24.0	10.5	4.2	2.9	5.8	9.3	11.1	18.4	422.2
Evapotranspiración (mm)	34.7	58.2	93.0	76.6	47.0	20.5	19.5	17.3	13.5	11.9	12.1	13.9	418.3
Escorrentía (mm)	0.0	0.6	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
Percolación (mm)	0.0	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
Recarga (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Revaporación (Almacenamiento) (mm)	19.9	35.9	30.3	-14.6	-23.1	-10.1	-15.4	-14.5	-7.7	-2.5	-1.0	4.5	1.8
Caudal (l/s)	0.0	27.3	15.7	13.8	2.1	1.9	1.6	1.1	0.7	0.5	0.3	0.1	5.4

Tabla 4-73: Tasas que explican el Balance Hidrológico en Términos Globales en la Subcuenca 7

Relaciones entre variables	Tasa
Caudal/Precipitación	0.00
Flujo Base/ Caudal Total	0.22
Escorrentía Superficial/Caudal Total	0.78
Percolación/Precipitación	0.00
Recarga del Acuífero Profundo/Precipitación	0.00
Evapotranspiración/Precipitación	0.99

Gráfico 4-53: Precipitación vs. Caudal Mensual Promedio en el Área de Estudio - Subcuenca 7



Caudales Modelados por SWAT en la Subcuenca 7

La ubicación y los caudales promedio mensuales simulados y gráficos, obtenidos por la modelización en SWAT en la microcuenca, en el punto de aforo AF-07 (véase Figura 4-22), se muestran en la Tabla 4-74, Tabla 4-75 y Gráfico 4-54, el cual nos muestra un caudal promedio de 5.4 l/s.

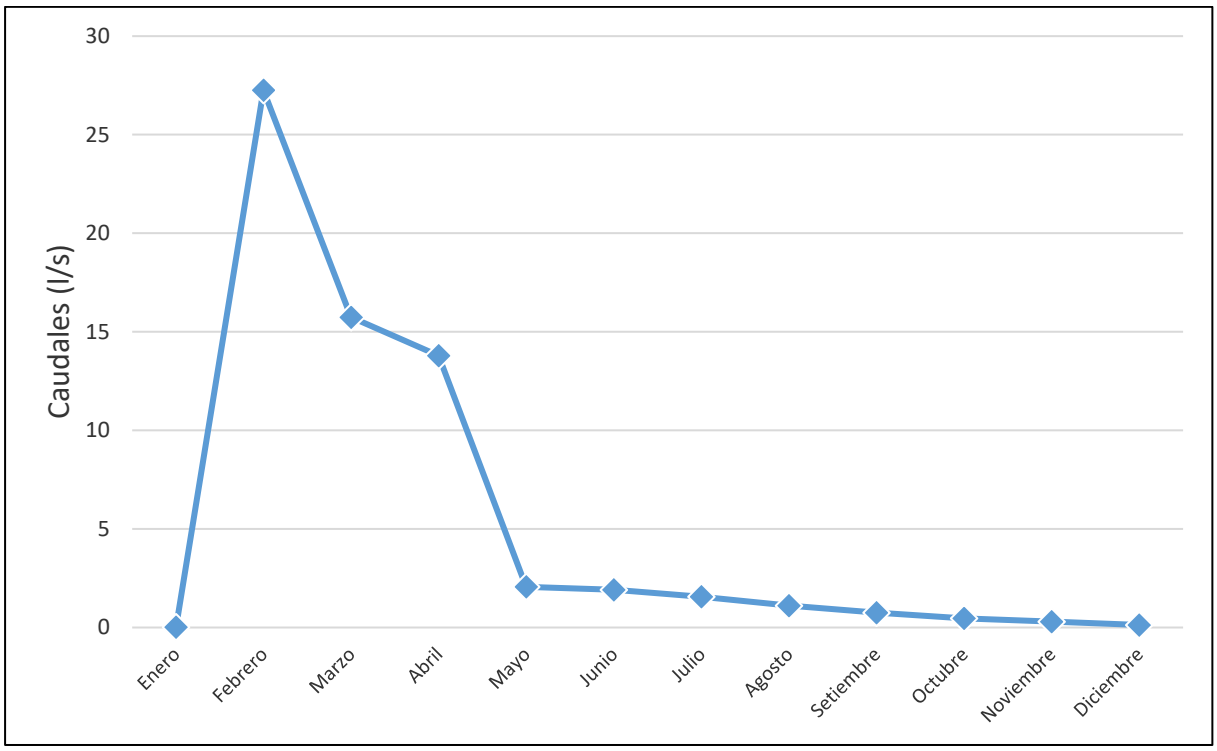
Tabla 4-74: Ubicación de Aforo de la Subcuenca 7

Código	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Altitud (m)	Caudal (l/s)	Característica
	Este (m)	Norte (m)			
AF07	592485	9620211	5	5.4	Quebrada

Tabla 4-75: Caudales Promedios Mensuales (l/s) periodo 2001-2018, en el Aforo de la Subcuenca 7

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
0.0	27.3	15.7	13.8	2.1	1.9	1.6	1.1	0.7	0.5	0.3	0.1

Gráfico 4-54: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT en la Subcuenca 7



4.8.2.4 Balance Hidrológico del Área Total de Estudio

La Tabla 4-76 presenta el balance hídrico estimado para todo el área de estudio; mientras que las tablas 4-77, 4-78 y 4-79 presentan el detalle de las entradas y salidas de agua, y la recarga al acuífero en el área de estudio. Se observa una precipitación total estimada de 773 639 546.45 m^3/año, que es el volumen de aporte en metros cúbicos por año al área de estudio.

Tabla 4-76: Balance Hídrico del Área de Estudio

Parámetro	Volumen (m^3/año)	Volumen (m^3/año)	(%)	(%)
Precipitación	773 639 546.45		100.00	
Evapotranspiración		468 071 781.55		60.50
Escorrentía		118 327 044.03		15.29
Percolación		127 433 326.79		16.47
Recarga		63 627 265.82		8.22
Revaporación (Almacenamiento)		-3 819 871.74		-0.49
Total	**773 639 546.45**	**773 639 546.45**	**100.00**	**100.00**

Además, según se ha indicado en metodología de la simulación:

Rendimiento de Agua = Escorrentía + Flujo Lateral + Flujo de Retorno + Recarga

Por lo tanto, se muestran los volúmenes de estos parámetros en la Tabla 4-77.

Tabla 4-77: Volumen del Rendimiento de Agua

Parámetro	Volumen (m^3/año)	Volumen (m^3/año)	(%)	(%)
Rendimiento de Agua	279 455 658.88		100.00	
Escorrentía		118 327 044.03		15.29
Flujo de Lateral		58 340 360.62		7.54
Flujo de Retorno		39 160 988.40		5.06
Recarga		63 627 265.82		8.22
Total	**279 455 658.88**	**279 455 658.88**	**100.00**	**36.11**

Tabla 4-78: Entradas de Agua Superficial

Parámetro	Volumen (m^3/año)
Escorrentía Promedio	118 327 044.03
Flujo Lateral Promedio	58 340 360.62
Flujo de Retorno	39 160 988.40
Total Volumen (m^3/año)	**215 828 393.06**

Tabla 4-79: Entradas al Agua Subterránea

Parámetro	Volumen (m^3/año)
Entradas al Acuífero (Recarga)	63 627 265.82
Total Volumen (m^3/año)	**63 627 265.82**

4.8.3 Caudales Modelados y Caudales Observados

No se ha identificado una red hidrométrica vigente ya sea en el sector peruano o ecuatoriano; sin embargo, se dispone de un punto de aforo con data consistente que corresponde al punto de aforo denominado Puente Bolsico, en adelante “Puente Bolsico Observado”, cuya ubicación se presenta en la Tabla 4-80 y en la Figura 4-22.

Se han obtenido, por el modelamiento en ArcSwat, los promedios mensuales (periodo 1999-2018), en la localización del aforo mencionado, denominándose a este “Puente Bolsico Modelado”. Los promedios mensuales para el punto Puente Bolsico Modelado se presentan en la Tabla 4-81, juntamente con los medidos en el punto Puente Bolsico Observado, y fueron usados para calibrar el modelo.

Tabla 4-80: Ubicación de Aforo de la Subcuencas de Estudio

Código de Aforo	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 17 s)		Lugar de Escorrentía
	Este (m)	Norte (m)	
Puente Bolsico Observado	583352	9615509	Quebrada Zarumilla

Tabla 4-81: Caudales Promedios Mensuales (m^3/s) Observados y Modelados para el Periodo 1999-2018 en el Aforo Puente Bolsico

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Puente Bolsico Observado	3.65	16.50	24.75	23.25	11.35	5.35	2.90	1.35	0.75	0.30	0.10	0.95	7.60
Puente Bolsico Modelado	4.218	21.983	30.926	16.368	7.919	4.809	2.684	1.762	1.297	1.031	0.757	0.817	7.881

Los caudales observados y simulados completos para el periodo 1999-2018 se presentan en el Anexo I-D.

De la Tabla 4-81**,** vemos que los promedios Puente Bolsico Observado y Puente Bolsico Modelado son 7.60 y 7.88 m^3/s, respectivamente, lo cual es bastante bueno por ser muy similares. Además, el coeficiente de determinación, obtenido de la regresión lineal entre los promedios mensuales de caudal de Puente Bolsico Observado y Puente Bolsico Modelado mostrado en el Gráfico 4-55, indican una bondad de ajuste buena, en este caso $R^2 = 0.881$.

El análisis por observación según el Gráfico 4-56, y estadístico obtenido por regresión lineal, (véase Gráfico 4-55), indican que las series de promedios mensuales de las estaciones de aforo observado y modelado son similares y equivalentes.

Gráfico 4-55: Regresión Lineal entre Caudales Modelados vs. Observados

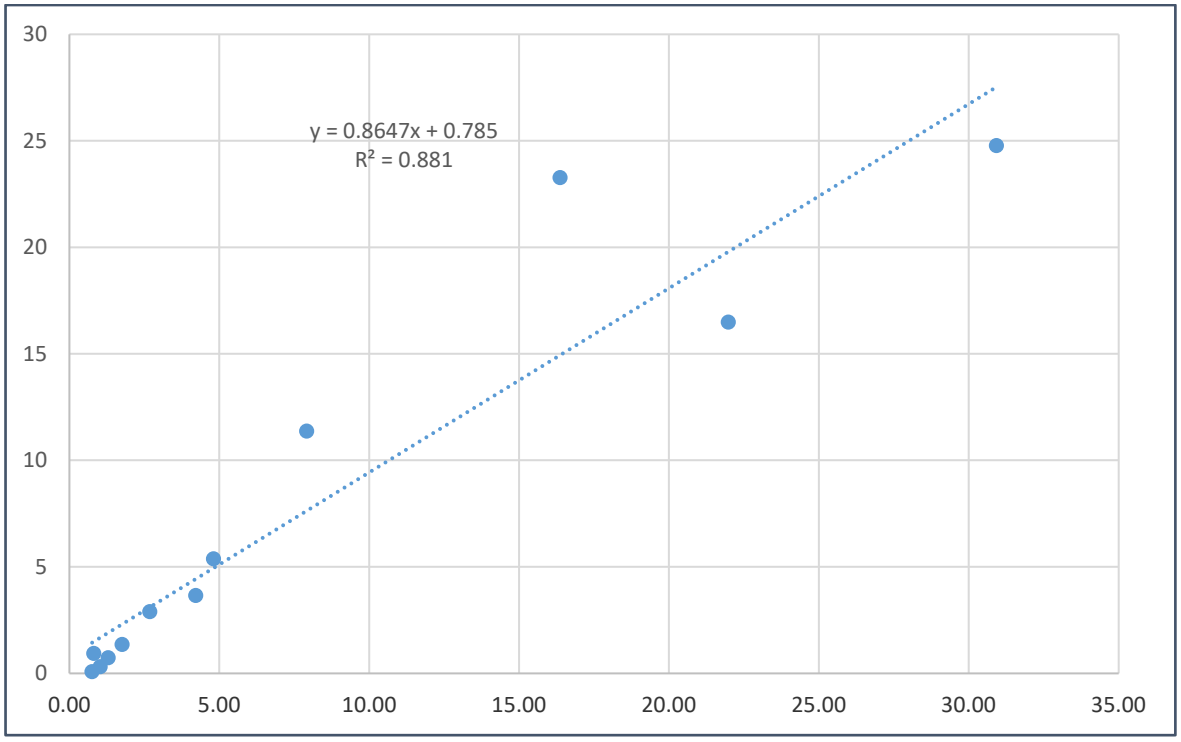
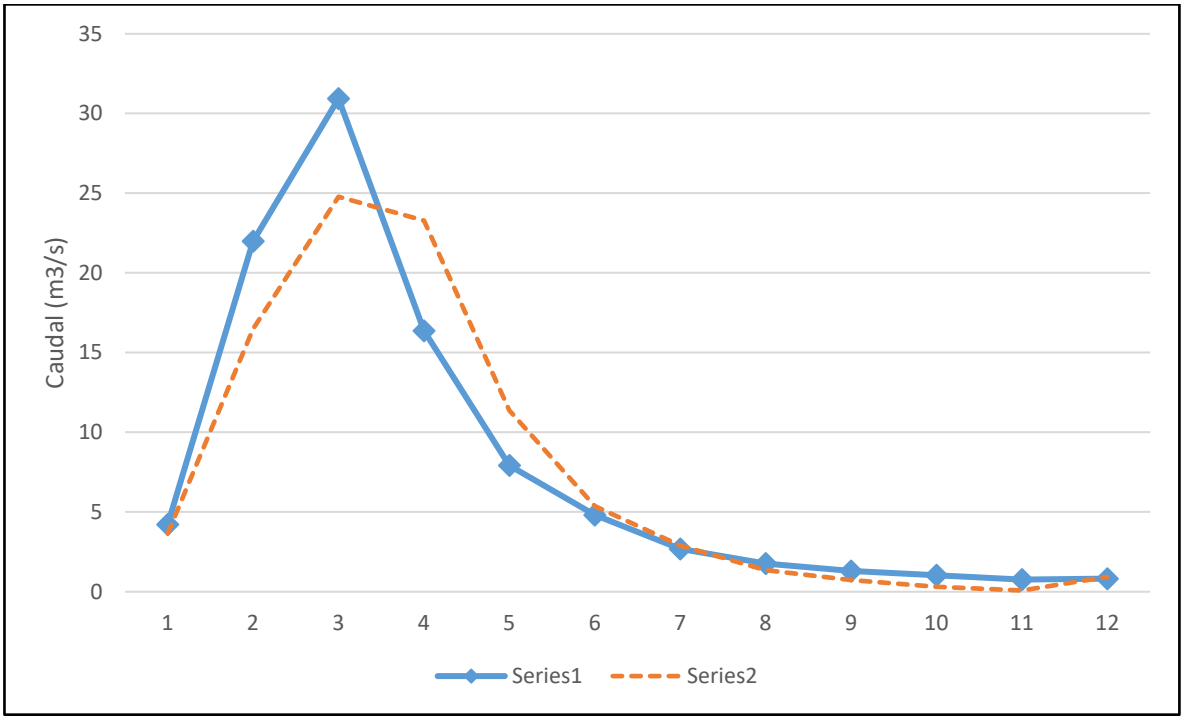


Gráfico 4-56: Caudales Promedio Mensuales Generados por el Modelo SWAT (Serie 1) versus Caudales Promedio Observados (Serie 2) en el Aforo Puente Bolsico



4.8.4 Análisis de Máximas Avenidas

4.8.4.1 Precipitación máxima en 24 Horas con Diferentes Periodos de Retorno

En base a la serie de precipitación de las 11 estaciones GPM (véase Tabla 4-82) del área de estudio, se obtiene la precipitación máxima probable (PMP).

Tabla 4-82: Ubicación de Estaciones GPM Alrededor del Área del Estudio

Estación	País	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)
Arenillas_GPM	Ecuador	-80.06	-3.54	26
La Cuca_GPM	Ecuador	-80.08	-3.50	32
Palmales_GPM	Perú	-80.10	-3.67	120
Quebrada Seca_GPM	Ecuador	-80.18	-3.67	80
Chahuarhuaico_GPM	Ecuador	-80.31	-4.02	290
El Limo_GPM	Ecuador	-80.13	-3.99	1156
Puyango_GPM	Ecuador	-80.08	3.90	305
Cabo Inga_GPM	Perú	-80.40	-3.98	237
Matapalo_GPM	Perú	-80.20	-3.68	118
Papayal_GPM	Perú	-80.23	-3.57	50
Rica Playa_GPM	Perú	-80.51	-3.81	61

De cada estación se obtuvieron los máximos valores de precipitación, para determinar el máximo valor anual, con los cuales se obtiene la información mostrada en la Tabla 4-83.

La Tabla 4-83 muestra que la estación de precipitación El Limo es la estación con mayor precipitación máxima (224.7 mm).

En base a la precipitación máxima diaria anual de la estación El Limo, que tiene 20 datos máximos anuales (periodo 1999-2018), se procedió a obtener la precipitación máxima probable (PMP) para diversos periodos de retorno.

Se aplicó el *test* de Shapiro-Wilk para determinar si estos datos provienen de una distribución normal.

Para determinar si estos datos provienen de una distribución normal, se realizó un análisis utilizando el software estadístico SPSS, desarrollado por la IBM, cuyo resultado se muestra en la Tabla 4-84, indica que la significancia asintótica para la estación es mayor a 0.05, lo cual significa que los datos de precipitación son uniformes; siendo el valor de significancia para el caso de estudio, de 5%, por lo que la distribución de esta variable es normal. Así estos datos pueden ser probados con otros ajustes estadísticos (Normal, Log Normal, Gumbel, Log Gumbel, Gamma).

La serie de precipitación de máximas anuales con 20 datos fue ajustada a diferentes modelos probabilísticos (Normal, Log Normal, Gamma, Gumbel, y Log Gumbel) a través del software Hidroesta 2. En la Tabla 4-85, se aprecia que el mejor modelo de distribución probabilístico para los datos de precipitación de la estación El Limo, según sus deltas teóricos es “Log Normal 2 Parámetros”.

Tabla 4-83: Precipitaciones GPM Máximas en 24 horas por el Periodo 1999 – 2018

Año	Arenillas	La Cuca	Palmales	Quebrada Seca	Chahuarhuaico	El Limo	Puyango	Cabo Inga	Matapalo	Papayal	Rica Playa
1999	73.6	47.6	71.7	55.2	122.8	142.7	65.8	118.5	78.4	62.9	88.9
2000	44.1	47.7	58.3	44.9	76.4	106.8	77.3	99.2	73.5	53.7	124.5
2001	74.1	40.4	80.0	61.6	104.8	139.4	62.6	106.9	102.8	48.6	75.5
2002	84.2	63.6	134.7	103.6	108.3	138.4	67.2	78.6	113.0	116.8	84.8
2003	39.9	20.2	47.1	36.3	59.1	101.1	44.3	50.2	53.7	44.3	30.7
2004	55.6	30.0	62.6	48.2	75.3	83.9	50.3	62.9	61.6	46.1	48.2
2005	73.6	47.6	71.7	55.2	122.8	142.7	65.8	118.5	78.4	62.9	88.9
2006	44.1	47.7	58.3	44.9	76.4	106.8	77.3	99.2	73.5	53.7	124.5
2007	55.0	27.2	57.7	44.4	56.8	161.9	53.3	100.0	67.9	48.9	62.1
2008	49.8	34.4	59.1	45.5	164.3	224.7	193.0	108.2	97.7	56.0	65.4
2009	62.9	29.5	60.0	46.2	67.8	85.5	52.6	61.0	53.9	32.5	51.9
2010	124.3	65.0	158.4	121.9	89.5	181.2	108.5	84.6	163.7	123.0	59.6
2011	84.1	60.5	80.4	61.8	67.8	108.3	43.7	79.5	98.3	65.7	72.6
2012	53.8	36.1	60.6	46.6	98.9	149.5	89.6	77.3	72.6	48.2	55.4
2013	55.2	36.6	59.7	45.9	70.6	106.1	56.6	74.3	67.6	43.1	36.0
2014	38.8	33.3	47.9	36.8	107.2	114.2	47.8	81.4	32.6	53.1	53.5
2015	69.8	48.0	71.5	55.0	162.9	195.3	107.8	187.4	93.2	68.5	91.4
2016	133.3	74.1	118.7	91.3	126.0	192.3	84.7	175.4	129.5	87.3	147.4
2017	54.6	27.3	55.8	42.9	78.0	133.1	47.7	93.6	62.7	46.0	81.9
2018	30.3	27.9	35.2	27.1	42.4	69.4	67.8	46.1	38.4	26.5	26.3
Máximo	**133.3**	**74.1**	**158.4**	**121.9**	**164.3**	**224.7**	**193.0**	**187.4**	**163.7**	**123.0**	**147.4**

Tabla 4-84: Resultados del *Test* de Bondad Shapiro-Wilk para los Datos de Precipitación Máxima 24 horas

Estación	Estadístico	Número de datos	Significancia Asintótica
El Limo	0.943	20	0.248

Tabla 4-85:Resultados del Ajuste de los Distintos Modelos Probabilísticos

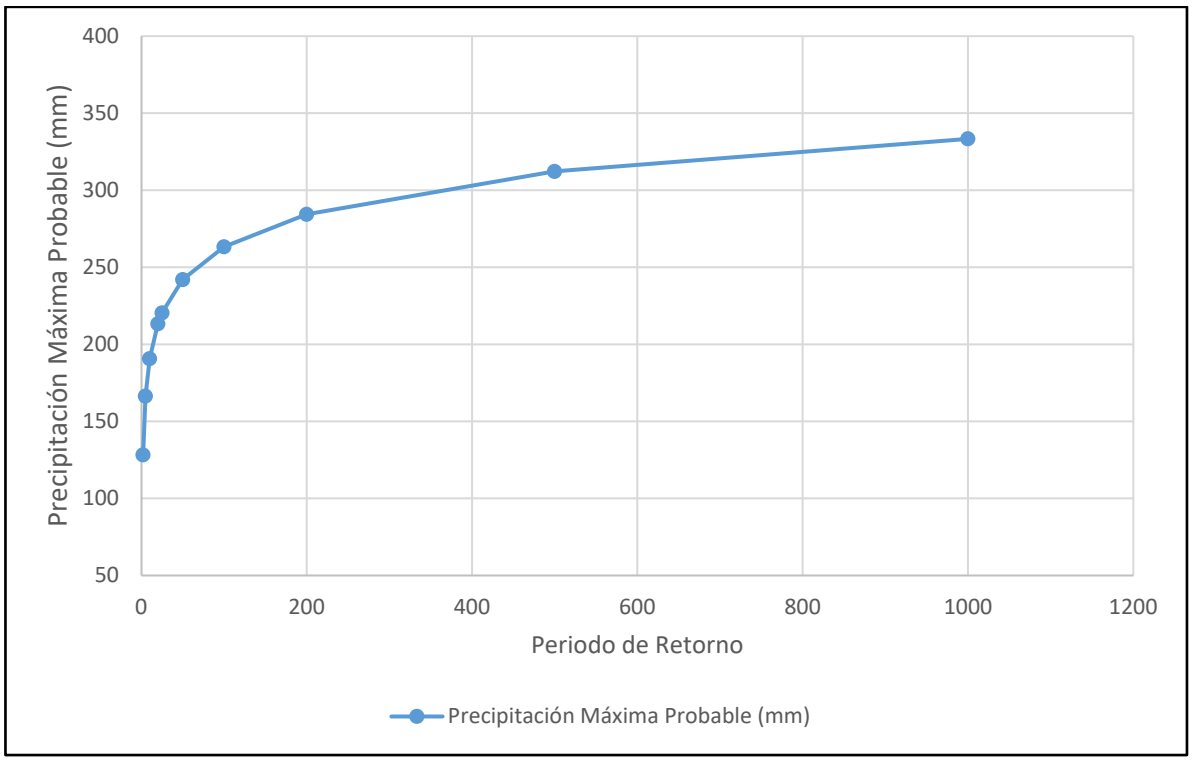
Modelos de distribución	Delta Teórico El Limo
Normal	0.1160
Log Normal 2 Parámetros	**0.0894**
Log Normal 3 Parámetros	0.1115
Gamma 2 Parámetros	0.09843
Gumbel	0.0964
Log Gumbel	0.1416
Mejor Modelo Probabilístico	**Log Normal 2 Parámetros**

En base al modelo probabilístico que mejor ajustó la data de precipitación de El Limo, se confeccionó la precipitación máxima probable para los periodos de retorno, mostrados en la Tabla 4-86 y Gráfico 4-57.

Tabla 4-86: Precipitaciones Máximas en 24 horas para Diversos Periodos de Retorno

Periodo de Retorno (años)	Precipitación máxima en 24 horas (mm) El Limo
2.0	128.29
5.0	166.38
10.0	190.62
20.0	213.28
25.0	220.37
50.0	242.00
100.0	263.26
200.0	284.35
500.0	312.19
1000.0	333.32

Gráfico 4-57: Precipitación Máxima Probable versus Periodo de Retorno para Cada Una de las Estaciones



Conclusiones del Análisis para Máximas Avenidas

La evaluación del registro de precipitaciones máximas de 24 horas, de las 11 estaciones GPM usadas para la caracterización climática, determinó que el registro de máximas precipitaciones se presentó en la estación El Limo, la cual según la Tabla 4-79, tiene un registro histórico del año 2008 con un valor máximo 224.7 mm/año.

Luego se ajustó a la mejor distribución de probabilidad luego de comprobarse la normalidad de la serie a través del *test* de Shapiro-Wilk según el resultado en la Tabla 4-80, con ello, se calculó la precipitación máxima probable (PMP) para cada periodo de retorno desde 2 a 1000 años, según se puede apreciar en la Tabla 4-82, dando el valor PMP de 333.32 mm para un periodo de retorno de 1000 años, en la estación El Limo.

4.8.4.2 Caudales de Diseño Estadístico Obtenidos en Base a los Caudales del Modelo SWAT

Para las subcuencas, se ha usado la serie de caudales diarios obtenidos con el modelo SWAT desde enero de 1999 hasta diciembre del 2018 para someterlos mediante modelos estadísticos (Normal, Log Normal, Gamma, Gumble y Log Gumbel) y así poder determinar el caudal de diseño con un periodo de retorno de 1000 años.

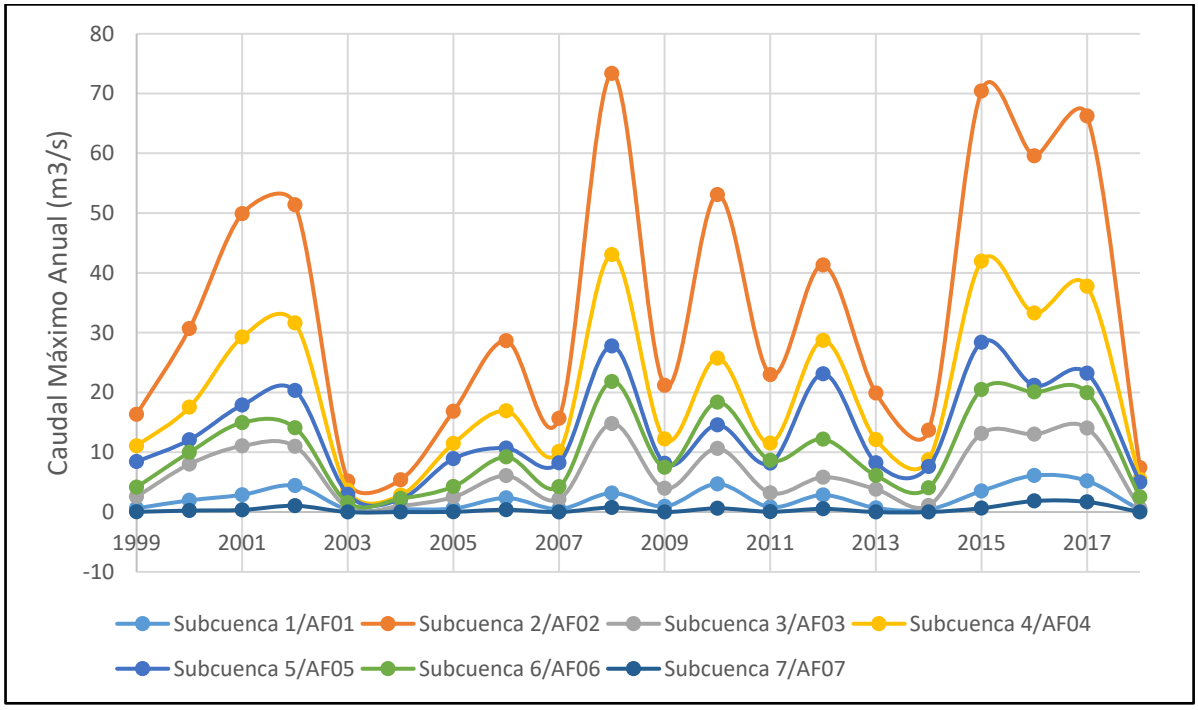
En la Tabla 4-87 y Gráfico 4-58 se muestra los caudales máximos anuales desde el año 1999 al año 2018.

Tabla 4-87: Caudales Máximos Anuales (m^3/s) Obtenidos en cada Subcuenca por el Modelo SWAT (1999-2018)

Año	Subcuenca 1 AF01	Subcuenca 2 AF02	Subcuenca 3 AF03	Subcuenca 4 AF04	Subcuenca 5 AF05	Subcuenca 6 AF06	Subcuenca 7 AF07
1999	0.6072	17.61	2.799	11.86	9.012	4.478	0.009214
2000	1.952	32.34	8.393	18.43	11.74	10.58	0.0117
2001	3.394	50.8	11.36	29.63	17.93	15.05	0
2002	4.507	51.75	11.1	31.97	20.59	14.07	0.1122
2003	0.4238	6.025	0.8861	4.187	3.362	1.714	0
2004	0.4452	6.044	1.206	3.249	2.498	2.479	0
2005	0.5592	18.25	2.77	12.36	9.54	4.631	0.009348
2006	2.381	29.58	6.533	17.02	10.41	9.784	0.01302
2007	0.5189	16.48	2.328	10.68	8.518	4.417	0
2008	3.09	**74.84**	15.12	43.75	28.11	22.1	0.001053
2009	0.9961	21.84	4.209	12.86	8.535	7.094	0
2010	4.985	54.81	10.96	26.38	14.86	18.87	0.1364
2011	0.8645	23.12	3.375	11.55	8.028	8.538	0.05876
2012	2.964	41.18	5.657	28.65	22.91	11.37	0.00008809
2013	0.6895	20.39	4.06	12.29	8.128	6.253	0.00006768
2014	0.4329	14.02	1.318	8.818	7.461	4.237	0.00003597
2015	3.687	71.92	13.53	42.6	28.59	20.72	0.02554
2016	6.082	61.24	13.33	31.92	20.39	20.42	0.2712
2017	5.367	64.63	13.9	36.98	22.66	19.2	0.2255
2018	0.3319	8.748	0.789	6.226	5.594	2.713	0.0005066
Maximo	**6.082**	**74.84**	**15.12**	**43.75**	**28.59**	**22.1**	**0.2712**

En la Tabla 4-87 y Gráfico 4-58, se muestran los caudales máximos obtenidos de la modelización por SWAT, la cual cuenta con un registro histórico desde el año 1999 al año 2018 y un valor máximo en el año 2008 de 74.84 m^3/s, dado en el punto de Aforo AF02, de la Subcuenca 2.

Gráfico 4-58: Caudales Máximos Anuales Obtenidos por el Modelo SWAT en las Subcuencas del Área de Estudio



Para determinar el caudal máximo de diseño, en el aforo AF02, se utilizaron los modelos de probabilidad, pero antes fue necesario determinar la normalidad de los caudales máximos anuales obtenidos en el punto de aforo AF02, por el periodo 1999-2017.

Para determinar la normalidad de los datos, se aplicó el *test* de normalidad de Shapiro-Wilk, (aplicado cuando se tiene menos de 50 datos), el cual nos podría confirmar la hipótesis de que los datos pueden ser ajustados a las distribuciones: Normal, Log Normal, Gumbel, Log Gumbel, Gamma. Para la realización del *test* de Shapiro-Wilk, se ha aplicado el software estadístico SPSS, desarrollado por la IBM.

Este análisis nos da los resultados mostrados en la Tabla 4-88, donde se observa que la significancia asintótica (0.062), para el punto de aforo AF02, es mayor que 0.05, por lo tanto, la distribución de este dato es normal para cada uno de los datos del punto de aforo y puede ser probada con demás ajustes estadísticos (Normal, Log Normal, Gumbel, Log Gumbel, Gamma).

Tabla 4-88: Resultados del *Test* de Bondad Shapiro-Wilk para los Datos de Caudal Máximos 24 horas

Tipo de datos	Estadístico	Número de datos	Significancia Asintótica
AF02	0.909	20	0.062

A través del software Hidroesta 2, desarrollado por la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica (2012), la serie de caudales máximos de cada una de las estaciones de aforo fue ajustada a diferentes modelos probabilísticos (Log Normal, Normal, Gumbel, Log Gumbel y Gamma). En la Tabla 4-89, vemos el mejor modelo de distribución probabilístico para el punto de aforo AF02, según sus deltas teóricos, fue Log Normal 2 Parámetros.

Tabla 4-89: Resultados del Ajuste de los Distintos Modelos Probabilísticos

Modelos de Distribución	Deltas Teóricos AF02
Normal	0.1649
Log Normal 2 Parámetros	0.1278
Log Normal 3 Parámetros	0.1370
Gamma 2 Parámetros	0.1312
Gamma 3 Parámetros	0.1370
Gumbel	0.1354
Log Gumbel	0.1557
Mejor Modelo Probabilístico	**Log Normal 2 Parámetros**

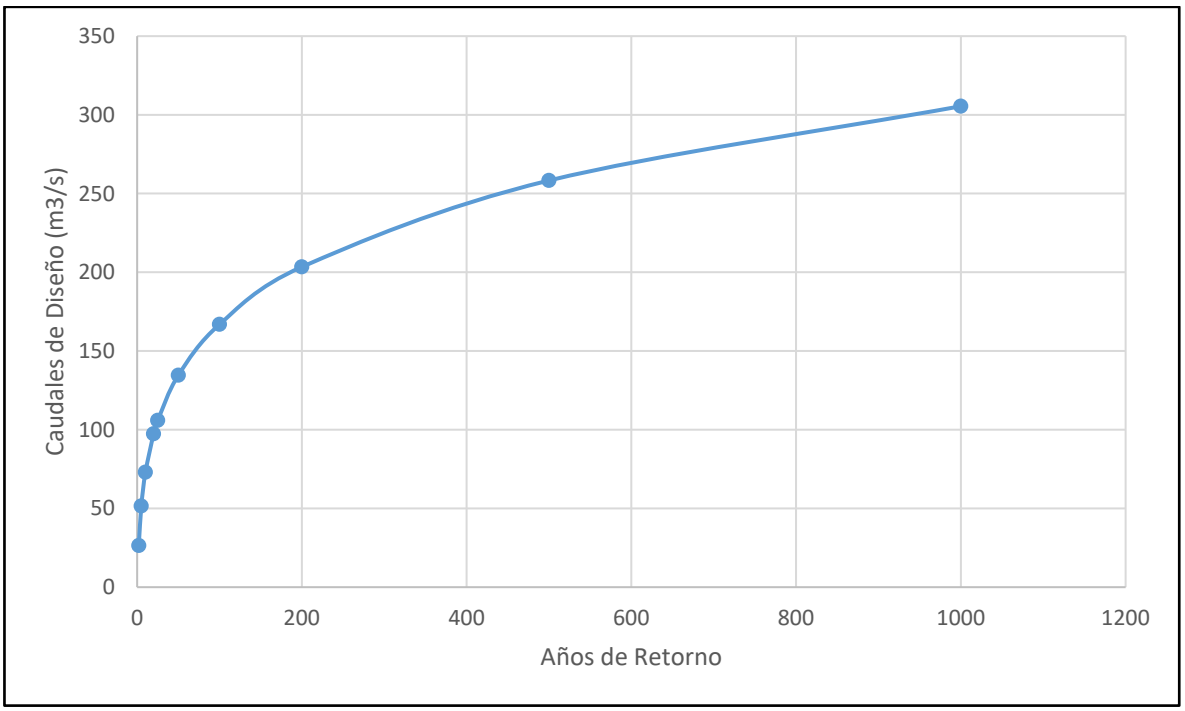
En base a este modelo probabilístico fueron ajustados los caudales máximos del aforo AF02, para los distintos periodos de retorno, cuyo resultado son mostrados en la Tabla 4-90 y Gráfico 4-59.

En el área de estudio, tenemos que el punto de aforo más alto es AF02, de la subcuenca 2, donde el caudal de diseño es 305.49 m^3/s, para un tiempo de retorno de 1000 años (véase la Tabla 4-90).

Tabla 4-90: Caudales de Diseño para Diversos Periodos de Retorno en el Punto de Aforo 2 en la Subcuenca 2

Año	Subcuenca 2 AF02 (m^3/s)
2	26.51
5	51.58
10	73.07
20	97.40
25	105.91
50	134.60
100	166.98
200	203.40
500	258.33
1000	305.49

Gráfico 4-59: Caudales de Diseño para Diversos Periodos de Retorno Punto de Aforo AF-02-Subcuenca 2



4.8.5 Conclusiones

Basado en la información de precipitación de 11 estaciones de SENAMHI e INAMHI, la precipitación promedio anual mínima es de 428.6 mm/año en la parte baja y la máxima es de 1843 mm/año en la parte alta del área de estudio.

Los registros no continuos y cortos periodos de información de precipitación, nos llevan a usar las estaciones grilladas de información de precipitación satelital GPM Imerg, las cuales, a través de 6 índices de validación y análisis de consistencia por el vector regional, se concluye que la precipitación derivada del satélite es representativa de toda el área del estudio.

La precipitación máxima probable (PMP), obtenido de la información de las 11 estaciones grilladas de precipitación satelital GPM Imerg, es de 333.32 mm en un periodo de retorno de 1000 años, sobre la estación El Limo GPM, el cual es la estación con mayor precipitación máxima de 224.7 mm en el año 2008.

El caudal de diseño es 305.49 m^3/s con periodo de retorno de 1000 años, y se obtuvo de la información de caudales modelados máximos anuales, cuyo mayor valor se dio en la subcuenca 2 (rio Zarumilla), en el aforo AF02, en el año 2017, con 74.84 m^3/s.

Existe la probabilidad al 70% que en marzo en la estación La Cuca GPM, obtenga una precipitación de 85.61 mm, la cual es la menor precipitación de las 11 estaciones GPM. Y existe la probabilidad al 70% que en marzo en la estación El Limo GPM, obtenga una precipitación de 396.7 mm, la cual es la mayor precipitación de las 11 estaciones GPM.

En base a las estaciones climáticas, las cuales son 4 en la zona de estudio, tenemos que la temperatura promedio máxima es 30.3 °C y la temperatura promedio mínima es 16.5 °C, la radiación solar promedio anual esta entre 6 y 4.9 kW-hr/m^2/day, la humedad relativa promedio esta entre 65 y 67.9 %, así mismo la velocidad promedio anual esta entre 2.4 y 3.1 m/s.

4.9 OFERTA HÍDRICA

4.9.1 Aguas Superficiales

El principal recurso hídrico superficial dentro de la cuenca Zarumilla lo representan el río Zarumilla y sus tributarios (Qda. Palmales, en Ecuador, y Qda Seca, en Perú); sin embargo, el caudal es intermitente y permanece seco durante la mayor parte del año y solo presenta escorrentía entre los meses de enero a marzo.

De acuerdo con los cálculos realizados, se tiene un caudal máximo de 31.30 m^3/s en la estación Bolsico para el mes de abril y una mínima de 0.2 m^3/s para noviembre.

En base a estos caudales identificados en información existente revisada, la oferta hídrica es baja y no ofrece alternativas para cubrir la demanda de los pobladores, aunque una buena alternativa son las aguas subterráneas, que tienen un potencial para ser explotados.

4.9.2 Disponibilidad Hídrica Total

Tomando en cuenta que la disponibilidad hídrica superficial es limitada, se cuenta con la alternativa de una disponibilidad hídrica subterránea. Por lo observado en campo a la fecha, la deficiencia en la disponibilidad del agua subterránea para los pobladores, en especial, para la mayoría de los usuarios agrícolas, es el deficiente diseño e instalación de sus pozos de abastecimiento. Por los cálculos efectuados, considerando un espesor de agua subterránea de 5 m y con un coeficiente de almacenamiento de 0.05, se obtuvo una disponibilidad hídrica de aproximadamente 272.75 millones de metros cúbicos (MMC).

4.9.3 Uso y Demanda de Agua

De la revisión de información secundaria existente, se ha identificado que, en el área de estudio, la principal demanda de agua corresponde a los usos: poblacional, agrícola e industrial.

4.9.3.1 Uso Poblacional

En el sector ecuatoriano, el agua para beber, cocinar, aseo personal, lavar, entre otros usos domésticos, se abastece de la red pública, camión cisterna, pozos de agua, manantiales, cursos de agua superficial entre otros. De acuerdo con los datos del documento “Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Arenillas”, el cantón Arenillas cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable:

- Una planta antigua que aprovisiona de agua a la cabecera cantonal en mayor porcentaje, y
- Una planta Nueva, cargo de la Empresa Municipal Regional de Agua Potable Arenillas-Huaquillas (EMRAPAH), la cual es trasvase de agua desde la cuenca vecina (Proyecto multipropósito Tahuín). Al ser concesionada con el cantón Huaquillas únicamente abastece el 30% al cantón Arenillas.

El caudal que se entrega diariamente a la ciudad de Huaquillas es de 108 l/s, con un volumen diario entregado de 11923 m^3/día aproximadamente (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018).

La Tabla 4-91 presenta la oferta de agua para uso poblacional de la ciudad de Huaquillas para el año 2016, clasificada según su origen de explotación. Como se observa, la ciudad de Huaquillas recibe una oferta de agua anual que se importa desde la cuenca vecina (proyecto multipropósito Tahuín), de aproximadamente 3.15 hm^3/año, y de la explotación de 1.20 hm^3/año de agua subterránea del acuífero Zarumilla, dando un total de 4.35 hm^3/año entregados para consumo humano.

Tabla 4-91: Oferta de Agua (hm^3/año)para Uso Poblacional de la Parroquia Huaquillas (2016)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Superficial (importado)	0.27	0.24	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	3.15
Subterráneo cuenca	0.1	0.09	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.2
Total	**0.37**	**0.33**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**0.36**	**0.37**	**4.35**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

Las parroquias rurales no cuentan con el servicio de agua potable, solo disponen de un sistema de agua entubada cuya fuente de captación es un pozo profundo, por lo que la calidad es mala. Todas las parroquias rurales disponen de Juntas Administradoras de Agua Potable (JAAPs), siendo esta la organización encargada de controlar y regular la dotación de agua. Así también, un gran número de familias de diferentes sitios toman el agua de otras fuentes como son del rio y las quebradas.

La Tabla 4-92 detalla la oferta de agua de las JAAPs, en base a información oficial 2016 de la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), como entidad adscrita a la SENAGUA, por los Gobiernos Autónomos Autorizados (GADs) Arenillas. Se observa que existen ocho (08) JAAPs que bombean y distribuyen un volumen total anual de 0.2 hm^3/año.

Tabla 4-92: Cobertura de Agua para Uso Poblacional a Nivel de JAAPs - Ecuador

JAAPs	Habi-tantes	Oferta de Agua (m^3) para Uso Poblacional JAAPS (Año 2016)												Total Anual (m^3)	Total Anual (hm^3/año)
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		
Balsalito	370	1200	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1200	1200	1200	1200	1200	13800	0.01
Chacras	880	4630	4630	4630	4630	4630	4630	4630	4630	4630	4630	4630	4630	55560	0.06
El Progreso	465	1000	1000	1000	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1200	1200	13100	0.01
Guabillo	241	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	14400	0.01
Manabí de El Oro	400	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800	800	800	9000	0.01
Palmales	2400	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	7500	7500	7500	7500	7500	93500	0.09
Quebrada Seca	153	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	7200	0.01
Unión Lojana	65	200	150	150	150	150	150	150	100	100	100	100	100	1600	0.00
Total														**208160**	**0.2**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

En sector peruano del área de estudio, la procedencia del agua para beber, cocinar, aseo personal, lavado, aseo de la vivienda entre otros, se presenta en la Tabla 4-93.

Tabla 4-93: Procedencia del Agua para uso Poblacional – Perú

Distrito	Total	Tipo de Procedencia del Agua							
		Red pública dentro de la vivienda	Red pública fuera de la vivienda, pero dentro de la edificación	Pilón o pileta de uso público	Camión-cisterna u otro similar	Pozo	Manantial o puquio	Río, acequia, lago, laguna	Otro (Agua lluvia /albarrada)
Zarumilla	6065	4186	922	319	226	64	--	14	334
Aguas Verdes	4947	2303	650	224	1599	35	--	29	107
Matapalo	905	339	367	36	--	43	--	60	60
Papayal	771	1115	373	13	83	65	--	17	105

Fuente: Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú) (INEI, 2018)

En el sector peruano del área de estudio, la entidad encargada, de manera excepcional y provisional desde noviembre del 2018, de satisfacer las necesidades de agua de la población de la provincia de Zarumilla (distritos de Zarumilla, Aguas verdes y Papayal) es la OTASS a través de la Unidad Ejecutora 002 “Servicios de Saneamiento Tumbes” (Agua Tumbes), a partir de pozos de agua subterránea; mientras que la fuente de captación de agua para la población de Matapalo recibe las recargas del rio Zarumilla por medio de una galería.

En la Tabla 4-94, presenta la oferta de agua bombeada desde el acuífero Zarumilla y distribuida para abastecer a las principales poblaciones representativas del área de estudio (Zarumilla, Aguas Verdes, Matapalo y Papayal).

Tabla 4-94: Volumen Provisto por ATUSA – Perú (Año 2016)

Distrito	Producción (m^3) de Plantas, Pozos y Galerías (Año 2016)												Total
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	hm^3/año
Zarumilla*													1.99
Aguas Verdes	74707	74707	74707	18000	27667	64400	58400	71435	67956	73164	72899	74630	0.75
Matapalo	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	0.04
Papayal	26200	26200	26200	26200	26200	26200	26200	26200	26200	26200	26200	26200	0.31
Total	**104387**	**104387**	**104387**	**47680**	**57347**	**94080**	**88080**	**101115**	**97636**	**102844**	**102579**	**104310**	**3.10**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018); Plan Maestro Optimizado de la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento Aguas de Tumbes S.A. para el periodo 2010-2039 (Agua de Tumbes, 2010),

La demanda de agua de las poblaciones rurales que se encuentran dentro del área de estudio que no son abastecidos por la empresa ATUSA (su red de distribución no llega a estos lugares), es cubierta por agua subterránea que explotan con electrobombas y que son operadas por las Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento (JASS).

La Tabla 4-95 presenta la oferta de agua entregada por JASS a las poblaciones peruanas.

Tabla 4-95: Uso poblacional, JASS Cuenca Zarumilla, Perú

JASS	Habi-tantes	Uso Hídrico JASS (m^3)												Total (m^3/año)	Total (hm^3/año)
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		
Leandro Campos	300	702	648	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	8370	0.01
Cuchareta Alta y Nueva Esperanza	600	1786	1613	1786	1728	1786	1728	1786	1786	1728	1786	1728	1786	21027	0.02
Cuchareta Baja	1050	2678	2419	2678	2592	2678	2592	2678	2678	2592	2678	2592	2678	31533	0.03
Lechugal	500	1339	1210	1339	1296	1339	1296	1339	1339	1296	1339	1296	1339	15767	0.02
Isla Noblecilla	100	977	882	977	945	977	945	977	977	945	977	945	977	11501	0.01
La Palma	1250	3125	2822	3125	3024	3125	3024	3125	3125	3024	3125	3024	3125	36793	0.04
Loma Saavedra	500	1674	1512	1674	1620	1674	1620	1674	1674	1620	1674	1620	1674	19710	0.02
Totora	200	702	648	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	8370	0.01
Pocitos	400	1004	907	1004	972	1004	972	1004	1004	972	1004	972	1004	11823	0.01
Pueblo Nuevo Y Quiñonez	650	1859	1679	1859	1799	1859	1799	1859	1859	1799	1859	1799	1859	21888	0.02
Tutumo - Nuevo Progreso	3250	8370	7560	8370	8100	8370	8100	8370	8370	8100	8370	8100	8370	98550	0.1
Total														**285332**	**0.29**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

4.9.3.2 Uso Agropecuario

La Tabla 4-96 presenta la demanda (teórica) de agua superficial para uso agrícola estimada en estudios previos para el año 2017 en la cuenca Zarumilla. Desagregando la información por país, se tiene que:

a) El requerimiento de la zona ecuatoriana es de 27.35 hm^3/año, que cubre una superficie de 2147.79 ha; y,

b) El requerimiento de la zona peruana es de 46.57 hm^3/año, para satisfacer las necesidades hídricas de 3647.71 ha de cultivos.

Tabla 4-96: Demanda Teórica de Agua para el año 2017 para Uso Agrícola – Recurso Superficial

Cultivos		Superficie/país (ha)	Requerimiento/país (hm^3/año)
Ecuador	Banano	635.01	9.01
	Cacao	500.23	7.12
	Limón	270.46	3.02
	Mango	187.14	3.13
	Maíz	491,22	4.15
	Café	63.73	0.93
Subtotal		**2147.79**	**27.35**
Perú	Limón	1713.14	19.12
	Banano	1764.71	25.04
	Cacao	169.86	2.42
Subtotal		**3647.71**	**46.57**
Total		**5795.50**	**73.92**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

La Tabla 4-97 presenta la demanda (teórica) de agua subterránea para uso agrícola estimada para el año 2017 en la cuenca Zarumilla en estudios previos.

Los datos estimados indican que requerimiento total es de 77.77 hm^3/año para una superficie de 6090.84 ha que se cultivan en toda la cuenca.

Desagregando la información por país, se tiene que:

a) El requerimiento de la zona ecuatoriana es de 29.60 hm^3/año, que cubre una superficie de 2311.18 ha; y,

b) El requerimiento de la zona peruana es de 48.18 hm^3/año, para satisfacer las necesidades hídricas de 3779.66 ha de cultivos.

Tabla 4-97: Demanda Teórica de Agua para el Año 2017 para Uso Agrícola – Recurso Subterráneo

Cultivos		Superficie/país (ha)	Requerimiento/país (hm^3/año)
Ecuador	Banano	660.77	9.37
	Cacao	528.56	7.52
	Limón	298.67	3.33
	Mango	245.01	4.09
	Maíz	514.44	4.35
	Café	63.73	0.93
Subtotal		**2311.18**	**29.60**
Perú	Limón	1801.99	20.11
	Banano	1792.14	25.43
	Cacao	185.53	2.64
Subtotal		**3779.66**	**48.18**
Total		**6090.84**	**77.77**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

La Tabla 4-98 presenta las demandas teóricas mensualizadas de agua superficial por tipo de cultivo tanto para el sector peruano como para el ecuatoriano. Destacando en el sector ecuatoriano que:

- El cultivo de banano es el mayor demandante en todos los meses del año, resaltando el mes de diciembre con un requerimiento de 1.215 hm^3 y un requerimiento anual de 9.01 hm^3, siguiendo en orden de importancia el cultivo de cacao con similar tendencia (0.72 hm^3 en el mes de diciembre y un requerimiento anual de 7.12 hm^3);

La mayor demanda y considerando todos los cultivos se presenta en los meses de julio y agosto, con un requerimiento de 3.10 hm^3, para cada uno de los meses indicados.

De manera análoga, para el sector peruano, se tiene que:

- El cultivo de banano es el mayor demandante en todos los meses del año, resaltando el mes de diciembre con un requerimiento de 3.38 hm^3 y una demanda anual de 25.04 hm^3, siguiendo en orden de importancia el cultivo de limón con un requerimiento de 2.21 hm^3 en el mes de mayo y un requerimiento anual de 19.12 hm^3; y

- La mayor demanda y considerando todos los cultivos se presenta en el mes de diciembre, con un requerimiento de 5.59 hm^3.

Tabla 4-98: Demanda Teórica Mensualizada para el Año 2017 de Agua Superficial para Uso Agrícola (en hm^3)

Cultivo	Ecuador (hm^3)						Perú (hm^3)			Ecuador (hm^3/año)	Perú (hm^3/año)	Demanda Anual (hm^3/año)
	Banano	Cacao	Limón	Mango	Maíz	Café	Limón	Banano	Cacao			
Ene	0.645	0.62	0.275	0.23	0.00	0.07	1.74	1.79	0.21	1.84	3.74	5.58
Feb	0.033	0.06	0.014	0.02	0.00	0.01	0.09	0.09	0.02	0.14	0.20	0.34
Mar	0.143	0.23	0.061	0.08	0.00	0.02	0.39	0.40	0.08	0.54	0.86	1.40
Abril	0.623	0.59	0.253	0.24	0.00	0.07	1.60	1.73	0.20	1.77	3.54	5.31
May	0.892	0.78	0.348	0.33	0.00	0.10	2.21	2.48	0.27	2.45	4.95	7.40
Jun	0.787	0.67	0.290	0.31	0.76	0.09	1.84	2.19	0.23	2.91	4.26	7.17
Jul	0.798	0.68	0.287	0.32	0.81	0.09	1.82	2.22	0.23	2.98	4.27	7.25
Ago	0.809	0.69	0.291	0.32	0.89	0.09	1.84	2.25	0.23	3.10	4.32	7.42
Set	0.827	0.68	0.288	0.32	0.89	0.09	1.83	2.30	0.23	3.10	4.36	7.46
Oct	1.106	0.70	0.299	0.32	0.80	0.10	1.90	3.07	0.24	3.33	5.21	8.53
Nov	1.130	0.69	0.300	0.31	0.00	0.09	1.90	3.14	0.24	2.53	5.27	7.81
Dic	1.215	0.72	0.311	0.32	0.00	0.10	1.97	3.38	0.24	2.66	5.59	8.25
Total	**9.01**	**7.12**	**3.02**	**3.13**	**4.15**	**0.93**	**19.12**	**25.04**	**2.42**	**27.35**	**46.57**	**73.92**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

La Tabla 4-99 presenta las demandas teóricas mensualizadas de agua subterránea por tipo de cultivo tanto para el sector peruano como para el ecuatoriano. Destacando en el sector ecuatoriano que:

- El cultivo de banano es el mayor demandante en todos los meses del año, resaltando el mes de diciembre con un requerimiento de 1.26 hm^3 y un requerimiento anual de 9.37 hm^3, siguiendo en orden de importancia el cultivo de cacao con un requerimiento de 0.83 hm^3 en el mes de mayo y un requerimiento anual de 7.52 hm^3; y
- La mayor demanda y considerando todos los cultivos, se presenta en el mes de octubre con un requerimiento de 3.58 hm^3.

De manera análoga, para el sector peruano, se tiene que:

- El cultivo de banano es el mayor demandante en todos los meses del año, resaltando el mes de diciembre con un requerimiento de 3.43 hm^3 y una demanda anual de 25.43 hm^3, siguiendo en orden de importancia el cultivo de limón con un requerimiento de 2.32 hm^3 en el mes de mayo y un requerimiento anual de 20.11 hm^3; y
- La mayor demanda y considerando todos los cultivos se presenta en el mes de diciembre, con un requerimiento de 5.77 hm^3.

Tabla 4-99: Demanda Teórica Mensualizada para el Año 2017 de Agua Subterránea para Uso Agrícola (en hm³)

Cultivo	Ecuador (hm³)						Perú (hm³)			Ecuador (hm³/año)	Perú (hm³/año)	Demanda anual (hm³/año)
	Banano	Cacao	Limón	Mango	Maíz	Café	Limón	Banano	Cacao			
Ene	0.67	0.65	0,30	0.30	0.00	0.07	1.83	1.82	0.23	2.00	3.88	5.88
Feb	0.03	0.07	0.02	0.03	0.00	0.01	0.09	0.09	0.02	0.15	0.21	0.36
Mar	0.15	0.24	0.07	0.11	0.00	0.02	0.41	0.40	0.08	0.59	0.89	1.48
Abr	0.65	0.63	0.28	0.31	0.00	0.07	1.69	1.76	0.22	1.93	3.67	5.60
May	0.93	0.83	0.38	0.43	0.00	0.10	2.32	2.52	0.29	2.67	5.13	7.80
Jun	0.82	0.71	0.32	0.40	0.80	0.09	1.93	2.22	0.25	3.14	4.41	7.55
Jul	0.83	0.72	0.32	0.42	0.85	0.09	1.91	2.25	0.25	3.22	4.42	7.64
Ago	0.84	0.73	0.32	0.42	0.93	0.09	1.94	2.28	0.26	3.34	4.48	7.82
Set	0.86	0.72	0.32	0.42	0.93	0.09	1.92	2.34	0.25	3.35	4.51	7.85
Oct	1.15	0.74	0.33	0.43	0.83	0.10	1.99	3.12	0.26	3.58	5.38	8.96
Nov	1.18	0.73	0.33	0.41	0.00	0.09	2.00	3.19	0.26	2.75	5.44	8.19
Dic	1.26	0.76	0.34	0.42	0.00	0.10	2.07	3.43	0.27	2.88	5.77	8.65
Total	**9.37**	**7.52**	**3.33**	**4.09**	**4.35**	**0.93**	**20.11**	**25.43**	**2.64**	**29.60**	**48.18**	**77.77**

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

4.9.3.3 Uso Industrial

En el sector ecuatoriano, de acuerdo con los datos oficiales del Banco Nacional de Asignaciones BNA-SENAGUA, se tienen cuatro (04) puntos donde el agua es aprovechada para fines industriales, tal como se muestra en la Tabla 4-100.

Tabla 4-100: Autorizaciones de Uso de Agua para Aprovechamiento Industrial en la Cuenca Zarumilla - Ecuador

Nombre del Aprovechamiento	Cantón	Parroquia	Caudal (m³)	Área Regada (ha)	Subuso
Estero Aguas Verdes, Quebrada Aguas Verdes	Huaquillas	Hualtaco	15.19	21	Acuacultura
Pozo somero	Arenillas	Palmales	2	0	Uso en general para industria
Quebrada Palmales	Arenillas	Palmales	2	0	Uso en general para industria
Pozo somero	Huaquillas	Unión Lojana	5	0	Refrigeración

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

En el cantón Huaquillas el uso del agua en acuacultura, está dirigido a la crianza de camarón, peces y otras especies acuáticas; en este cantón existen aproximadamente 100 ha destinadas a la acuacultura, misma que se alimenta de agua de mar a través de los esteros, lo cual contribuye al desarrollo económico de la zona, teniendo en cuenta que el camarón es un producto de exportación.

En este territorio de igual manera se presenta otro tipo de aprovechamiento industrial, destinado a la industria de la refrigeración, ya que el agua es usada como regulador térmico en calderas y torres de refrigeración.

En el cantón Arenillas, la explotación del recurso hídrico con fines industriales, está orientada al sector avícola y porcino, principalmente.

Con respecto al sector peruano, la Tabla 4-101presenta las demandas de agua para uso industrial para los años 2015 y 2016. Se tiene una demanda neta anual de 0.12 hm^3, con una demanda mensual constante los 12 meses del año.

En cuanto a la demanda para uso piscícola, se estima una demanda neta anual de 0.30 hm^3, con una demanda mensual que oscila entre los 0.01 a 0.03 hm^3.

Tabla 4-101: Demanda Hídrica Industrial y Piscícola en el Valle Zarumilla - Perú

Uso	Año 2015 (hm^3)					Año 2016 (hm^3)							Total (hm^3/año)
	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
Industrial	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.12
Piscícola	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.3

Fuente: Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos. Machala, Ecuador (Consorcio UTPL - ADEPLAN, Abril 2018)

4.9.4 Determinación de la Recarga del Acuífero

La Tabla 4-102 presenta las recargas estimadas con el modelo SWAT para cada una de las subcuencas del área de estudio.

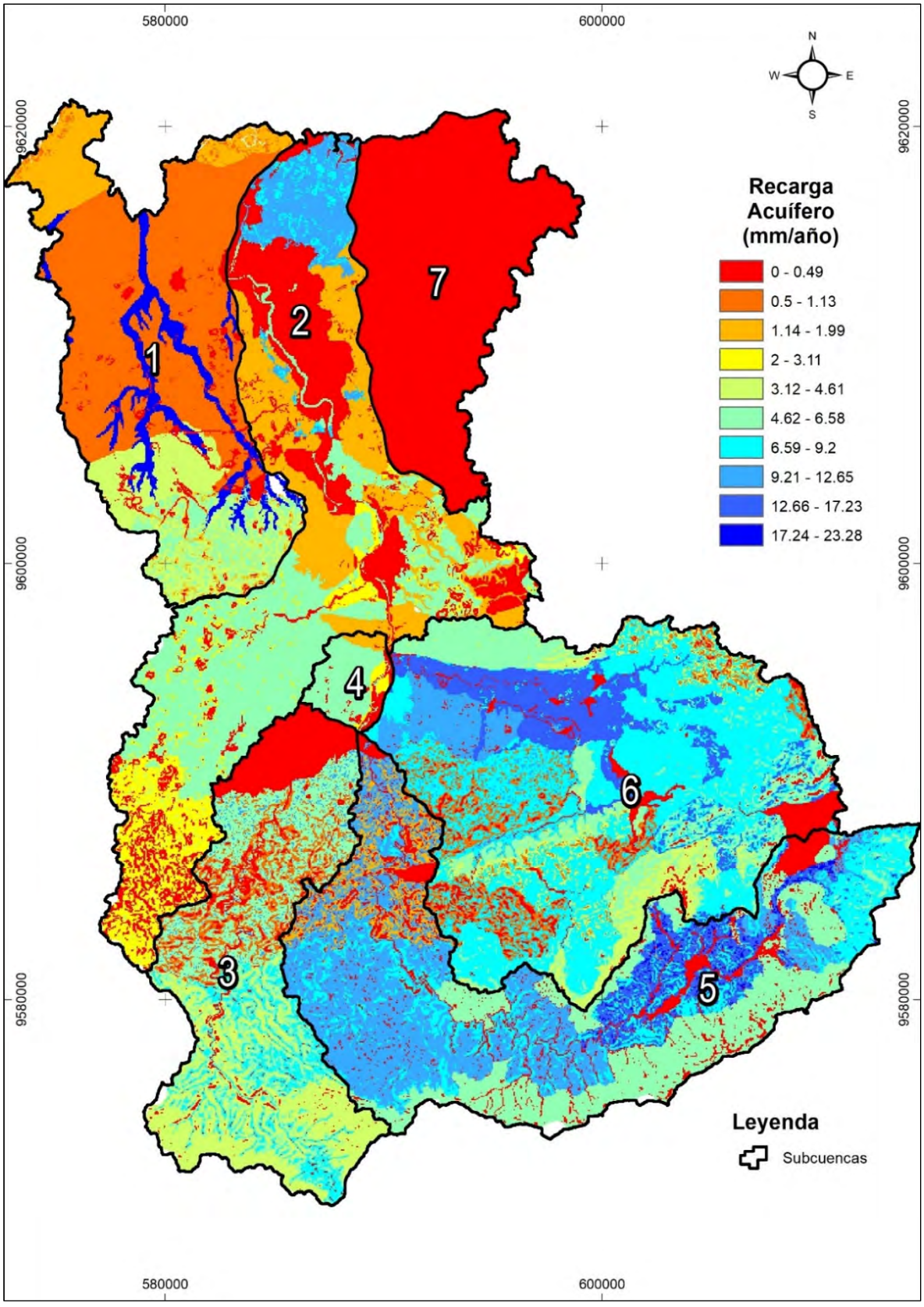
4.9.4.1 Modelamiento de la Recarga al Acuífero

La simulación de los distintos parámetros hídricos que determina SWAT, en cada HRU´s (unidad de respuesta hidrológica), y en base a la aplicación de la ecuación de equilibrio indicada en la Sección 4.8.2.2, se ha obtenido la recarga al acuífero profundo, mostrada en la Figura 4-23**.**

Tabla 4-102: Recarga Estimada del Acuífero

Sub-cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Recarga Total (m^3/año)	Recarga Promedio (mm)
1	217568.54	266017.50	607127.94	1017006.02	1205413.97	1051993.65	887138.81	688284.39	507628.95	400259.22	301503.39	247970.54	**7 397 912.90**	43.80
2	200505.43	245151.42	707000.67	1283023.80	1522146.51	1310350.74	1086701.31	830439.34	604069.20	465121.30	334419.42	255974.32	**8 844 903.48**	36.90
3	166437.28	183790.08	530534.42	970731.81	1212687.69	1095691.33	932640.13	722793.16	529627.31	409085.61	293834.23	224672.33	**7 272 525.37**	52.51
4	13187.54	15649.01	50118.06	91272.47	106132.17	90298.03	74510.66	56809.34	41281.56	31748.66	22756.02	17383.10	**611 146.62**	46.38
5	500805.35	593843.01	1410868.07	2542781.15	3255009.05	2998433.21	2588724.42	2023794.86	1490047.14	1154879.07	834224.16	642415.80	**20 035 825.28**	88.77
6	448795.47	566947.57	1503309.98	2625793.43	3216027.01	2889328.88	2455196.40	1900290.22	1391339.22	1074574.92	772614.97	591171.70	**19 435 389.76**	75.62
7	821.03	550.95	475.33	1874.32	5066.61	5223.25	4612.88	3608.20	2662.94	2052.57	1474.61	1139.72	**29 562.41**	0.27
Total Recarga													**63 627 265.82**	

Figura 4-23: Distribución de la Recarga al Acuífero Profundo en el Área de Estudio



5 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1 INTRODUCCIÓN

La región fronteriza entre Ecuador y Perú está localizada dentro de la denominada Deflexión de Huancabamba o Andes de Huancabamba (Mourier, 1988). Esta "estructura" representa la zona de transición entre los Andes Centrales y los Andes Nórdicos (Gansser, 1973, en Feininger, 1987) y abarca el área comprendida entre los 2°30´ y 7° de latitud sur. Este segmento forma parte de una larga cadena montañosa localizada a lo largo del margen activo del Pacifico y que se extiende desde Patagonia (Argentina) hasta el Istmo de Panamá (zona limítrofe entre Colombia, Venezuela y Panamá).

La subducción existente entre la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa continental Sudamericana a una velocidad actual aproximada de 5 cm/año, ortogonalmente frente al Ecuador y 8 cm/año, diagonalmente frente a Colombia (Daly, 1989; Núñez del Arco, 2003; Trenkamp, Kellogg, Freymueller, & Mora, 2002), generando la presencia de un sistema de fosa y arco volcánico a lo largo de la margen occidental de Sudamérica desde el Mesozoico, dando como resultado la formación de múltiples cuencas de ante-arco Cenozoicas, como la cuenca Talara y la cuenca Tumbes que se relacionan con el área estudiada, asimismo tenemos la Cordillera de la Costa como un elemento positivo. Además, el área se encuentra afectada por intensas deformaciones debido a una compleja evolución tectónica (tectonismo Paleozoico y Andino), siendo las características principales el sistema de horst y graben, que controló el desarrollo de las cuencas sedimentarias.

5.2 GEOLOGÍA REGIONAL

Las cuencas de Talara y Tumbes incluyen secuencias estratigráficas sedimentarias gruesas de sedimentos de edades paleozoicas a terciarias que se extienden en alta mar y en tierra a lo largo de la región costera mucho más allá de las cuencas actuales. Se fusionan y forman parte de la secuencia sedimentaria de la región que caracteriza a todo el territorio peruano que eventualmente tiende hacia los escudos brasileño y de Guyana.

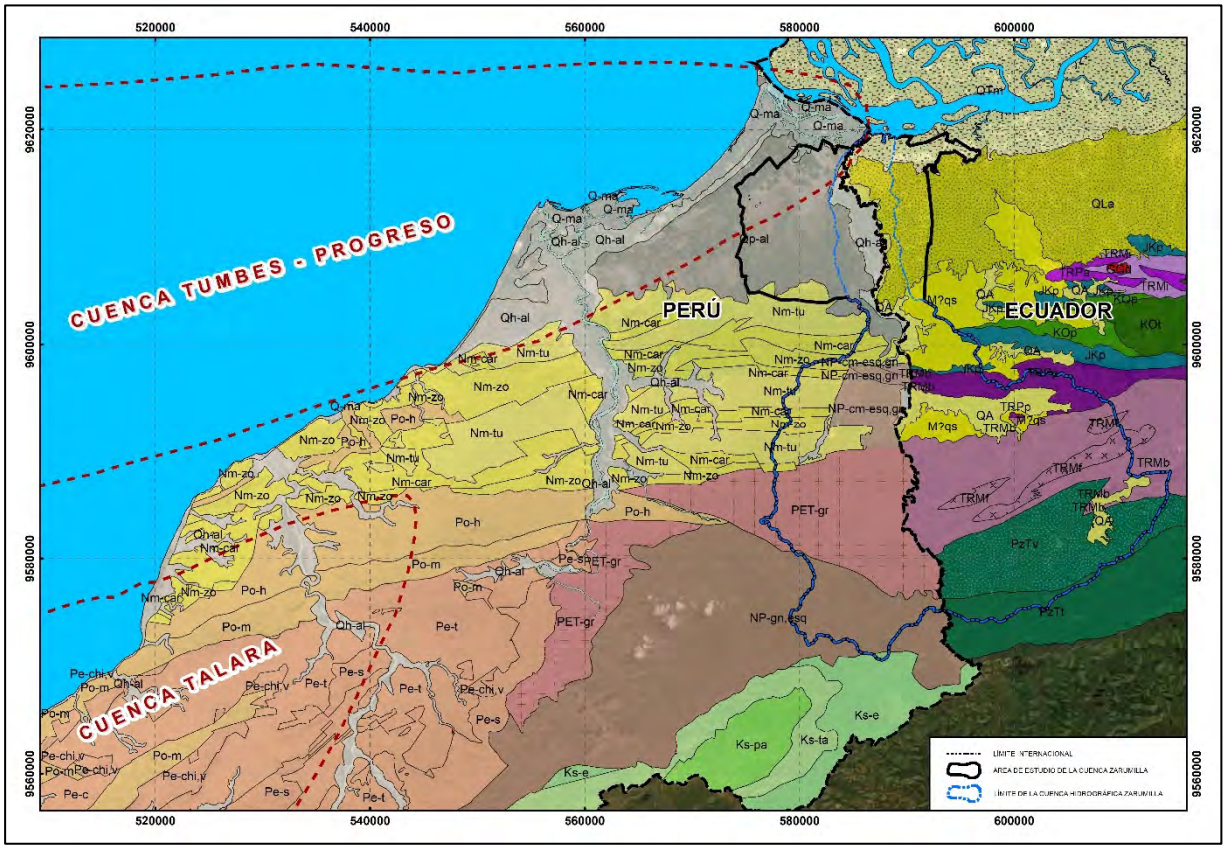
Las columnas estratigráficas que se han utilizado en el presente informe son representativas de todo el noroeste de Perú y de la zona suroeste de Ecuador, considerando las publicadas por los servicios geológicos acreditados de los países de Perú (INGEMMET) y Ecuador (INIGEMM). Esta información no se ha modificado en los planos, salvo en las interpretaciones hidrogeológicas en secciones/perfiles que han sido actualizadas con los criterios y experiencia del personal profesional, a cargo de la presente consultoría.

5.2.1 Cuenca Tumbes - Progreso

La cuenca de Tumbes es una depresión tectónica con una tendencia NE-SW similar a la de cuenca Talara. La cuenca Tumbes se extiende hacia el norte del límite fronterizo con Ecuador , donde recibe el nombre de Cuenca Progreso. En la parte central el Complejo Marañón, en territorio peruano, coincide con el Grupo Piedras, en territorio ecuatoriano; sin embargo, un poco más al norte, éste coincide con la Formación Zorritos, que indica un alto estructural. Este alto estructural está limitada al oeste por un sistema de fallas formado por las fallas Piedra Redonda y Tumbes, y hacia el este por un sistema de fallas lístricas que incluye las fallas de

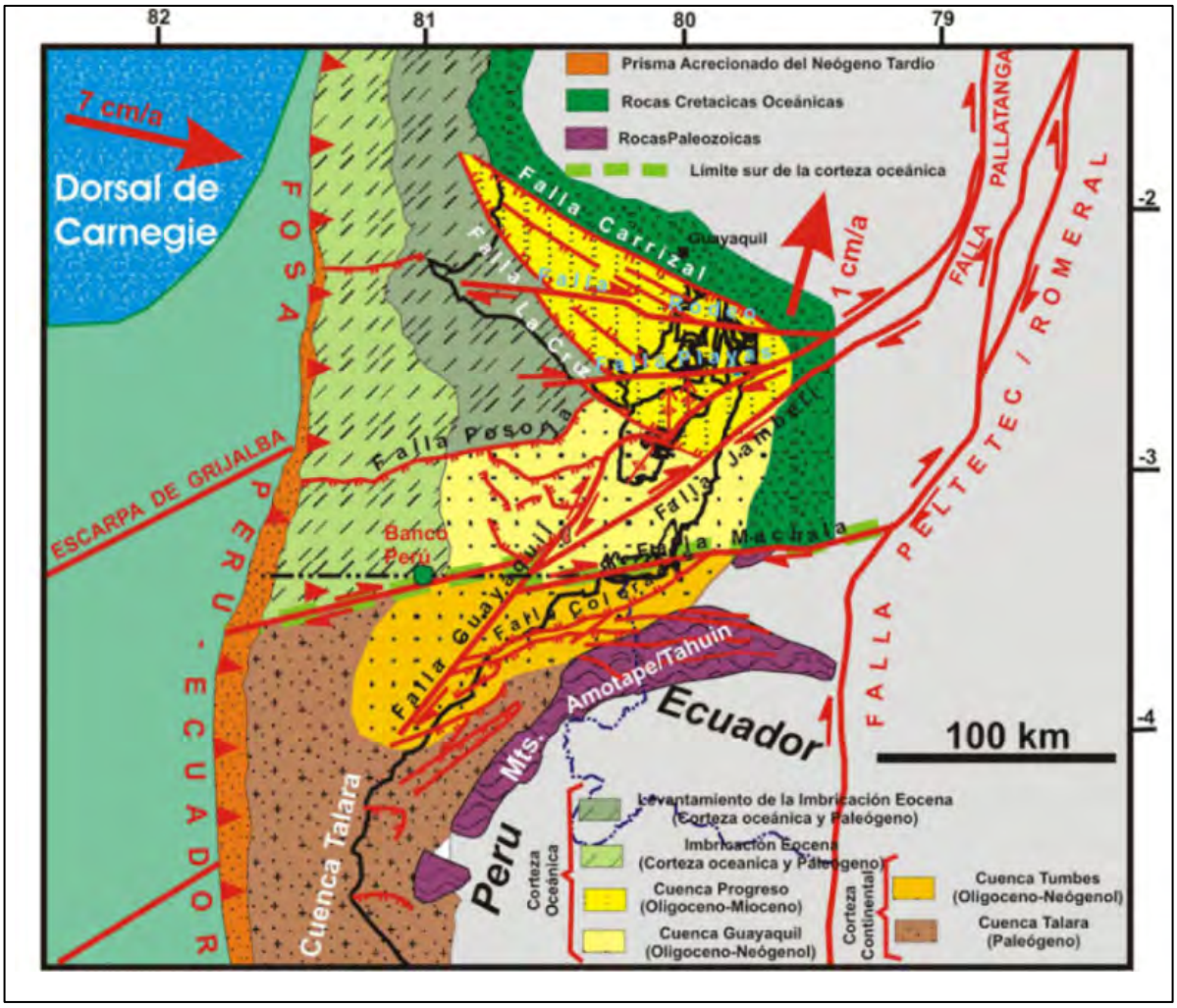
Carpitas y Tronco Mocho. El borde NO de la cuenca de Tumbes incluye la estructura del Banco Perú. El Banco Perú se le denomina a un montículo marino de un área superficial de unos 50 km^2 en agua a profundidades inferiores a 100 m, cuya composición y origen faltan estudiarse. (véase Figura 5-1 y Figura 5-2)

Figura 5-1: Influencia de las Cuencas Talara y Tumbes en el Área de Estudio



Fuente: INGEMMET de Perú e INIGEMM de Ecuador.

Figura 5-2: Elementos Tectónicos Principales y Cuencas del Sureste Ecuatoriano y Noroeste del Perú



Fuente: Prospección Geofísica desarrollada como parte de la Tesis de pregrado "Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas, Área Chacras - Provincia de El Oro" (Aguilar & Marquinez, 2001)

5.3 ESTRATIGRAFÍA

La cuenca en estudio comprende importantes unidades litoestratigráficas que tienen especial interés hidrogeológico.

Debido a que afloran en dos países limítrofes (Perú y Ecuador) han sido denominadas con diferentes nombres, por lo que en la Tabla 5-1 se presenta la correlación de las unidades litoestratigráficas de ambos países.

Tabla 5-1: Correlaciones de Unidades Litoestratigráficas del Área de Estudio en Perú y Ecuador

						PERÚ		ECUADOR	
ERA/TEMA	SISTEMA/PERIODO	SERIE/EPOCA		ETIQUETA UNIFICADA	UNIDAD UNIFICADA	ETIQUETA	UNIDAD	ETIQUETA	UNIDAD
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE		Qm-r	DEPÓSITOS RECIENTES MARINOS	Q-ma	DEPÓSITO MARINO	QTm	TERRASA MARINA
				Qa-c	DEPÓSITOS COLUVIALES	Qh-al	DEPÓSITO ALUVIAL	QLa	DEPÓSITO DE LLANURA ALUVIAL
				Qd-c	DEPÓSITOS COLUVIALES	Qp-al	DEPÓSITO ALUVIAL	QA	DEPÓSITO ALUVIAL
				Qd-a	DEPÓSITOS ALUVIALES				
				Q-Tm	TERRAZAS MARINAS				
	NEÓGENO	MIOCENO	SUPERIOR	Tm-t	FORMACIÓN TUMBES	Nm-tu	FORMACIÓN TUMBES		FORMACIÓN QUEBRADA SECA
			MEDIO	Tm-c	FORMACIÓN CARDALITOS	Nm-car	FORMACIÓN CARDALITOS	M?qs	
			INFERIOR	Tm-z	FORMACIÓN ZORRITOS	Nm-zo	FORMACIÓN ZORRITOS		
MESOZOICO	JURÁSICO	MEDIO							
	TRIÁSICO	SUPERIOR		Tr3Th	GRUPO TAHUIN				GRUPO TAHUIN
		MEDIO		Tr3ThC	GRUPO TAHUIN CAPIRO				GRUPO TAHUIN CAPIRO
		INFERIOR		Tr3ThSR	GRUPO TAHUIN SAN ROQUE				GRUPO TAHUIN SAN ROQUE
PRECAMBRICO	PROTEROZOICO			PzPi	GRUPO PIEDRAS	NP-cm-esq,gn	COMPLEJO MARAÑÓN		GRUPO PIEDRAS

Fuente: Modificado de la información proporcionada por el Proyecto GIRHT

Las unidades litoestratigráficas se describen a detalle a continuación, de acuerdo con la estratigrafía desde las más antiguas hasta las más recientes (véase Figura 5-3). Mayor detalle de la información interpretada se presenta en el Anexo II.

5.3.1 Rocas Metamórficas

Rocas del Basamento

Complejo Marañón / Grupo Piedras (PzPi)

En territorio peruano, recibe esta denominación de Complejo Marañón, mientras que en territorio ecuatoriano se le denomina Grupo Piedras.

A ambos se le asigna una edad paleozoica inferior a Precámbrica.

Se trata de un complejo de rocas metamórficas dentro de las cuales se tiene gneises graníticos de grano medio, con bandas de cuarzo deformadas, abundante mica (moscovita), mostrándose muy cizallados y meteorizados. Sus afloramientos han sido descritos en el río Zarumilla entre Matapalo y Palmar; su gnesificación se debe probablemente a su cercanía al granito de Higuerón (Palacios, 1994). Tomando en cuenta su litología se les considera materiales de baja como permeabilidad al flujo hídrico subterráneo en profundidad, a diferencia de sus primeras decenas de metros debido a la meteorización.

Grupo Tahuin

En el área de Ecuador, al oeste de la Cordillera Occidental, se ubican estratigráficamente sobreyaciendo al grupo Piedras, el Grupo Tahuin denominado por C.R. Bristow y R. Hoffstetter (1977). Está compuesto por rocas cuarzopeliticas poco o medianamente metamórficas, cuyo espesor total estimado es de aproximadamente 10.000 m. Para estos autores, el Grupo Tahuin podría ser un equivalente lateral de una serie devoniana fosilifera que aflora en la Cordillera de los Amotapes, en Perú.

En el mapa geológico proporcionado por el Proyecto GIRHT, se ha distinguido al Grupo Tahuin con las siguientes subdivisiones:

- Grupo Tahuín San Roque (Tr3ThSR), pertenece al Triásico Inferior. Se caracteriza por presentar facies de gneis de grano fino a medio. Este grupo aflora en Ecuador,
- Grupo Tahuín Capiro (Tr3ThC), pertenece al Triásico Medio. Rocas metamórficas de bajo a medio grado con grano fino y tienen predominante presencia de moscovita y sericita. Este grupo aflora en Ecuador y Perú, y
- Grupo Tahuín (Tr3Th), pertenece al Triásico Superior. Principalmente compuesto por rocas pelíticas y cuarzo feldespáticas. Este grupo aflora en Ecuador y Perú.

Figura 5-3: Geología Regional

5.3.2 Roca Sedimentaria

En esta área se han distinguido:

- Formación Zorritos (Tm-z), pertenece al Mioceno Inferior; identificada en dirección transversal al valle, a la altura de la localidad de Lechugal. Aflora en la localidad del mismo nombre. Litológicamente están compuestas de una secuencia alternada de lutitas y areniscas cuarzosas de grano fino, y en la base por areniscas de grano medio a grueso, localmente es microconglomerádica (véase Figura 5-4 y Figura 5-5),
- En la columna estratigráfica de la cuenca Tumbes, modificada por OXY (2000), esta formación se encuentra dividida en tres miembros, con una potencia de 800 m, y aproximadamente de 500 m aflorantes en el área de las quebradas Charán, Urbina y La Cruz, obtenidos de la columna estratigráfica sintetizada de Vega et al. (2005) que fueron formados en ambientes fluviales, deltaicos y de playa. (véase Figura 5-4 y Figura 5-5),
- Formación Cardalitos (Tm-c), se le asigna al Mioceno Medio en base a su contenido fosilífero. Tiene su localidad tipo en la Pampa Cardalitos. Está compuesta mayormente por lutitas grisáceas intercaladas con lutitas marrones azufrosas, envolviendo concreciones calcáreas y yeso (véase Figura 5-4 y Figura 5-5),
- La localidad típica de esta formación queda en la comunidad de Cardalitos, presenta una mejor exposición, donde su grosor estimado es de 900 a 1000 m en Talara y de 400 m en Tumbes, que se puede corroborar en la columna estratigráfica de la cuenca Tumbes, modificada por OXY (2000), donde aflora con potencia de 230 m, y aproximadamente de 300 m de potencia en la columna estratigráfica sintetizada de Vega et al. (2005), donde interpreta sedimentos deltaicos y de litoral (véase Figura 5-4 y Figura 5-5),
- Formación Tumbes (Tm - t), pertenece al Mioceno Superior, su localidad tipo se encuentra en alrededores del Río Tumbes. Compuesta por una secuencia de conglomerados compactados, areniscas de grano grueso e intercalaciones de lutitas (véase Figura 5-4 y Figura 5-5),
- En la columna estratigráfica de la cuenca Tumbes, modificada por OXY (2000), esta formación muestra una potencia de 470 m, y aproximadamente de 200 m aflorantes en el área de las quebradas Charán, Urbina y La Cruz, obtenidos de la columna estratigráfica sintetizada de Vega et al. (2005) (véase Figura 5-4 y Figura 5-5), y
- El equivalente de las formaciones Zorritos, Cardalitos y Tumbes en territorio ecuatoriano, cartografiadas por el servicio geológico ecuatoriano, es la Formación Quebrada Seca.

5.3.3 Depósito Cuaternario

En esta área se han distinguido los depósitos cuaternarios descritos a continuación.

5.3.3.1 Terrazas Marinas (Q-Tm)

Unidad del Cuaternario Reciente. Conforma depósitos de la franja litoral y están constituidos por depósitos recientes de arena, limo y cantos del borde litoral. Las zonas más

representativas de estos depósitos se observan a continuación del Higuerón (cuerpo intrusivo que aflora en el curso medio del río Tumbes), en donde el valle se amplía.

5.3.3.2 Depósito Aluvial (Qd-a)

Unidad del Cuaternario Reciente, compuesta por depósitos aluviales, de amplia extensión en la zona de estudio. En forma de cobertura se acumulan a favor de los corrientes fluviales a lo largo de los valles y en las llanuras inundadas del río Zarumilla. Esencialmente constituidos por sedimentos arrastrados como conglomerados, cascajo arenoso, arenas, limos y arcillas

5.3.3.3 Depósito Coluvial (Q-c)

- Depósitos Coluviales (Qd-c), unidad del Cuaternario Reciente, compuesta por acumulaciones detríticas al pie de las laderas sobre áreas de llanura. Está conformado básicamente de arena, limo y fragmentos de roca, y
- Depósitos Coluviales (Qa-c), unidad del Cuaternario Reciente, compuesta por depósitos que se ubican en el fondo de las numerosas quebradas que drenan el área de estudio. El material es bastante diversificado en relación con la litología, tamaño y redondez, como consecuencia directa del escaso transporte que han tenido.

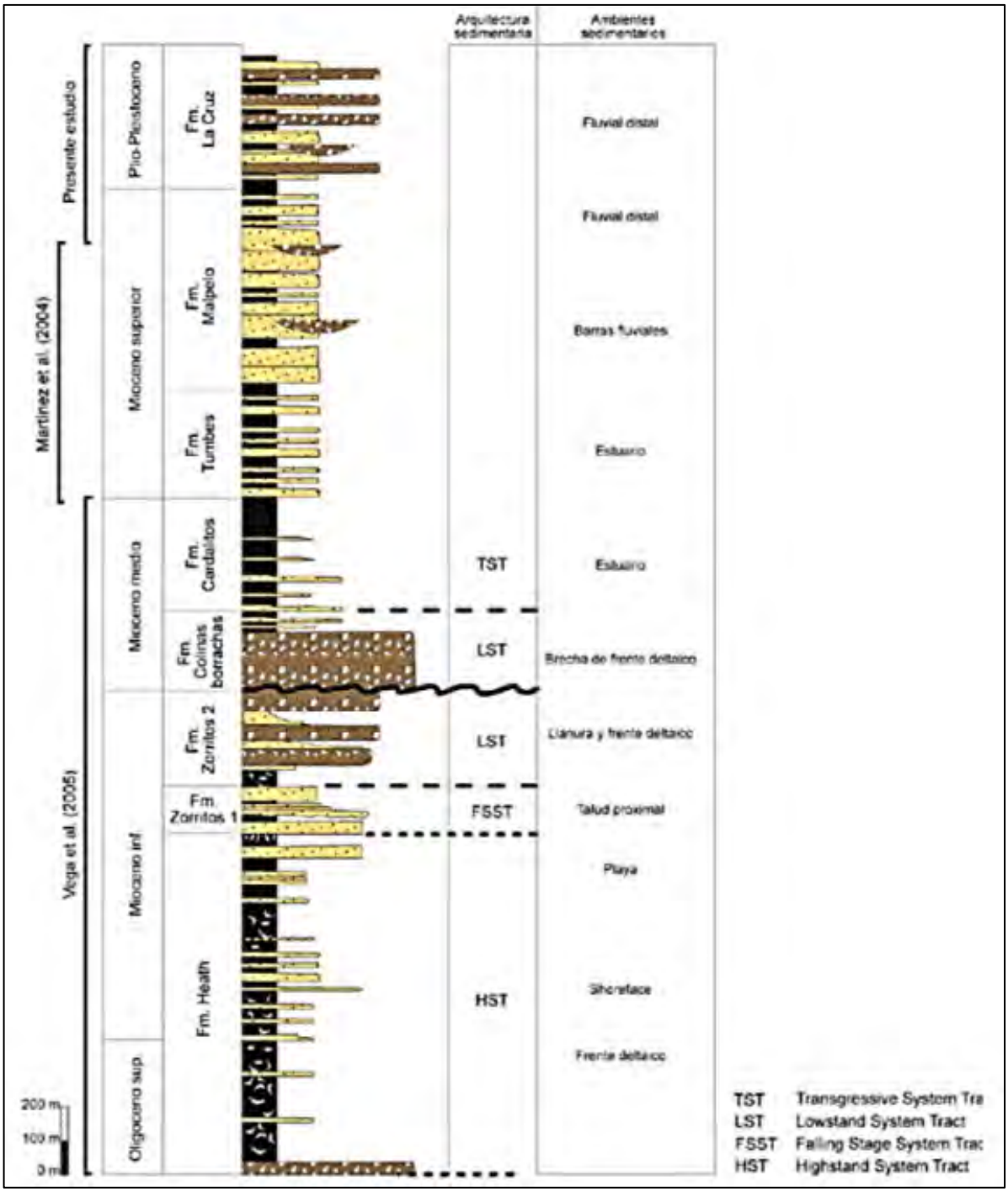
5.3.3.4 Depósitos Marinos Recientes (Qm-r)

Unidad del Cuaternario Reciente, conformados por depósitos recientes de arena, inundables en épocas lluviosas, como consecuencia de las mareas altas, se pueden definir como "manglares".

5.3.4 Rocas Intrusivas

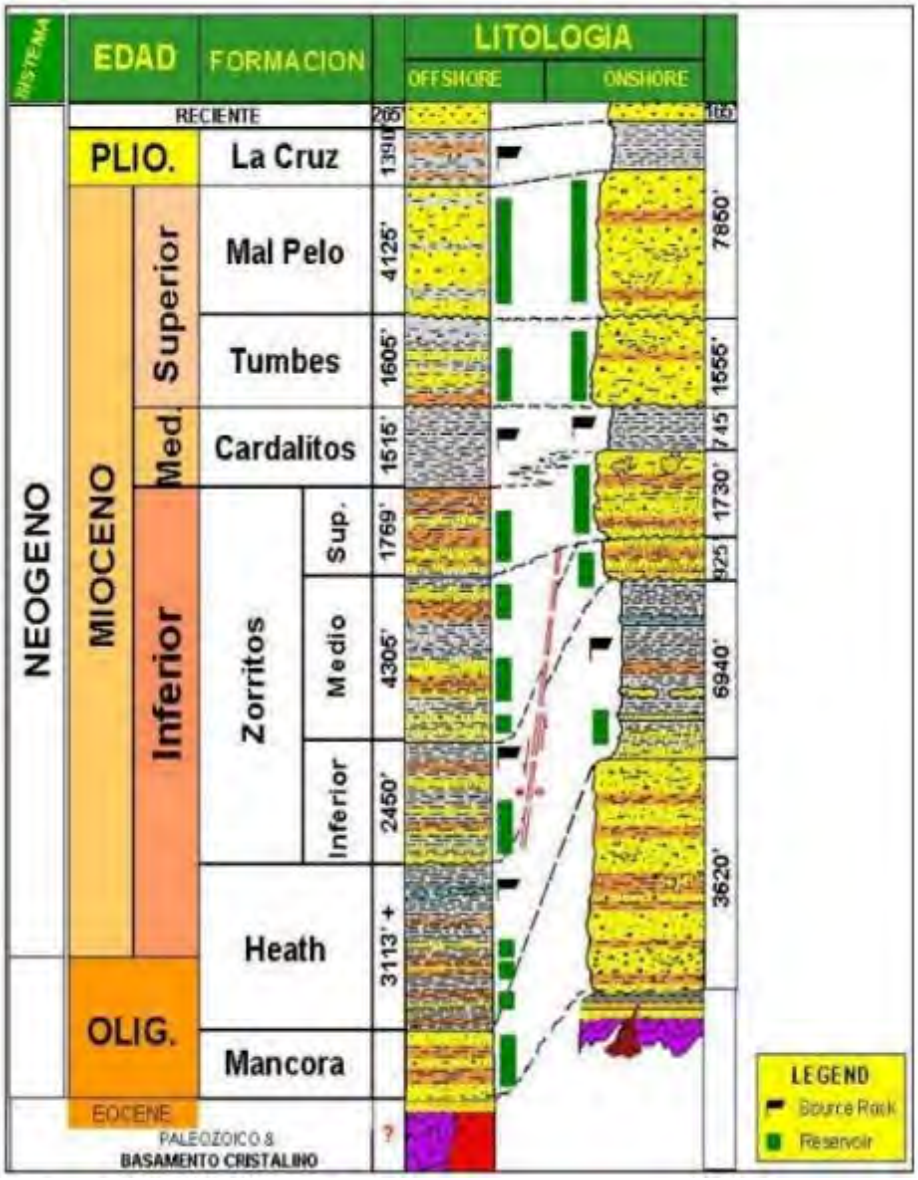
- Plutón La Florida (JpFl), pertenece al Triásico Tardío. Principalmente compuesto de granodiorita porfirítica. Este complejo aflora en Ecuador
- Granito La Florida (IN Gd LF), registra una edad Jurásico Medio. Estas rocas ígneas, se encuentran emplazadas en el territorio de Ecuador.

Figura 5-4: Columna Estratigráfica de la Cuenca de Tumbes



Fuente: XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. 2010.

Figura 5-5: Columna Sintetizada de Vega et al. (2005), Completada con la Información de Martínez et al. (2004), Higley (2004) para Cuenca Tumbes



5.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Según ANA (MINAGRI - ANA, Noviembre 2009), el área estudiada porel INGEMMET (Martínez, 1970), presenta intensas deformaciones debido al tectonismo Andino, teniendo como precedente al tectonismo paleozoico que predispuso el fracturamiento y fallamiento en el basamento y que tendría enorme influencia en la cobertura terciaria. Esto trajo como consecuencia un terciario afectado por fallamiento normal y gravitacional. La característica principal son el sistema de horst y graben con mayor desarrollo de fallas normales, aunque también se han descrito inversas; algunas de éstas como reactivación de antiguas fallas normales.

Las fallas regionales principalmente presentan rumbo noreste – suroeste, las cuales no forman macro discontinuidades, garantizando el movimiento del agua subterránea regional,

sin cambios significativos de dirección, por lo que el flujo del agua puede considerarse como continuo con descarga hacia el océano.

La Falla Tahuín. - Definida por Aspden et al., (1995), constituye una estructura regional de rumbo E-O, se extiende desde la quebrada Bejucal hasta la represa Tahuín y pone en contacto los esquistos de la unidad Río Panupali con la División Melange Palenque.

Falla Zanjón Naranjo. – Se extiende desde el sector norte Quebrada Seca en la frontera con el Perú, hasta el noroeste del poblado de Piñas, con una longitud aproximada de 50 km, de tendencia E-W.

Falla Palmales. - Definida por Feininger (1976), tiene cinemática inversa, con rumbo E–O y buza hacia el sur. Atraviesa ambos países en la confluencia de la quebrada Palmales (Perú) y con la quebrada de Lajas (Ecuador). En el lado de Perú, esta falla se extiende longitudinalmente al valle de la quebrada Palmales, corta en el lado peruano rocas metamórficas compuesta por anfibolitas, en el lado ecuatoriano esta falla marca el límite de los depósitos aluviales con los afloramientos rocosos, que pertenecen la unidad Quebrada Plata.

Falla Manabi de El Oro. – Esta falla se ha identificado en Ecuador, de dirección NEE, atraviesa al Complejo Metamórfico del Oro, pasando por la Quebrada Palo de Oro.

Falla El Cedro. - Se encuentra localizada en el lado ecuatoriano, presenta un rumbo de N40°E buzando 65° hacia el SE y de cinemática inversa, con variaciones en la dirección del buzamiento.

Falla Chiriboga. – Es la falla principal que divide las unidades El Tigre y La Victoria denominada Chiriboga, tiene dirección EO, buza 75° N, evidencias de esta falla se observan al norte del poblado de Chiriboga donde se encuentran amplias zonas de deformación y fallas menores, estaestructura ocasiona cambios en la dirección de la foliación.

Falla Balcones. - Esta falla tiene rumbo N85°E cerca de la línea de frontera, cortada por pequeñas fallas transversales; el alineamiento principal pone en contacto al intrusivo Higuerón con las formaciones sedimentarias del terciario (Información obtenida de la Tesis de: Alex Leoncio Condori, Arequipa 2015); en ella se menciona la falla como Falcones.

En la zona de estudio, se observa que la trayectoria de la falla Balcones, cruza la Formación Tumbes, que es una de las más representativas desde el enfoque hidrogeológico; y los depósitos Cuaternarios recientes aluviales de la Quebrada Tutuma; también se puede distinguir a una de las fallas menores, situada cerca de la localidad El Corral; la cual intercepta perpendicularmente a la Falla Balcones modificando su trazo.

Falla La Angostura. - Esta estructura geológica, es de carácter regional y con un plano de falla vertical a sub vertical con un rumbo general de N70°O, se encuentra transversal al río Tumbes y pone en contacto el intrusivo Higuerón con las rocas terciarias y metamórficas. Esta falla en el área en estudio atraviesa a la Quebrada Seca (Faical).

Asociadas a fallas regionales en el lado peruano, tenemos:

Fallas Menores. - Se infiere que posiblemente se encuentran asociadas al tectonismo de la fase Quechua (Mioceno), y se manifiesta con levantamientos verticales que luego dan lugar a erosión y por consiguiente a discordancias paralelas, como las que se observan entre las

formaciones Zarumilla, Cardalitos y Tumbes. En la mayoría de los casos, la cobertura vegetal impide seguir su rumbo con claridad.

Para propósitos del presente estudio hidrogeológico se ha elaborado ocho (08) secciones geológicas, (Figura 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-10, 5-11, 5-12 y 5-13), tanto longitudinales a la cuenca como transversales, con la finalidad de interpretar las litologías y sistemas de fallas de toda la Cuenca Zarumilla, incluyendo el territorio peruano como ecuatoriano.

En las secciones longitudinales (Figuras 5-6 y 5-7) se pueden apreciar la existencia de rocas más antiguas a partir de la cuenca intermedia hacia la cabecera, compuesta por rocas metamórficas, como los Grupos Piedras, Tahuin San Roque, Tahuin Capiro y Tahuin, que están afectadas por sistemas de fallas sub-regionales a regionales. Desde esta parte intermedia hacia la cuenca baja, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, se observan depósitos de terrazas marinas y conglomerados y areniscas con una potencia que van de 20 hasta 100 m aproximadamente, que sobreyacen generalmente a lutitas.

En estas mismas secciones se pueden identificar secuencias de depresiones limitadas por fallas, que representan los sistema de Graben y Horst.

Las secciones geológicas transversales ayudan a identificar la profundidad de los materiales sueltos y recientes en la parte baja de la cuenca, como las terrazas marinas y las areniscas y conglomerados, con espesores que fluctúan entre 50 y 60 m; así como la exposición de rocas antiguas en la parte alta de la cuenca, compuesta casi en su totalidad por rocas metamórficas.

Es necesario precisar que en estas interpretaciones geológicas realizadas, se pueden apreciar que muchas de las fallas geológicas presentes en el lado ecuatoriano no necesariamente se muestran en el lado peruano, esto debido a que las interpretaciones de los servicios geológicos de cada país no pueden ser modificados, dado que son las únicas entidades autorizadas, y, además, por no ser parte del alcance del presente estudio.

Aunque en muchos de los casos se evidencia la continuidad de los sistemas de fallas hacia ambos territorios, esta uniformización e integración de las interpretaciones geológicas estructurales debería ser parte de un futuro trabajo específico binacional.

Figura 5-6: Sección Geológica Interpretada 1-1´

Figura 5-7: Sección Geológica Interpretada 2-2´

Figura 5-8: Sección Geológica Interpretada 3-3´

Figura 5-9: Sección Geológica Interpretada 4-4´

Figura 5-10: Sección Geológica Interpretada 5-5´

Figura 5-11: Sección Geológica Interpretada 6-6´

Figura 5-12: Sección Geológica Interpretada 7-7´

Figura 5-13: Sección Geológica Interpretada 8-8´

6 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

6.1 INTRODUCCIÓN

Esta actividad considera la prospección del área de estudio mediante sondeos geofísicos, por los métodos de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Sondeo por Transitorios Electromagnéticos (TDEM), en sectores donde se requirieron información geofísica complementaria.

De acuerdo con el plan de trabajo aprobado (Producto 1), se ejecutaron 10 ensayos SEV y 10 ensayos TDEM, los cuales se han distribuido tanto en el sector peruano como en el sector ecuatoriano de la cuenca transfronteriza Zarumilla. Esta tarea fue ejecutada por empresas especializadas en estudios geofísicos, las cuales ejecutaron la prospección bajo la dirección y supervisión de la Consultora. La prospección mediante ensayos TDEM fue ejecutada por la empresa especializada Valdor Sudamérica S.A.C (www.valdorsac.com) y las pruebas SEV fue ejecutada por Con&Sol MCR S.A.C. (www.conysolmcr.com).

6.2 FUNDAMENTOS DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPLEADOS

6.2.1 Sondajes Eléctrico Verticales (SEV)

La resistividad es la dificultad que presenta un material o un medio, para establecer un flujo de corriente eléctrica inducido. Las variables físicas que se utilizan para comprender las propiedades eléctricas del medio y la metodología de medición de éstas son básicamente: el Voltaje, la Intensidad de Corriente (CON&SOL, 2019).

El Voltaje (V) que también es conocido como tensión o diferencia de potencial, es la presión que una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza Electromotriz ejerce sobre las cargas a través de un medio y su unidad de medida es el voltio [v]. La tasa a la cual estas cargas pasan a través de una sección, o también llamado flujo de electrones, se denomina Corriente o Intensidad de Corriente (I) y su unidad de medida es el amperio [A] (CON&SOL, 2019).

Este flujo de electrones por el cual estas cargas fluyen, y a la capacidad de impedir el movimiento de cargas se le denomina Resistencia (R) y su unidad de medida es el ohm [Ω]. Existe una relación entre estas tres variables que está dada por la Ley de Ohm (CON&SOL, 2019):

$$V = R*I$$

Distintos materiales ofrecen distintas resistencias al flujo de electrones que pasa a través de ellos. Así, por ejemplo, un alambre de cobre deja pasar más fácilmente la corriente que un alambre de hierro; es decir, el hierro ofrece una mayor resistencia al flujo de electrones (CON&SOL, 2019).

Esta diferencia es debida a una propiedad intrínseca de cada material que se denomina Resistividad (ρ) y su unidad de medida es el ohm-m (CON&SOL, 2019).

Una amplia gama de métodos eléctricos usados en prospección geofísica, apuntan a la medición de la resistividad de los materiales del subsuelo y la interpretación de estos datos pretende dar una caracterización del medio geológico en base a sus resistividades (CON&SOL, 2019).

La resistividad de una roca no depende solo de su litología, sino que también su capacidad de alojar en sus poros, soluciones salinas que favorezcan la conducción eléctrica a través de iones en solución. Para la resistividad de una roca, resultan entonces importantes factores como: porosidad, salinidad de las soluciones, compactación, y variables de ambiente como presión y temperatura (CON&SOL, 2019).

La resistividad en las rocas varía entonces en un amplio rango dependiendo de cómo interactúen las variables antes mencionadas (CON&SOL, 2019).

En depósitos no consolidados, la resistividad aumenta al incrementarse la granulometría predominante, y en todos los casos, las rocas que contienen agua mineralizada disminuyen su resistividad (CON&SOL, 2019).

6.2.1.1 Descripción

En el SEV se introduce corriente continua al terreno mediante un par de electrodos de emisión, colocado en la parte externa A-B, donde en su recorrido radial desde cada punto de emisión experimentan una caída de tensión acordes con los factores condicionantes como humedad, textura del medio, grado de mineralización, temperatura y otros. Es así como esta caída de tensión se recepciona en otro par de electrodos internos M-N, donde las medias sucesivas parten de un punto cero, en forma ascendente y lineal (CON&SOL, 2019).

Un Sondaje Eléctrico Vertical, como su nombre lo dice, es un conjunto de medidas tomadas en un mismo punto en la superficie, pero a distinta profundidad, obteniendo distintas medidas de resistividad aparente. Independientemente del arreglo de electrodos utilizados, este, está centrado siempre en un mismo punto (sobre el cual se desea realizar el SEV) y la profundidad de la medida depende de la separación entre los electrodos (CON&SOL, 2019).

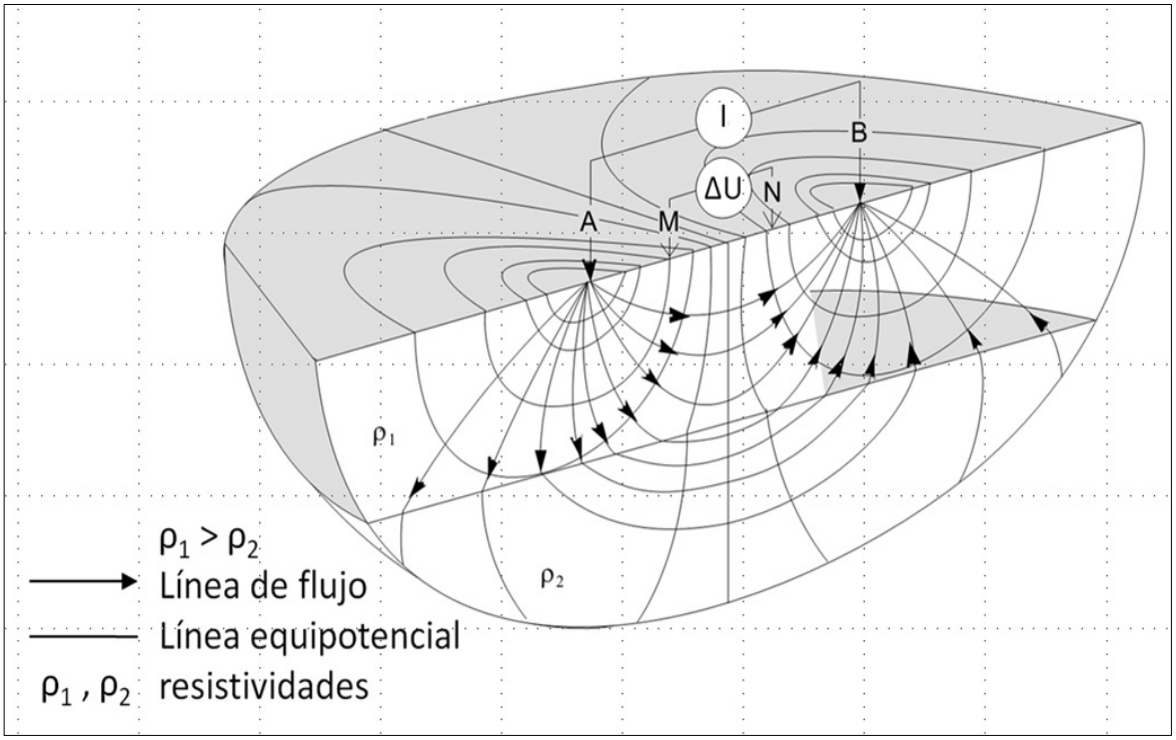
Para interpretar los datos de un SEV se tiene que asumir un modelo de capas del medio en estudio (Modelo Unidimensional), es decir, que la resistividad varía solo en profundidad y no lateralmente, un supuesto importante, ya que no todos los medios se comportan de esta manera (CON&SOL, 2019).

Una información importante que se puede obtener de un SEV, es un cambio de resistividad del medio, lo que se verá reflejado en un cambio en las medidas de resistividad aparente, aunque solo la inversión de los datos puede dar una información más confiable de la profundidad a la que ocurre este cambio (CON&SOL, 2019).

La inversión de los datos de resistividad aparente es un complejo proceso matemático con el cual se obtiene un modelo de la distribución de resistividad real en el medio (CON&SOL, 2019).

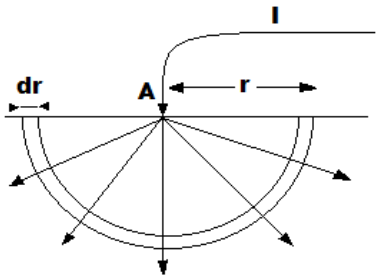
El arreglo utilizado, para esta campaña fue el de tipo Schlumberger, es decir, que los electrodos de potencial estarán al centro separados una distancia **a** y los electrodos de corriente estarán en los extremos a una distancia **na** de los electrodos de potencial. Otra forma de caracterizar la geometría para este arreglo es denominar **AB** a la distancia entre los electrodos de corriente y **MN** a la distancia entre los electrodos de potencial (véase Figura 6-1), (CON&SOL, 2019).

Figura 6-1: Arreglo Tipo Schlumberger



Fuente: Estudio Geofísico mediante Sondajes Eléctrico Verticales – Informe (CON&SOL, 2019)

Supongamos que introducimos una corriente de Intensidad "**I**" en el suelo en un punto **A**, y mediante la Ley de Ohm calculamos la resistencia "R", que opone al paso de esa corriente un casquete (semiesférico) de radio "r" y espesor "dr" (CON&SOL, 2019).



$$R = \rho \frac{longitud}{Sección}$$

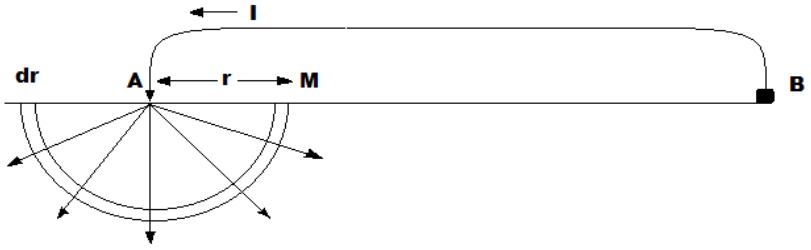
$$\text{Intensidad} \quad = \Delta v / R$$

Aplicando las ecuaciones anteriores de resistividad e intensidad para la superficie semiesférica, obtenemos (CON&SOL, 2019):

$$V = \rho \frac{\dot{I}}{2\Pi r}$$

Para introducir esa corriente debe existir otro electrodo **B**, por lo cual el potencial generado en el punto **M** será igual al producido por **A** menos el producido por **B**.

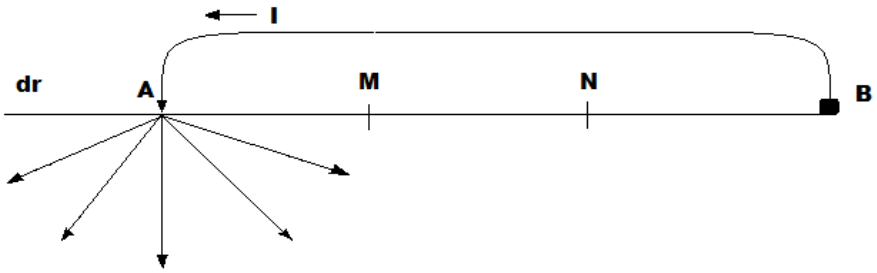
Aplicando dos veces la ecuación y restando, obtenemos el potencial en el punto **M**:



$$V_M = \frac{\rho I}{2\Pi \overline{AM}} - \frac{\rho I}{2\Pi \overline{BM}}$$

Pero en la práctica no medimos el potencial en un punto, sino que medimos la diferencia de potencial entre dos puntos **M** y **N** (CON&SOL, 2019)

$$V_N = \frac{\rho I}{2\Pi \overline{AN}} - \frac{\rho I}{2\Pi \overline{BN}}$$



Por tanto, la diferencia de potencial entre los puntos **M y N** será (CON&SOL, 2019):

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

Despejando la resistividad:

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

Simplificando, y llamando **k** a la segunda fracción, resulta la fórmula que se utiliza en campo en cada medida:

$$\rho = \frac{\Delta v}{I} k$$

Esta constante **k** se denomina coeficiente geométrico del dispositivo, porque depende solamente de las distancias entre los cuatro electrodos. Si se trabaja con distancias predeterminadas, los valores de **k** ya se llevan calculados (CON&SOL, 2019)#

Para eliminar las resistencias de contacto **A** y **B**, se utilizaron 04 electrodos por posición de corriente (CON&SOL, 2019).

En el dispositivo de Schlumberger la distancia **MN** es pequeña en relación con **AB**, generalmente **AB/5** > **MN** > **AB/20**. En la práctica **MN** se mantiene tan pequeño como sea posible siempre que se puedan conseguir lecturas correctas del voltímetro (CON&SOL, 2019).

6.2.1.2 Parámetros de Adquisición

- Configuración : Schlumberger.
- AB/2 : 150 metros.
- Salida de energía : 1 Kw.

6.2.1.3 Procedimiento

Trabajo de Campo

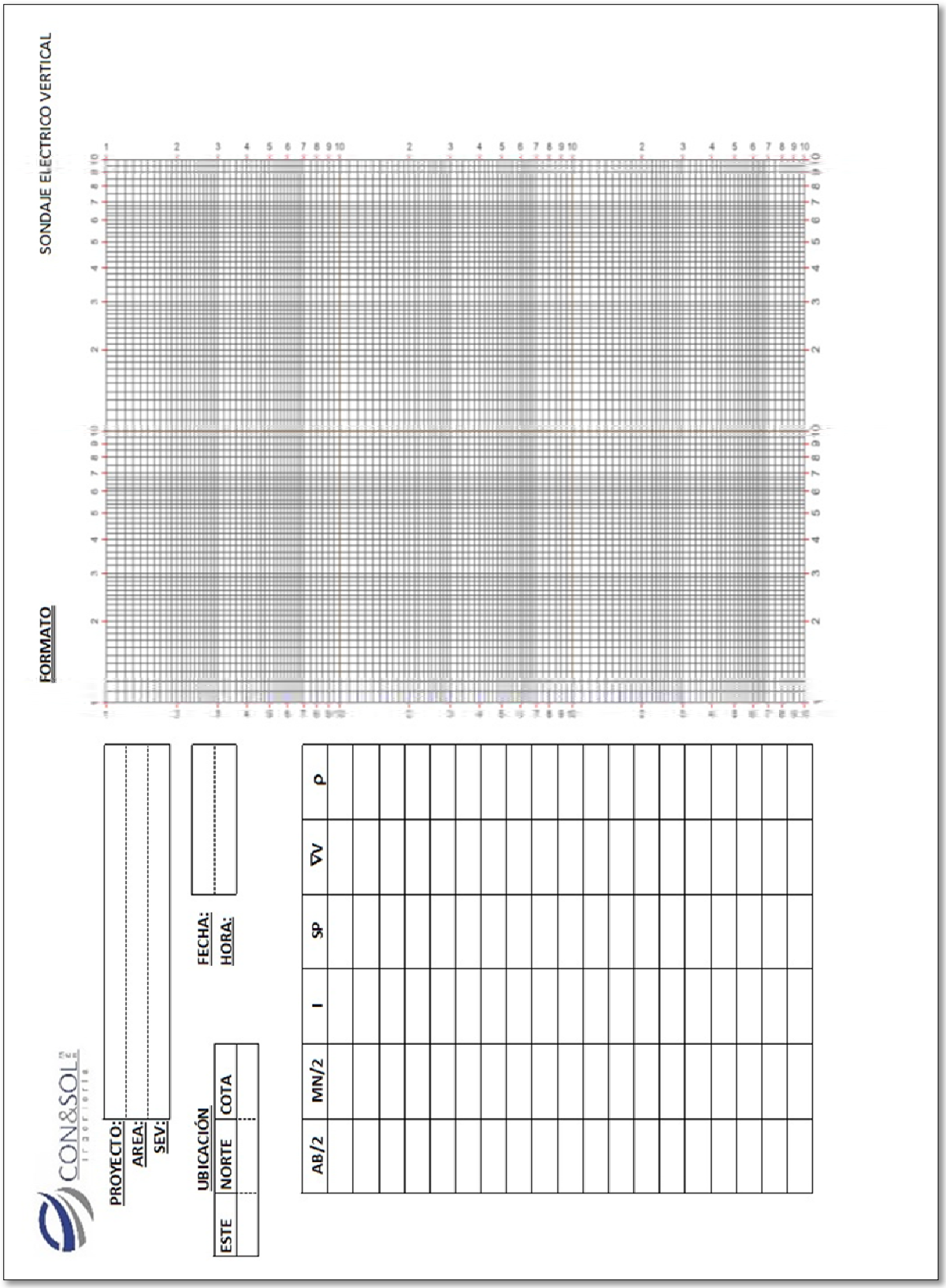
Los trabajos se iniciaron fijando en el terreno el punto elegido como centro del SEV, en el que se colocó una estaca que permitió localizarlo fácilmente. Se determinó el rumbo del dispositivo y se tendieron dos cintas métricas en esta dirección y en sentidos opuestos, con el origen en el punto central. Estas cintas permitieron determinar las posiciones de los electrodos en cada estación (véase Foto 6-1). A pocos metros del origen se instalaron los instrumentos de medición (transmisor y receptor), tal como se muestra en la Foto 6-1).

Foto 6-1: Distribución y Trabajos de Campo

Se colocaron los electrodos en las posiciones iniciales y se conectaron los cables. Antes de iniciar las mediciones, se procedió a la verificación de que todas las conexiones funcionan correctamente, y que la resistividad entre electrodo-suelo es suficientemente baja como garantizar una buena inyección de corriente. En el caso de tener valores elevados, generalmente basta con clavar un poco más los electrodos, o humedecer el terreno para minimizar la resistencia de contacto.

Terminada la preparación, el operador procedió a realizar la inyección de corriente y la medida del potencial eléctrico producido, tomando nota en la hoja de campo (véase Figura 6-2).

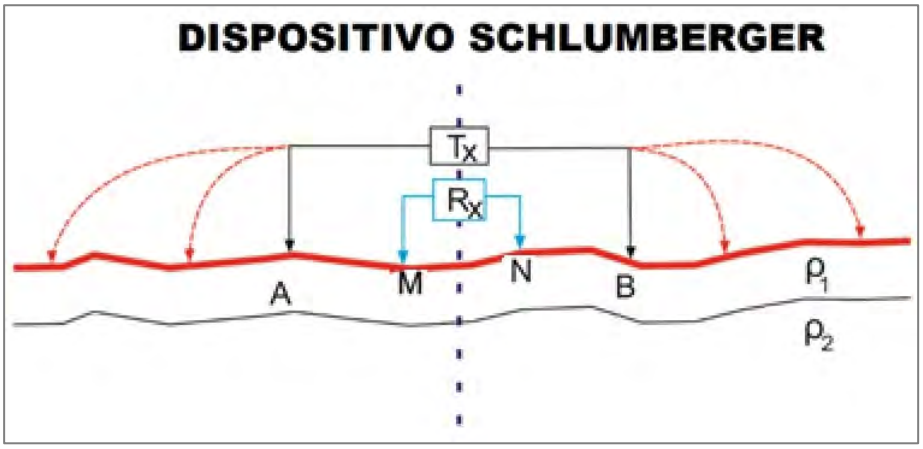
Figura 6-2: Hoja de Campo



Fuente: Estudio Geofísico mediante Sondajes Eléctrico Verticales (CON&SOL, 2019)

Seguidamente se desplazaron los electrodos A y B a las posiciones correspondientes a la segunda estación y se hizo la medición. Se prosiguió así en las estaciones subsiguientes (véase Figura 6-3).

Figura 6-3: Configuración de Electrodos

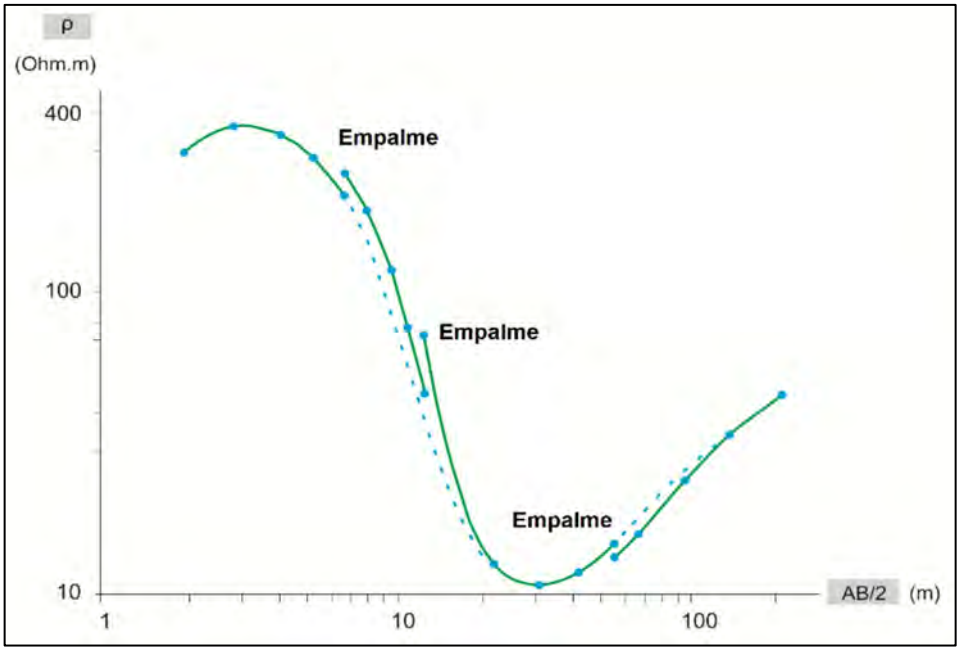


Fuente: Estudio Geofísico mediante Sondajes Eléctrico Verticales (CON&SOL, 2019)

Los valores de **ΔV** disminuyen rápidamente de estación a estación. Cuando el operador prevea que la lectura siguiente va a ser difícil por la pequeñez de **ΔV** debe hacer un "empalme", esto consiste en la medición de la resistividad aparente para una misma distancia AB/2, con dos separaciones diferentes de MN.

El operador debe ir comprobando la calidad de los resultados que va obteniendo, por lo que debe dibujar en la hoja de campo la curva de resistividades aparentes a partir de las medidas, lo cual permite repetir y comprobar los puntos que resulten sospechosos en dicha curva (véase Figura 6-4).

Figura 6-4: Control de Datos



Fuente: Estudio Geofísico mediante Sondajes Eléctrico Verticales (CON&SOL, 2019)

Trabajo de Gabinete

La información de campo se ha procesado de acuerdo con las técnicas establecidas para la exploración eléctrica en aguas subterráneas. En la interpretación de los SEVs se utilizó el programa IX1D versión 2.09 desarrollado por Interpex Limited. Mayor detalle en el ítem 6.5.1.

6.2.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM)

6.2.2.1 Descripción

En el método electromagnético en dominio de tiempo (TDEM, sigla en inglés de Time Domain ElectroMagnetic), una bobina de transmisión (conocida como transmitter loop en inglés) ubicada sobre la superficie del terreno es energizada por una corriente bipolar, generando un campo electromagnético primario. Durante el envío de corriente ("time-on") un campo magnético estático es establecido en la tierra. Cuando la corriente en la bobina de transmisión es cortada rápidamente, el campo electromagnético inducido en la tierra hace que las corrientes torbellino (corriente de Foucault o eddy current en inglés) fluyan tanto en el suelo como en los conductores por debajo de la superficie. Las amplitudes de estas corrientes decaen rápidamente en el tiempo debido a la resistividad finita de la tierra, permitiendo detectar cuerpos conductivos o medir la conductividad de la tierra misma.

La amplitud del flujo de corriente en función del tiempo se mide registrando el decaimiento de su campo magnético utilizando una pequeña bobina receptora de múltiples vueltas (receiver coil en inglés) localizada en el centro de la bobina de transmisión. El decaimiento del campo es registrado en diferentes intervalos de tiempo durante el corte de corriente ("*time-off*") (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

6.2.2.2 Parámetros de Adquisición

Los parámetros de adquisición se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Parámetros de Adquisición - Geofísica TDEM

Equipos/Parámetro	Descripción
Transmisor	Geonics, TEM-37
Receptor	Geonics, Protem-D
Sincronización	Cable de Referencia
Antena	Geonics, EM 3D
Tamaño cuadro	300m x 300m
Forma de onda	Cuadrada bipolar 50% duty cycle
Frecuencia	H(30Hz), M(7.5Hz)
Periodo de Integración	15 segundos
Número de canales	20 ventanas de tiempo
Corriente transmitida	13 amperios (nominal)
Componente medido	Componente vertical dBz/dt del campo magnético secundario (nV/m^2)
Intervalo de lecturas	Variable

Fuente: Reporte Geofísico Electromagnético (TDEM) - Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla (PNUD) (Valdor Sudamerica SAC, 2019)

6.2.2.3 Procedimiento

Trabajo de Campo

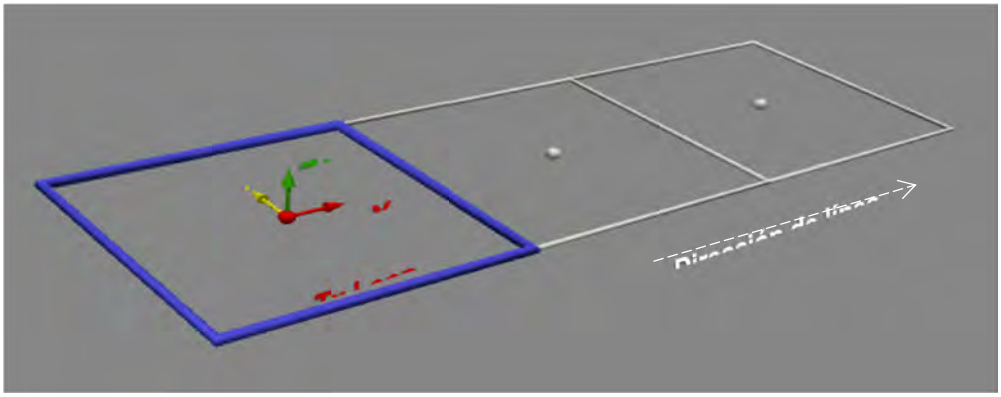
La adquisición de datos de los sondajes TDEM se realizó de la siguiente manera:

1. En la ubicación determinada por el cliente para realizar el sondaje, se instaló la bobina o cuadro de transmisión mediante el tendido de un cable de corriente formando un cuadro de 300 metros x 300 metros en la superficie del terreno.
2. Los cables de la bobina de transmisión se conectaron al equipo transmisor TDEM.
3. La bobina de recepción o antena receptora se ubicó al centro del cuadro de transmisión, y fue conectada al equipo receptor TDEM.
4. El transmisor se conectó al receptor mediante un cable de referencia para establecer la sincronización entre ambos equipos.
5. Se procedió al envío de corriente desde el equipo transmisor y en el equipo receptor se ingresaron los valores de corriente y tiempo de corte generados por el transmisor.
6. Antes de la toma de lecturas en el receptor se verificó que el campo primario sea positivo en el centro del cuadro de transmisión. Si el campo primario era negativo, se tuvo que invertir los conectores del cuadro de transmisión en el equipo transmisor.
7. Se procedió a la toma de lecturas en el equipo receptor con las frecuencias 30Hz (H), 7.5Hz (M) y en algunos casos la frecuencia baja 3.0Hz (L).
8. Durante la toma de lecturas se analizó las curvas de descarga y se procedió a realizar más de tres repeticiones como parte del control de adquisición de datos. Los datos tuvieron una muy buena repetitividad.
9. Concluida las lecturas se procedió al apago de equipos y recojo de cables, para dirigirse al próximo sondaje a ejecutar.

Para cada sondaje se midieron con dos tipos de frecuencia media (M-Medium) y alta (H-High). Los loops (bobinas de transmisión) fueron preparados con un cable de 10AWG, permitiendo una resistencia de contacto de 5.1 ohmios promedio (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

La bobina receptora (antena 3D) fue ubicada en el centro de cada loop, donde la convención de polaridad del eje Z se mantuvo positivo hacia arriba. La bobina receptora se mantuvo en el plano horizontal (X-Y) para todos los componentes de los sondeos (Valdor Sudamerica SAC, 2019), tal como se muestra en la Figura 6-5.

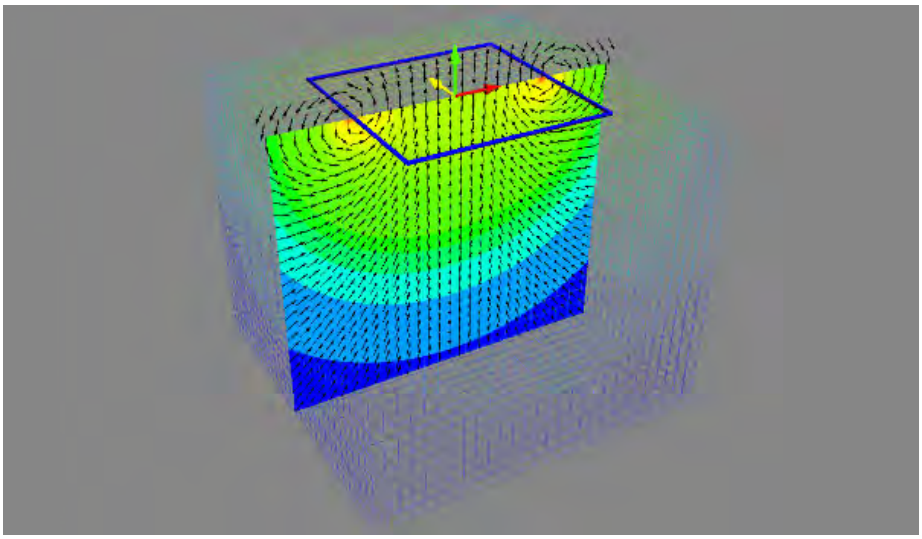
Figura 6-5: TDEM Moving Loop



Fuente: Reporte Geofísico Electromagnético (TDEM) - Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla (PNUD) (Valdor Sudamerica SAC, 2019)

El estudio electromagnético fue realizado con la configuración "*in-loop*". Las lecturas fueron adquiridas en el centro de la bobina de transmisión (*loop*), tal como se muestra en la Figura 6-6.

Figura 6-6: Corriente Producida por la Bobina Transmisora



Fuente: Reporte Geofísico Electromagnético (TDEM) - Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla (PNUD) (Valdor Sudamerica SAC, 2019)

Trabajo de Gabinete

Al final del día de trabajo los datos fueron descargados del equipo receptor enviados a la oficina de Lima para el procesamiento de información. Mayor detalle en el ítem 6.5.2.

6.2.2.4 Control de Calidad

La calidad de las lecturas recogidas fue verificada al momento de tomar la medición para asegurar la buena calidad de los datos obtenidos, controlando la caída de la curva para cada sondaje. La medición del componente Z del campo magnético secundario fue realizada con las frecuencias de 30.0 Hz (H) y 7.5 Hz (M) con el fin de abarcar la mayor parte del intervalo de tiempo posible, teniendo en cuenta los niveles de ruido. Los datos fueron registrados a través de un período de integración de 15 segundos a través de 20 ventanas (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

De regreso a la base de operaciones, los datos fueron transferidos desde la memoria del receptor hacia la PC Portátil. Los datos de cada punto se enviaron a la oficina principal en Lima para su posterior análisis (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

6.3 TRABAJO DE CAMPO

6.3.1 Sondajes Eléctrico Verticales (SEV)

Del 17 al 19 de setiembre del 2019 se realizaron los ensayos geofísicos SEV en el área de estudio, cuyos resultados permitirán identificar las zonas anómalas de baja resistividad relacionadas a mayores concentraciones de humedad y presencia de diferentes horizontes; así como posibles lineamientos eléctricos que pueden estar relacionadas a fracturas o fallas y contactos geoeléctricos, hasta una profundidad de 100 m.

En la Tabla 6-2 se presentan los detalles de la ubicación de los puntos SEV evaluados y en la Figura 6-7 su distribución en el área de estudio.

Tabla 6-2: Puntos de Evaluación - Geofísica SEV

N°	Sondaje Eléctrico Vertical	Sector	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)	
			Este (m)	Norte (m)
Sector Ecuatoriano				
1	SEV E-01	Carcabón	590498.70	9596953.90
2	SEV E-02	Palmales	598687.28	9594902.90
3	SEV E-03	Progreso	596322.75	9593278.50
4	SEV E-04	Manabí del Oro	599154.45	9588530.10
5	SEV E-05	Manabí del Oro	597175.20	9587702.10
Sector Peruano				
6	SEV P-01	Papayal	583756.34	9604287.8
7	SEV P-02	Papayal	583070.60	9605927.1
8	SEV P-03	Algarrobal (Nuevo progreso)	584357.26	9597146.8
9	SEV P-04	Leandro Campos (Mata Palo)	582162.18	9595985.5
10	SEV P-05	Quebrada Algarrobal	585489.15	9591664.7

En el Anexo VII-A se presentan vistas de los puntos de evaluación SEV ejecutados.

6.3.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM)

Del 27 de setiembre al 05 de octubre del 2019 se realizaron los ensayos geofísicos con el método TDEM en el área de estudio (ver), cuyos resultados permitieron definir el contraste de resistividades entre las capas subhorizontales en el subsuelo y profundidad del basamento hasta una profundidad de 400 m por debajo de la superficie. En la Tabla 6-3 se presentan los detalles de la ubicación de los puntos TDEM evaluados y en la Figura 6-7 su distribución en el área de estudio.

Tabla 6-3: Puntos de Evaluación - Geofísica TDEM

N°	Sondeo Transitorio Electromagnético	Altitud (msnm)	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)	
			Este (m)	Norte (m)
Sector Ecuatoriano				
1	TDEM E-01	71	589803	9599580
2	TDEM E-02	9	589785	9612801
3	TDEM E-03	9	587652	9612269
4	TDEM E-04	62	589041	9605401
5	TDEM E-05	49	596884	9594771
Sector Peruano				
6	TDEM P-01	7	576137	9615277
7	TDEM P-02	23	583755	9604283
8	TDEM P-03	8	582376	9613189
9	TDEM P-04	8	583344	9613365
10	TDEM P-05	11	585815	9611292

En el Anexo VII-A se presentan vistas de los puntos de evaluación SEV ejecutados.

Figura 6-7: Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) y Transitorios Electromagnéticos (TDEM) Ejecutados

6.4 EQUIPOS

6.4.1 Sondajes Eléctrico Verticales (SEV)

El listado de equipos usados para la prospección geofísica SEV se presenta en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4: Equipos - Geofísica SEV

N°	Descripción	Detalle
1	Receptor: Resistivímetro INNOVA TOMO	Mide y registra datos de resistividad en su memoria interna
2	Transmisor: Transmisor INNOVA Tx1000	Transforma la corriente continua en corriente alterna, la cual es inducida a la tierra por medio de impulsos eléctricos cada dos (02) segundos.
3	Fuente: Generador Hyundai 3000	Genera corriente 220v continua
4	Electrodos	Llevan la corriente a tierra. De ellos se toman lecturas de resistividad
5	Cables para transmisión de corriente	Inducen corriente al electrodo del transmisor
6	Cables de potencial	Transmite el potencial de corriente
7	GPS Navegador	Para determinar ubicación
8	Cámara fotográfica	Del equipo de comunicación disponible (celular o Tablet)
9	Vehículo de transporte	Camioneta

Fuente: Estudio Geofísico mediante Sondajes Eléctricos Verticales – Informe Preliminar (CON&SOL, 2019)

6.4.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM)

El listado de equipos usados para la prospección geofísica TDEM se presenta en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5: Equipos - Geofísica TDEM

N°	Descripción	Detalle
1	Receptor	PROTEM D
2	Transmisor	TEM-37
3	Cable de transmisión	AWG # 10
4	GPS	navegador
5	Cámara fotográfica	Del equipo de comunicación disponible
6	Vehículo de transporte	Camioneta

Fuente: Reporte Geofísico Electromagnético (TDEM) - Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla (PNUD) (Valdor Sudamerica SAC, 2019)

6.5 TRABAJO DE GABINETE

6.5.1 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV)

En la interpretación de los SEVs se utilizó el programa IX1D versión 2.09 desarrollado por Interpex Limited, programa de inversión de corriente directa (CC) 1-D, que admite la mayoría de las matrices de resistividad de CC, incluidas las matrices Wenner, Schlumberger Dipole-

dipole, Pole-dipole y Pole-pole. Tiene la capacidad de leer un registro de resistividad de un archivo ASCII plano, pudiendo reducir de forma interactiva el registro a varias capas discretas ajustando segmentos de línea recta a la conductancia acumulativa en el registro. El modelo resultante se puede copiar al modelo en el conjunto de datos actual para seguir modelando.

La inversión se lleva a cabo utilizando los comandos de Cálculo Inverso, iteración simple o iteraciones múltiples. La inversión también se lleva a cabo como parte de la estimación del modelo uniforme.

La inversión es un ajuste de mínimos cuadrados de parámetros no lineales. Esto se hace suponiendo que el problema directo es localmente lineal. Por lo tanto, el problema directo se reemplaza por la operación matricial:

$$\mathbf{o = c + A\ dp}$$

Donde, **c** es el resultado del cálculo directo utilizando el modelo actual, **o** es el conjunto de datos observados, **A** es la matriz jacobiana de derivadas parciales y **dp** es la mejora deseada del modelo que haría que los datos se ajusten a las observaciones en el caso ideal.

A se calcula perturbando cada uno de los parámetros de la capa a su vez y realizando un cálculo directo. Cada cálculo da una fila de la matriz. Los parámetros que son fijos no son perturbados y esas columnas se ponen a cero.

La inversión se lleva a cabo utilizando la regresión de cresta de una manera similar a la descrita por Inman (1975). Para cada iteración, se calcula una corrección del modelo utilizando el mejor factor de amortiguación disponible para esa iteración.

Para los comandos de iteración simples, el proceso se repite solo una vez. Para múltiples iteraciones, el proceso se repite y continúa hasta que la reducción en el error de ajuste del paso anterior sea demasiado pequeña para ser utilizada más.

Para los datos de Resistividad/IP, hay dos opciones adicionales cada una para iteraciones simples y múltiples: Solo resistividad y solo IP. El primero corrige temporalmente todos los parámetros del modelo IP mientras se invierte solo para resistividad y el segundo corrige todos los valores de resistividad del modelo mientras se invierte solo para IP. Los estados correctos/ libres originales de estos parámetros se restauran al finalizar.

Para un modelado suave, todos los espesores de capa son fijos y solo las resistividades se ajustan para adaptarse a los datos. En este caso, si se establece el indicador de Occam, se utiliza la inversión de Occam, que minimiza la aspereza del modelo, en lugar de la Regresión de cresta.

6.5.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM)

La inversión de cada sondaje TDEM fue realizada usando el programa Temixxl, desarrollado por Interpex Limited, utilizando el modelo de capas 1-D; para este propósito las dos frecuencias (30 H y 7.5 M) fueron usados (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

Todos los datos procesados se guardan en formato ASCII para cada sondaje. El procesamiento y control de calidad se realiza con el programa TEMIXXL (Valdor Sudamerica SAC, 2019).

6.6 RESULTADOS

6.6.1 Secciones Geoeléctricas

6.6.1.1 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV)

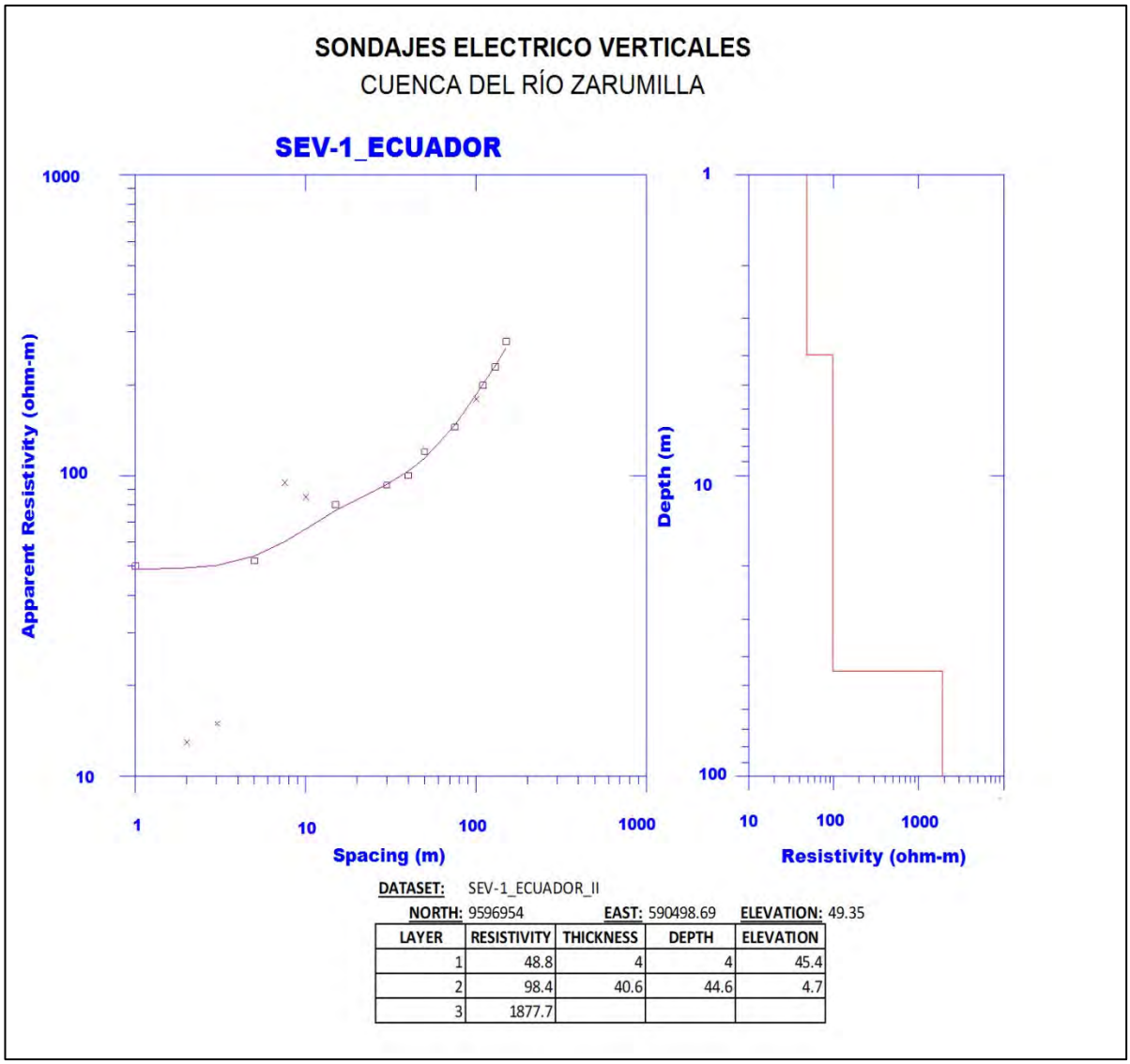
A continuación, se presenta la interpretación de los datos de los sondeos eléctricos realizados (véase Figura 6-8 a Figura 6-17), que generaron modelos de capas que, en el territorio ecuatoriano mostraron de dos (02) hasta tres (03) capas y en el territorio peruano de dos (02) hasta cuatro (04) capas (CON&SOL, 2019).

Debido a la ausencia de información sobre las unidades litológicas, por medio de perforaciones, se ha realizado la interpretación solo en base a los resultados de las resistividades eléctricas que, al tratarse de materiales sueltos del cuaternario, pueden interpretar a capas de material fino (arcillas o limos) con intercalación de materiales más gruesos (arenas y gravas) o macizos rocosos altamente fracturados.

SEV-1 – Ecuador

Si bien en este punto se ha generado un modelo de 3 capas, por los valores de resistividad observados, se puede considerar la presencia de 2 horizontes, siendo el contacto entre ambos en el cambio abrupto de resistividad (cambio de 98.4 Ohm-m a 1877.7 Ohm-m), definido a los 44.6 m de profundidad. El segundo horizonte podría estar relacionado a la capa de baja permeabilidad, mientras que el primer horizonte podría estar relacionado a materiales sueltos (arena, grabas y arcillas) con contenido de humedad (véase Figura 6-8).

Figura 6-8: SEV-1 Ecuador



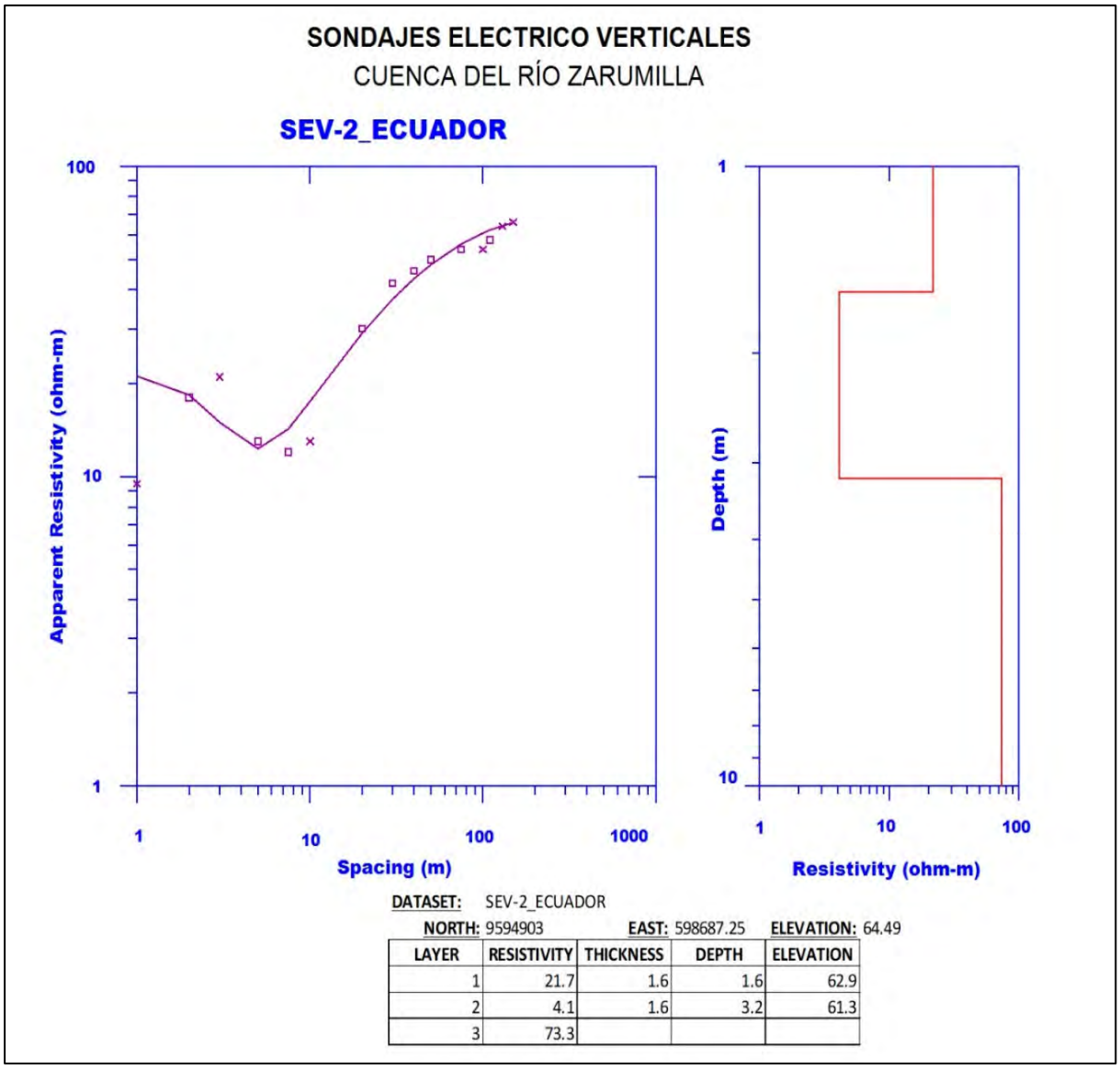
DATASET: SEV-1_ECUADOR_II
NORTH: 9596954 **EAST:** 590498.69 **ELEVATION:** 49.35

LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	48.8	4	4	45.4
2	98.4	40.6	44.6	4.7
3	1877.7			

SEV-2 – Ecuador

Se ha generado un modelo de 3 capas; sin embargo, se interpreta la presencia de 2 horizontes con resistividades marcadamente variables. El primer horizonte con resistividades de 21.7 a 4.1 Ohm-m; y el segundo con una resistividad de 73.3 Ohm-m, que representaría al horizonte más competente o levemente fracturado, a una profundidad de aproximadamente 3.2 m (véase Figura 6-9).

Figura 6-9: SEV-2 Ecuador



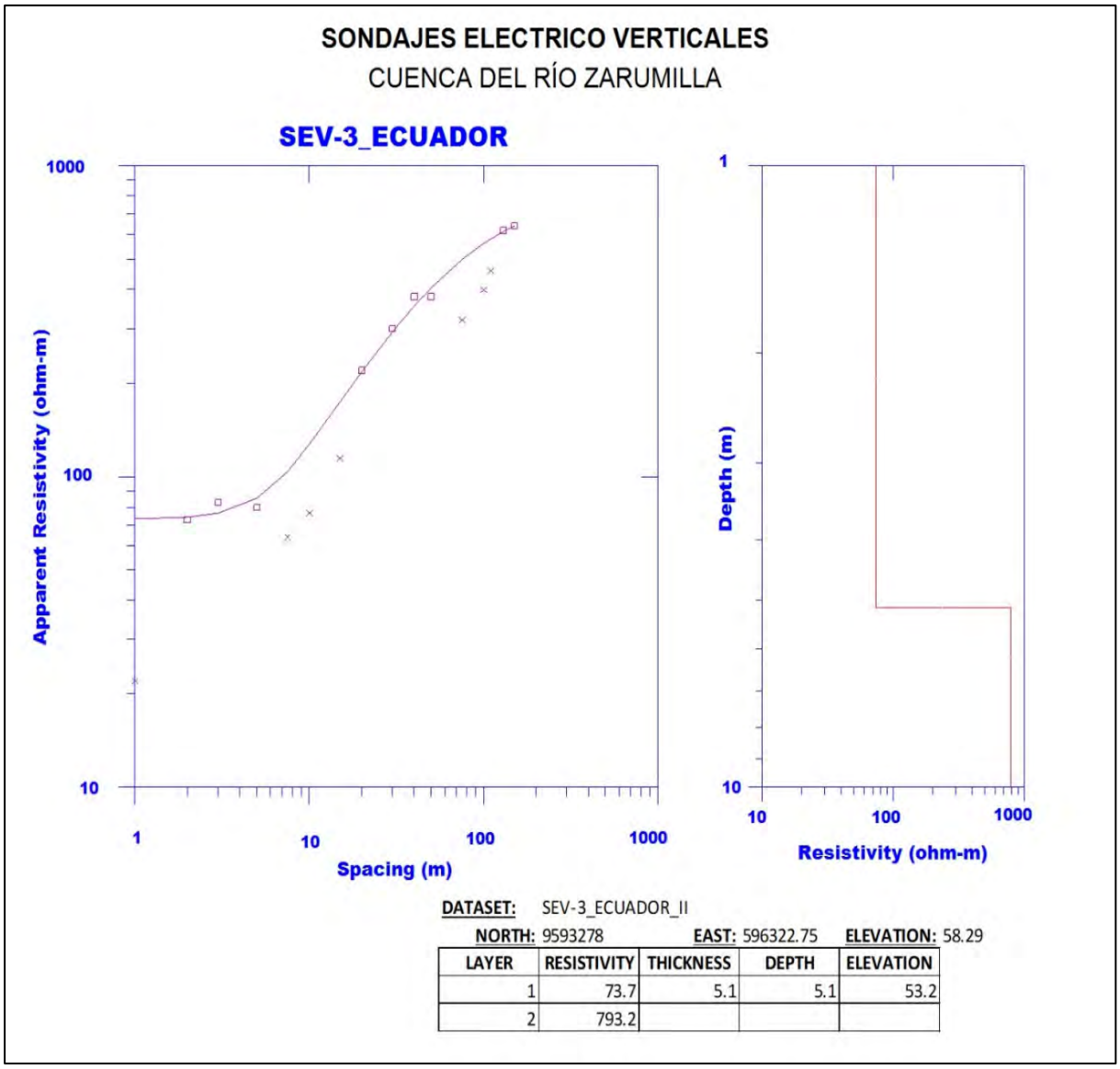
DATASET: SEV-2_ECUADOR
NORTH: 9594903 EAST: 598687.25 ELEVATION: 64.49

LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	21.7	1.6	1.6	62.9
2	4.1	1.6	3.2	61.3
3	73.3			

SEV-3 – Ecuador

Se ha definido un modelo de 2 capas, cuyo contacto se encuentra a 5.1 m de profundidad. El horizonte inferior tiene una resistividad de 793.2 Ohm-m, que estaría relacionada a la presencia de un estrato menos permeable; sobreyaciendo a este, se encuentra el primer horizonte con resistividad relativamente baja, con un valor de 73.7 Ohm-m, que estaría relacionado, posiblemente, a la presencia de finos (arcillas) con mayor contenido de humedad (véase Figura 6-10).

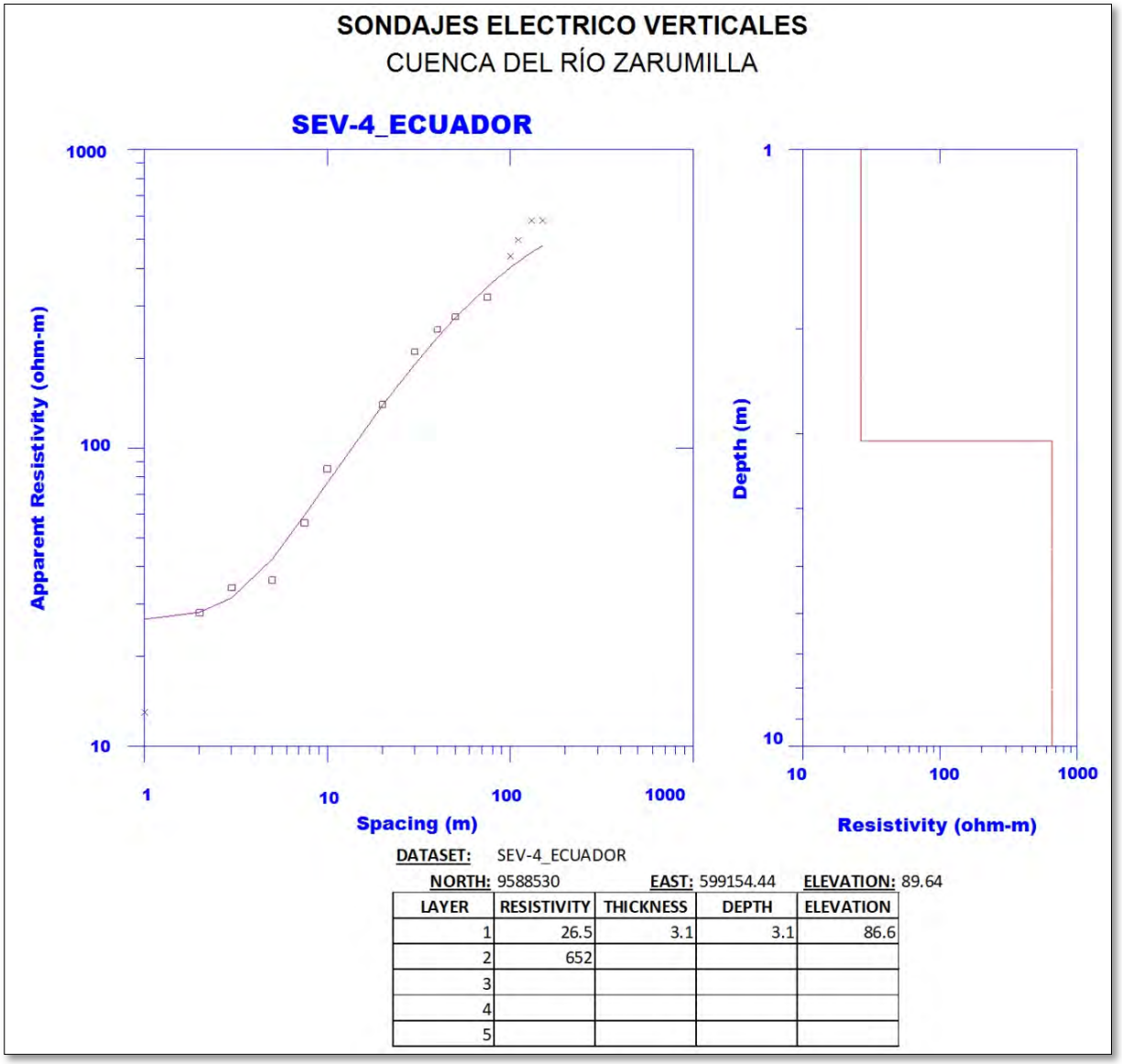
Figura 6-10: SEV-3 Ecuador



SEV-4 – Ecuador

Se ha definido un modelo de dos capas, donde la primera (en superficie) estaría relacionada a la presencia de materiales sueltos (posiblemente arenas y arcillas) con contenido de humedad, con una resistividad de 26.5 Ohm-m, la que alcanza un espesor de 3 metros y que estaría sobreyaciendo al estrato relacionado con un estrato menos permeable, posiblemente el basamento rocoso, con una resistividad de 652 Ohm-m (véase Figura 6-11).

Figura 6-11: SEV-4 Ecuador



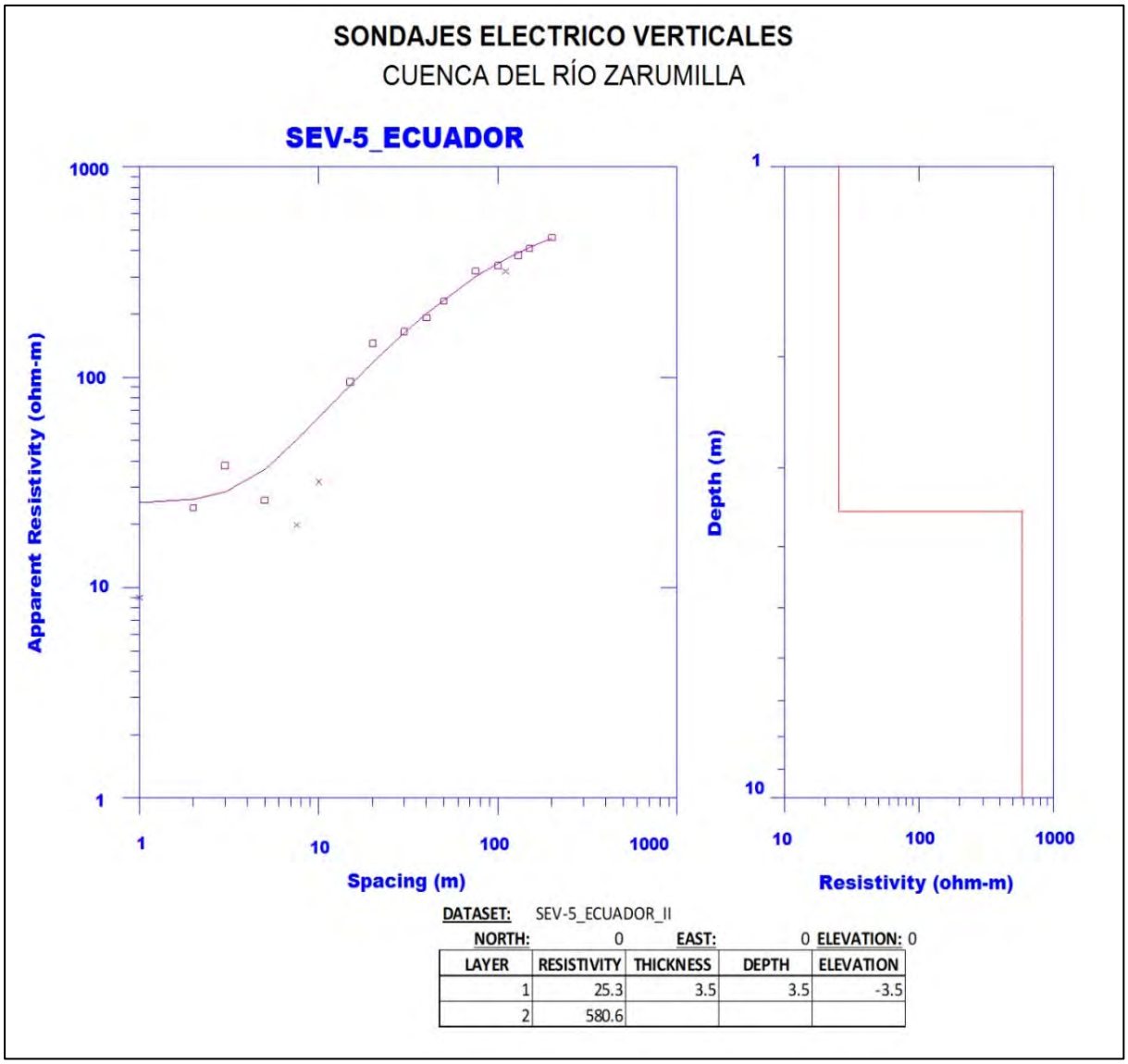
DATASET: SEV-4_ECUADOR
NORTH: 9588530 EAST: 599154.44 ELEVATION: 89.64

LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	26.5	3.1	3.1	86.6
2	652			
3				
4				
5				

SEV-5 – Ecuador

Se ha definido un modelo de 2 capas, donde el primero estaría relacionando a la presencia de materiales sueltos con mayor contenido de humedad, con 25.3 Ohm-m de resistividad, y que estaría sobreyaciendo a un horizonte de alta resistividad con un valor de 580.6 Ohm-m relacionado a un material más compacto sin contenido de humedad, a una profundidad de 3.5 m aproximadamente (véase Figura 6-12).

Figura 6-12: SEV-5 Ecuador



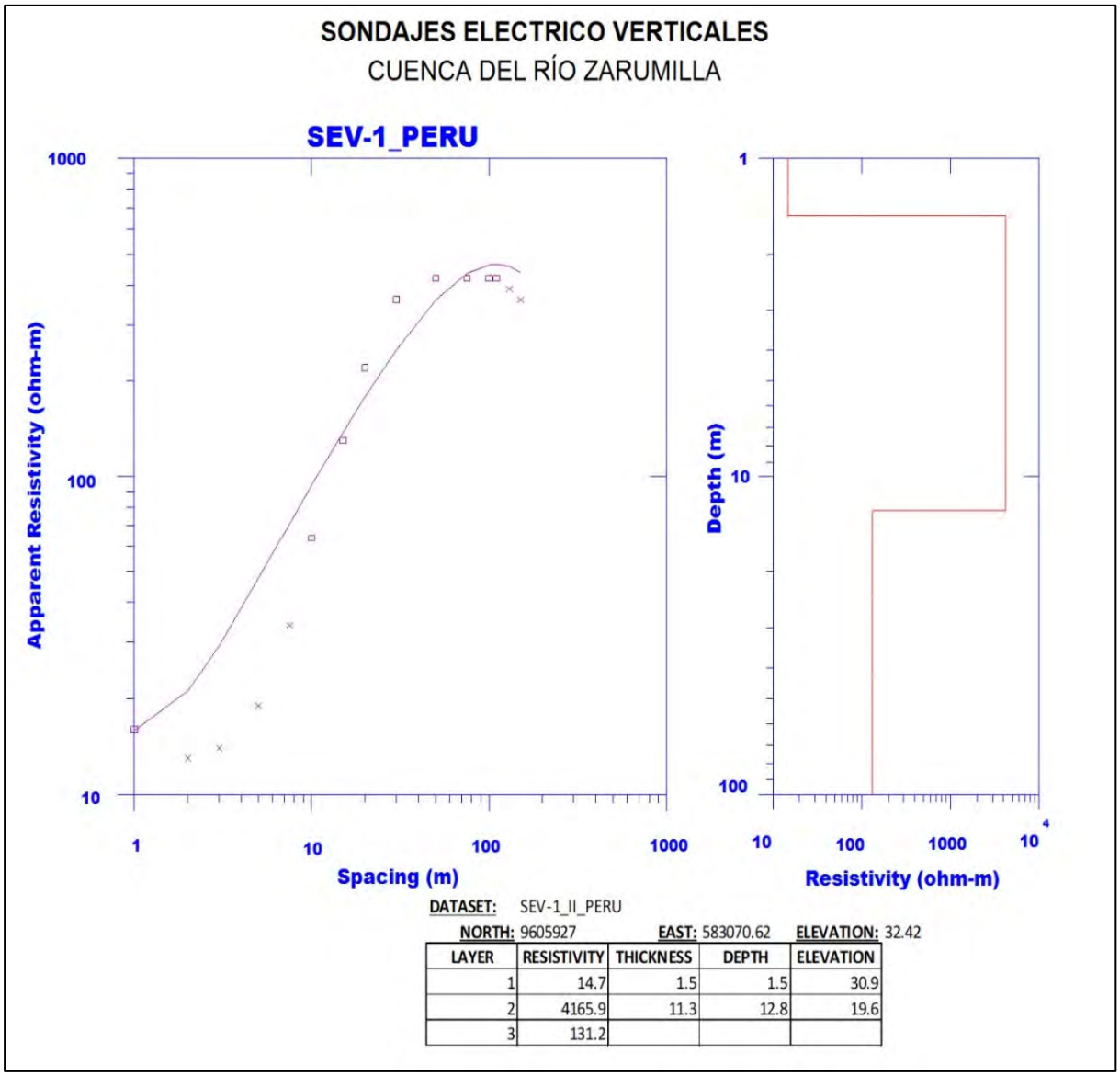
DATASET: SEV-5_ECUADOR_II
NORTH: 0 EAST: 0 ELEVATION: 0

LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	25.3	3.5	3.5	-3.5
2	580.6			

SEV-1 – Perú

Se ha generado un modelo de 3 capas, aunque por la marcada diferencia en las resistividades, de 14.7 Ohm-m a 4165.9 Ohm-m, se ha considerado la presencia de 2 horizontes, representando el primero a un material suelto y el segundo al probable lecho rocoso, a una profundidad de 12.8 m (véase Figura 6-13).

Figura 6-13: SEV-1 Perú



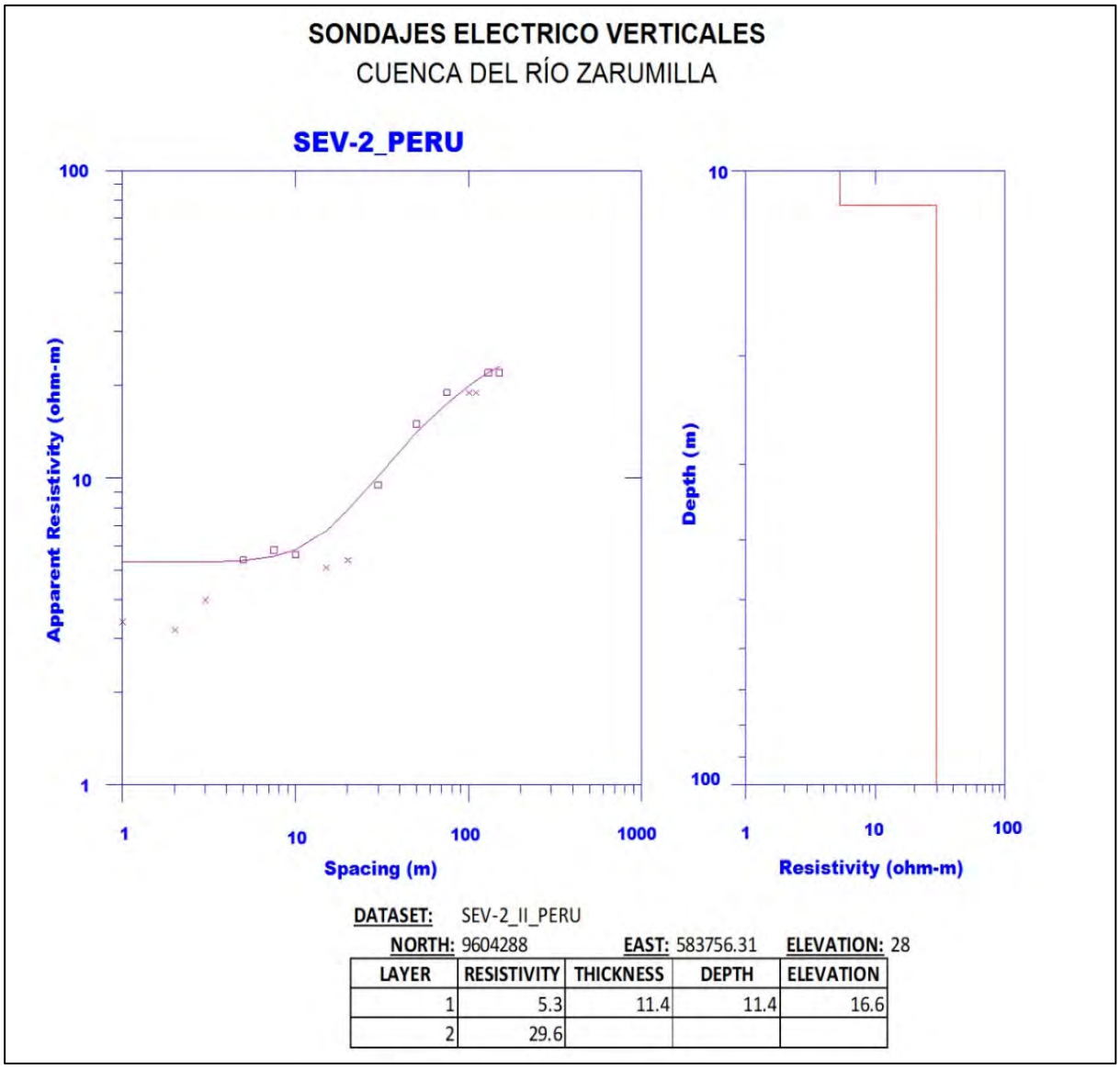
DATASET: SEV-1_II_PERU
NORTH: 9605927 EAST: 583070.62 ELEVATION: 32.42

LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	14.7	1.5	1.5	30.9
2	4165.9	11.3	12.8	19.6
3	131.2			

SEV-2 – Perú

Se ha generado un modelo de 2 capas, aunque por sus valores bajos de resistividades (5.3 Ohm-m y 29.6 Ohm-m), no indicarían la presencia de basamento rocoso macizo, sino la presencia de un horizonte con materiales sueltos o altamente fracturados (véase Figura 6-14).

Figura 6-14: SEV-2 Perú

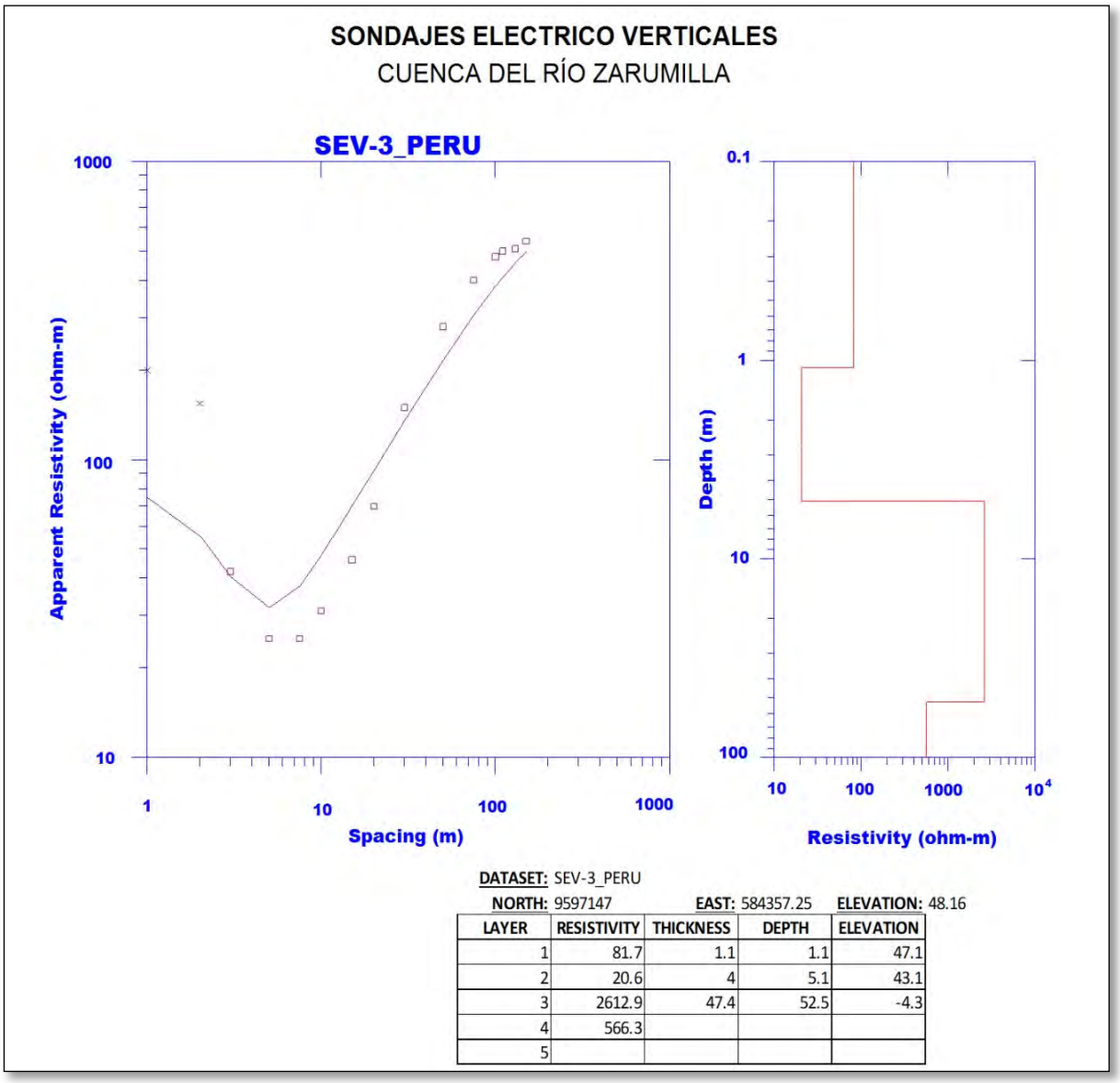


LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	5.3	11.4	11.4	16.6
2	29.6			

SEV-3 – Perú

Se ha generado un modelo de 4 capas, donde el basamento rocoso de baja permeabilidad con valores de resistividad comprendidos entre los 2612.9 Ohm-m y 566.3 Ohm-m, estaría definido aproximadamente a los 5.1 m de profundidad. Las otras 2 capas representarían el primer horizonte con valores de resistividad de 81.7 Ohm-m y 20.6 Ohm-m, compuesto por materiales sueltos (véase Figura 6-15).

Figura 6-15: SEV-3 Perú

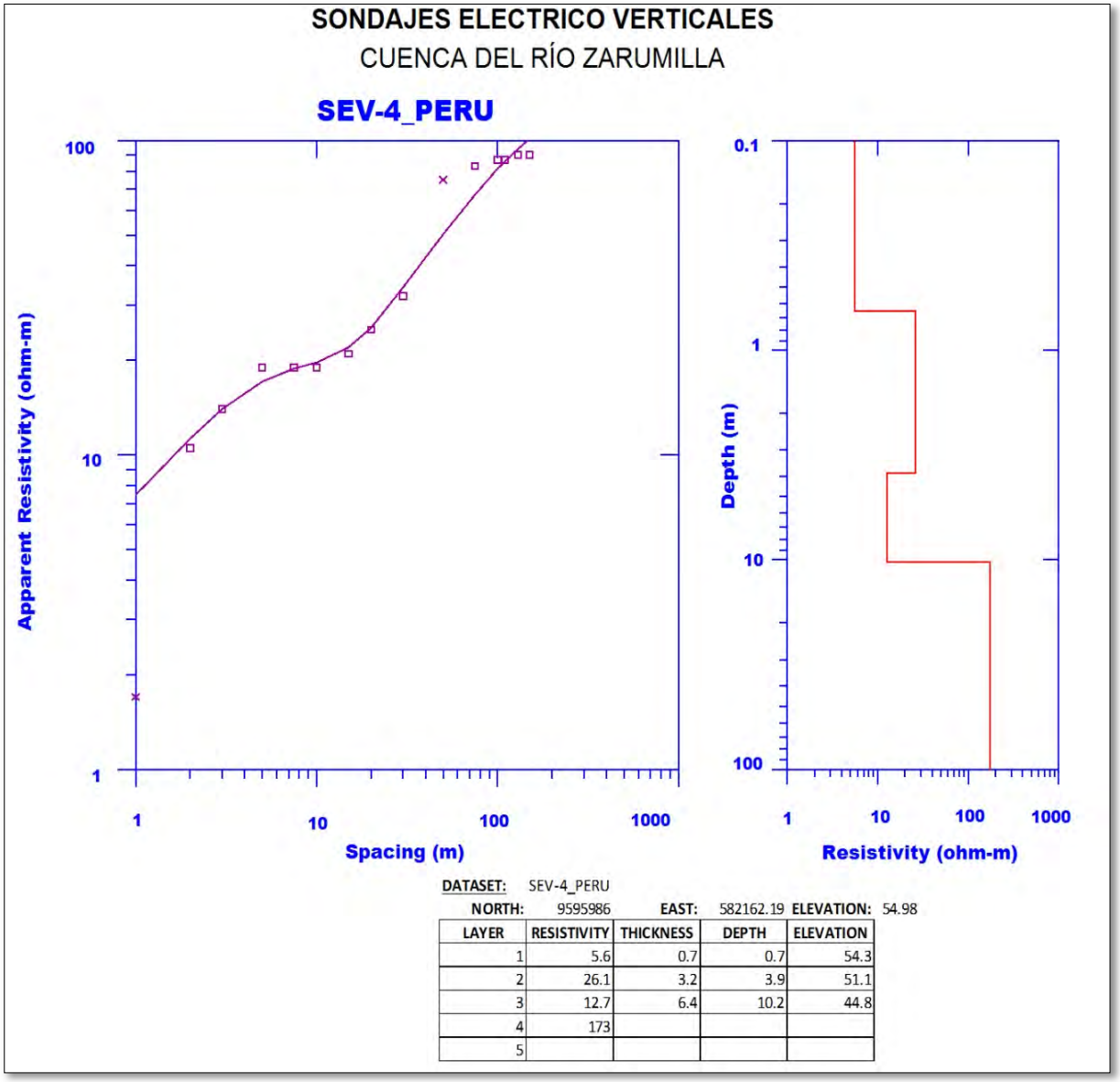


LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	81.7	1.1	1.1	47.1
2	20.6	4	5.1	43.1
3	2612.9	47.4	52.5	-4.3
4	566.3			
5				

SEV-4 – Perú

En el modelo generado destaca la presencia de resistividades moderadas (173 Ohm-m), relacionado a una posible presencia de basamento, el mismo que podría encontrarse fracturado y alterado, con cierto contenido de humedad (véase Figura 6-16).

Figura 6-16: SEV-4 Perú



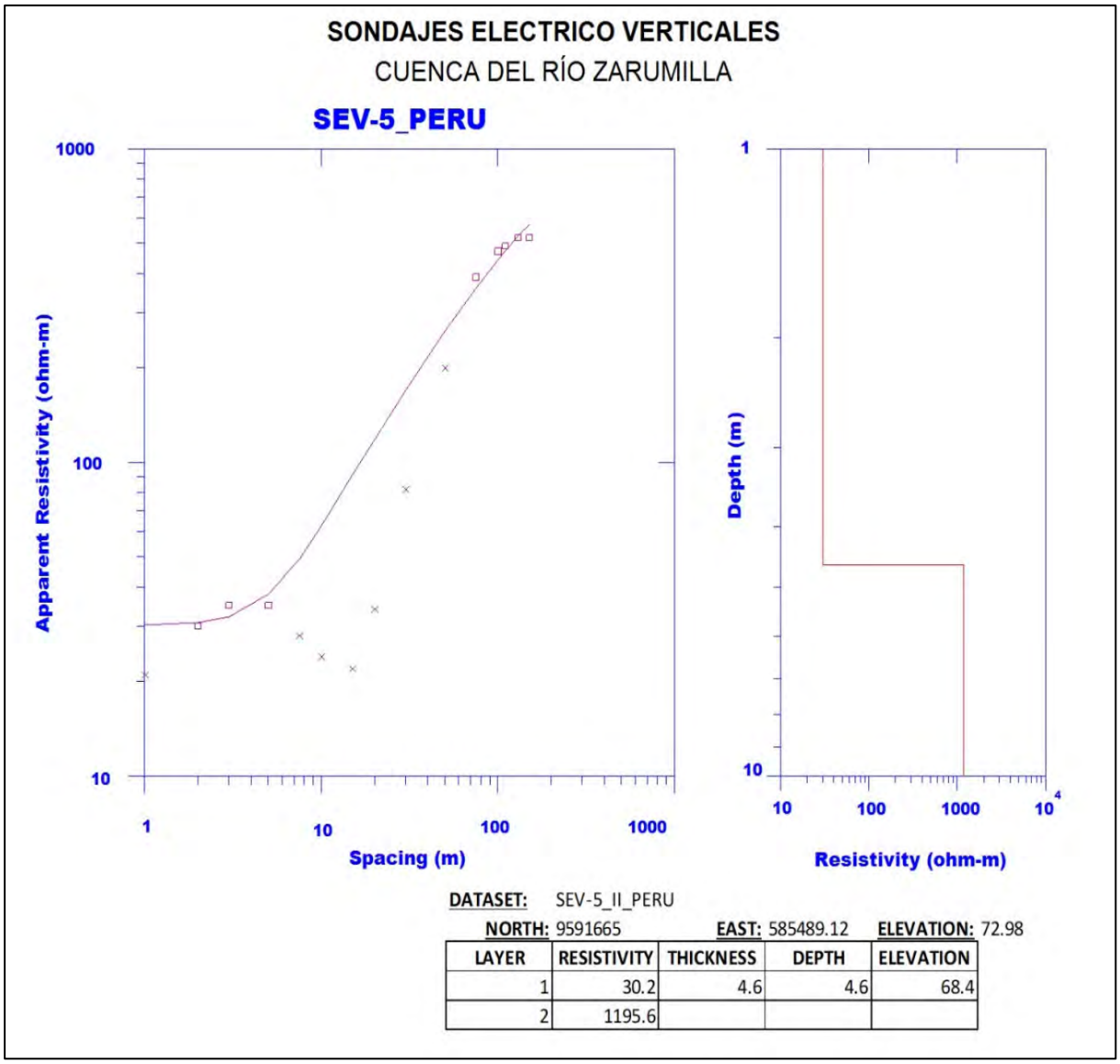
DATASET: SEV-4_PERU
NORTH: 9595986 EAST: 582162.19 ELEVATION: 54.98

LAYER	RESISTIVITY	THICKNESS	DEPTH	ELEVATION
1	5.6	0.7	0.7	54.3
2	26.1	3.2	3.9	51.1
3	12.7	6.4	10.2	44.8
4	173			
5				

SEV-5 – Perú

En el modelo generado, el basamento rocoso estaría definido a los 4.6 m de profundidad, con una resistividad de 1195.6 Ohm-m, al que sobreyace un estrato de resistividad baja (30.2 Ohm-m) que puede estar relacionado a la presencia de materiales sueltos (véase Figura 6-17).

Figura 6-17: SEV-5 Perú



La Tabla 6-6 presenta el cuadro con la interpretación cuantitativa.

Tabla 6-6: Capas Geoeléctricas SEV

Sondaje Eléctrico Vertical (SEV)	Capa Geoeléctrica			
	R_1	R_2	R_3	R_4
	h_1	h_2	h_3	h_4
SEV-1 - Ecuador	48.8	98.4	1877.7	
	4	40.6		
SEV-2 - Ecuador	21.7	4.1	73.3	
	1.6	1.6		
SEV-3 - Ecuador	73.7	793.2		
	5.1			
SEV-4 - Ecuador	26.5	652		
	3.1			

Sondaje Eléctrico Vertical (SEV)	Capa Geoeléctrica			
	R_1	R_2	R_3	R_4
	h_1	h_2	h_3	h_4
SEV-5 - Ecuador	25.3	580.6		
	3.5			
SEV-1 – Perú	14.7	4165.9	131.2	
	1.5	11.3		
SEV-2 - Perú	5.3	29.6		
	11.4			
SEV-3 - Perú	81.7	20.6	2612.9	566.3
	1.1	4	47.4	
SEV-4 - Perú	5.6	26.1	12.7	173
	0.7	3.2	6.4	
SEV-5 - Perú	30.2	1195.6		
	4.6			

Nota: R = Resistividad de la capa en Ohm-m; **h** = Espesor de la capa en metros

En el Anexo III-A se presenta el informe completo del subconsultor especializado a cargo de la prospección geofísica SEV.

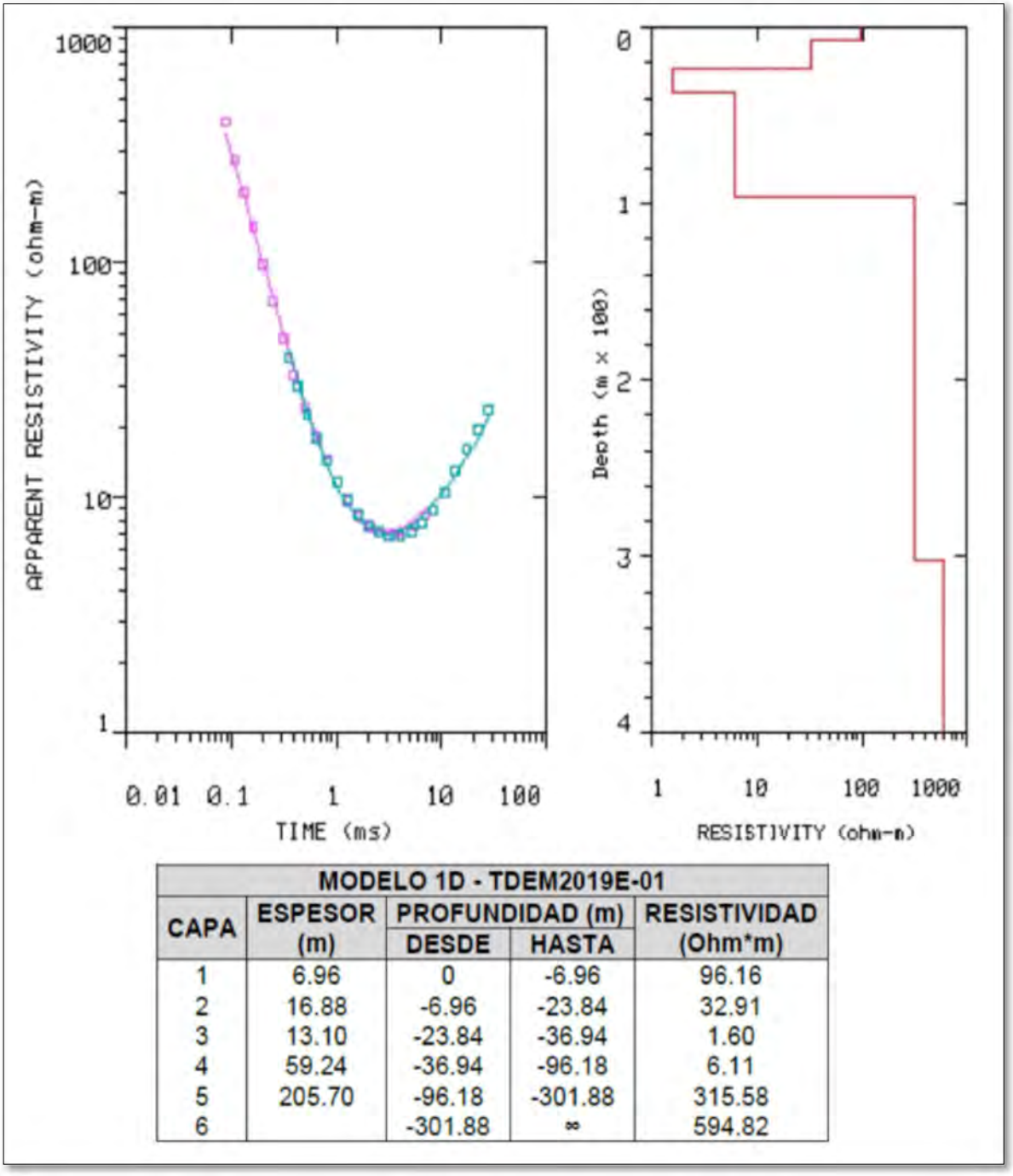
6.6.1.2 Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TDEM)

A continuación, se presenta la interpretación de los datos de los TDEM realizados (Figuras 6-18 a 8-27), que generaron modelos de tres (03) a cinco (05) capas en el territorio ecuatoriano y de tres (03) capas en el territorio peruano.

TDEM-E01 – Ecuador

Se ha generado un modelo de 6 capas, que por los valores de resistividad observados podrían representar 3 capas diferenciadas; la primera a una profundidad de 23.84 m (de 96.16 Ohm-m a 32.91 Ohm-m), la segunda a una profundidad de 301.88 m (de 1.60 a 6.11 Ohm-m), y la tercera a una profundidad mayor a 301.88 m (de 315.58 Ohm-m a más) que podría representar el basamento rocoso (véase Figura 6-18).

Figura 6-18: Resultado TDEM E01 Ecuador

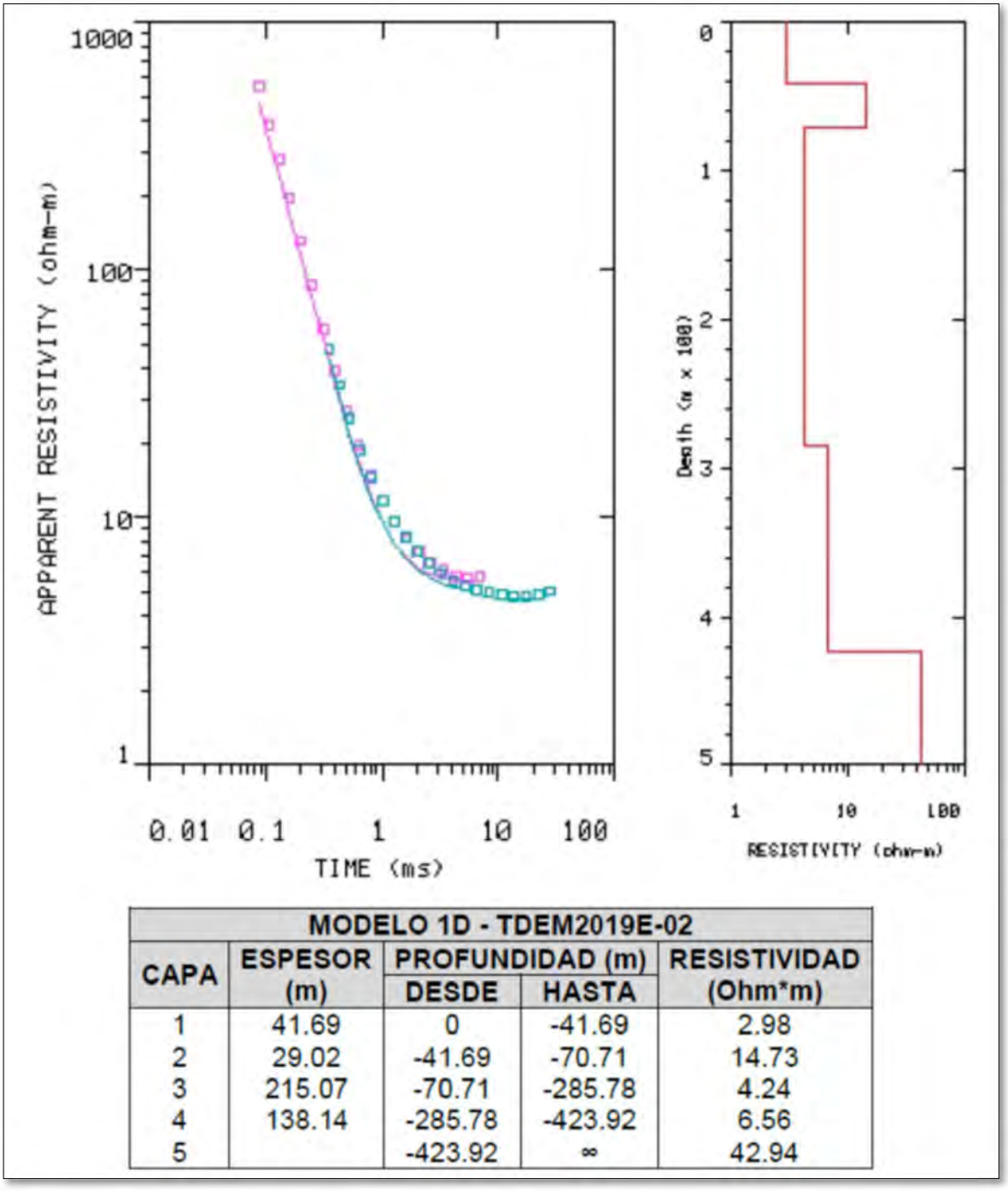


MODELO 1D - TDEM2019E-01				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	6.96	0	-6.96	96.16
2	16.88	-6.96	-23.84	32.91
3	13.10	-23.84	-36.94	1.60
4	59.24	-36.94	-96.18	6.11
5	205.70	-96.18	-301.88	315.58
6		-301.88	∞	594.82

TDEM-E02 – Ecuador

Se ha generado un modelo de 5 capas, aunque por las resistividades observadas se podrían definir 3 capas, una primera hasta los 70 m de profundidad (de 2.98 Ohm-m a 14.73 Ohm-m), la segunda hasta una profundidad de 423.92 m (de 4.24 Ohm-m a 6.56 Ohm-m) y la tercera mayor a los 423.92 m (con 42.94 Ohm-m) que podría indicar el basamento rocoso (Figura 6-19).

Figura 6-19: Resultado TDEM E02 Ecuador

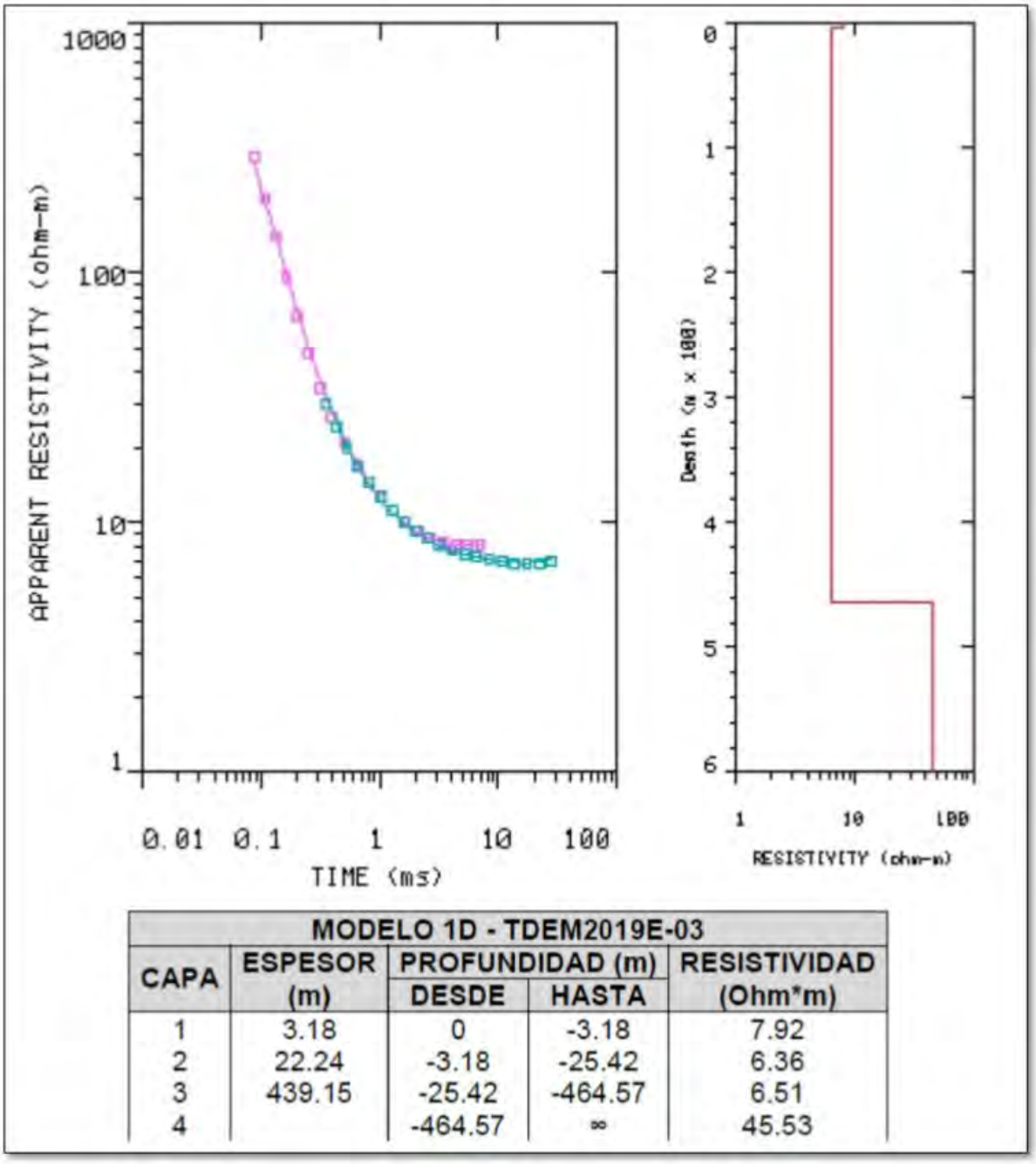


MODELO 1D - TDEM2019E-02				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	41.69	0	-41.69	2.98
2	29.02	-41.69	-70.71	14.73
3	215.07	-70.71	-285.78	4.24
4	138.14	-285.78	-423.92	6.56
5		-423.92	∞	42.94

TDEM-E03 – Ecuador

Se ha definido un modelo de 4 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas podrían dividirse en 2 capas bastante marcadas, con un contacto a la profundidad de 464.57 m, donde cambia de 6.51 Ohm-m a 45.53 Ohm-m (véase Figura 6-20).

Figura 6-20: Resultado TDEM E03 Ecuador

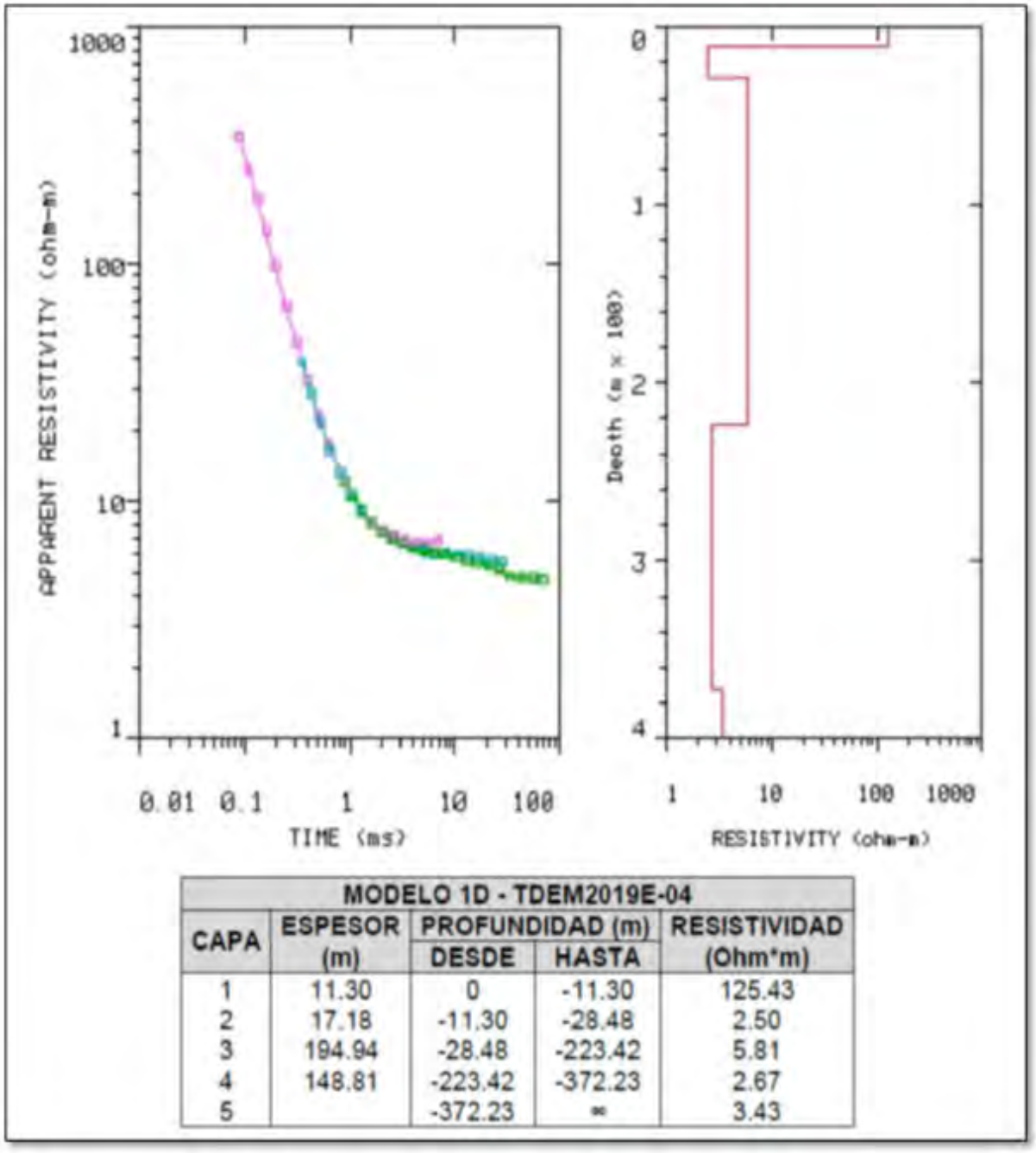


MODELO 1D - TDEM2019E-03				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	3.18	0	-3.18	7.92
2	22.24	-3.18	-25.42	6.36
3	439.15	-25.42	-464.57	6.51
4		-464.57	∞	45.53

TDEM-E04 – Ecuador

Se ha definido un modelo de 5 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas podrían dividirse en 2 capas bastante marcadas, con una primera capa con alta resistividad (125.43 Ohm-m) hasta una profundidad de 11.30 m, que podría representar materiales arcillosos, donde cambia a resistividades de 2.50 hasta 3.43 Ohm-m que podría representar el basamento rocoso fracturado y saturado de agua subterránea (Figura 6-21).

Figura 6-21: Resultado TDEM E04 Ecuador

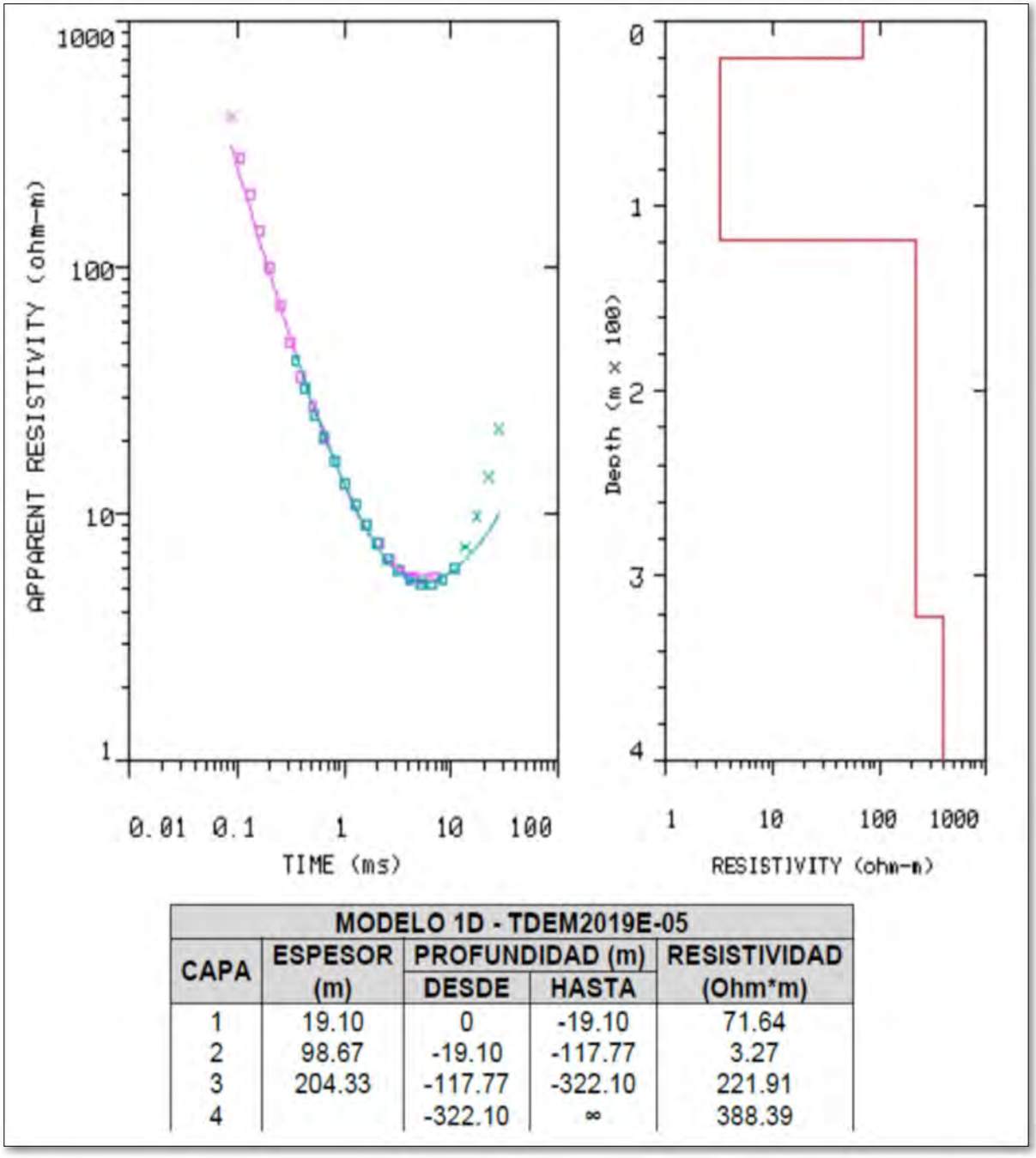


MODELO 1D - TDEM2019E-04				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	11.30	0	-11.30	125.43
2	17.18	-11.30	-28.48	2.50
3	194.94	-28.48	-223.42	5.81
4	148.81	-223.42	-372.23	2.67
5		-372.23	∞	3.43

TDEM-E05 – Ecuador

Se ha definido un modelo de 4 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas se podrían dividir en 3 capas bastante marcadas, una primera capa hasta los 19.10 m de profundidad (con 71.64 Ohm-m), una segunda capa hasta una profundidad de 117.77 m (con 3.27 Ohm-m), y la tercera capa con profundidad mayor a los 117.77 m (con 221.91 Ohm-m a 388.39 Ohm-m) que podría representar el basamento rocoso (véase Figura 6-22).

Figura 6-22: Resultado TDEM E05 Ecuador

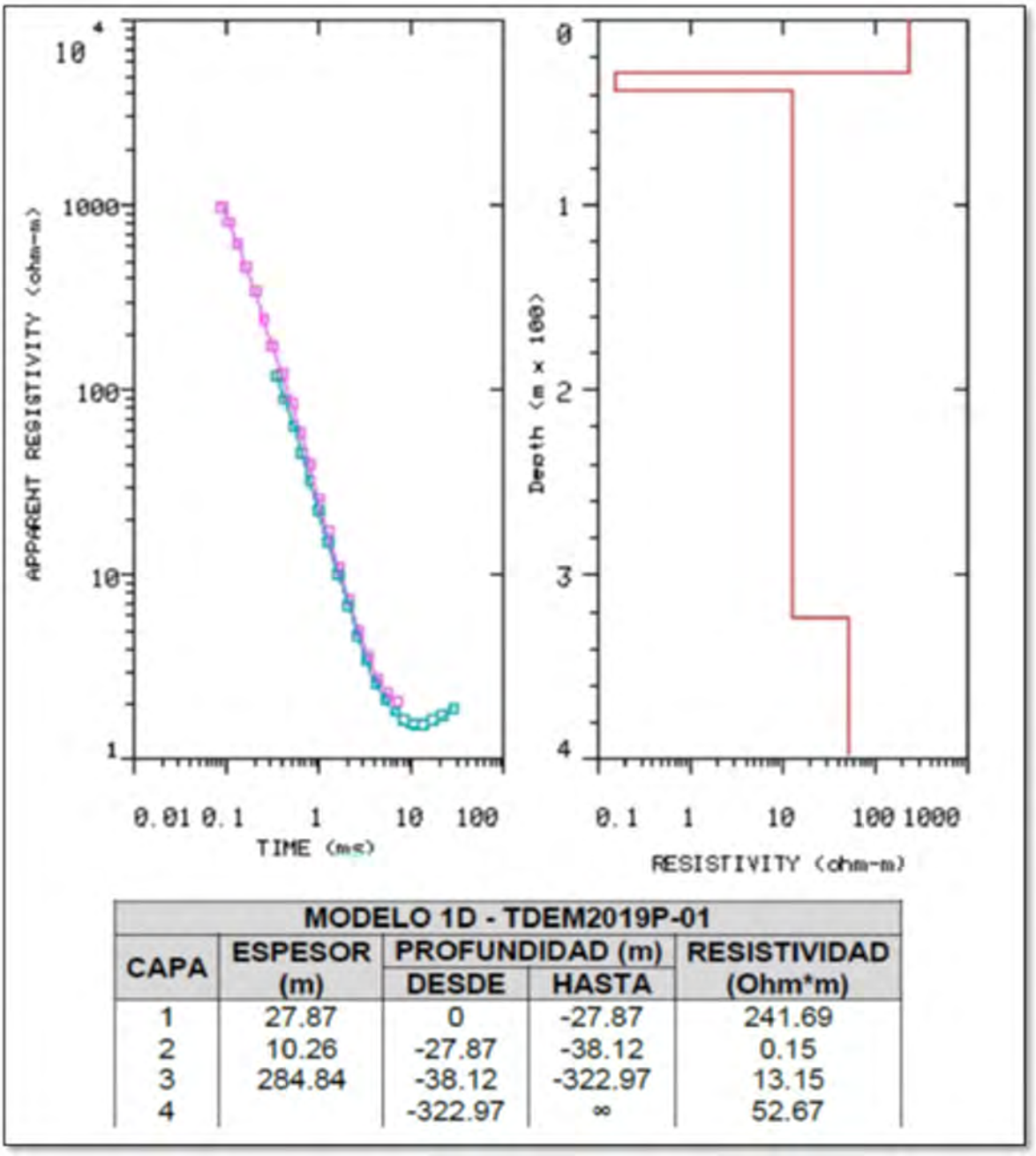


MODELO 1D - TDEM2019E-05				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	19.10	0	-19.10	71.64
2	98.67	-19.10	-117.77	3.27
3	204.33	-117.77	-322.10	221.91
4		-322.10	∞	388.39

TDEM-P01 – Perú

Se ha generado un modelo de 4 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas se podrían dividir en 3 capas bastante marcadas, una primera capa hasta los 27.69 m de profundidad (con 241.69 Ohm-m), una segunda capa hasta una profundidad de 322.97 m (con 0.15 Ohm-m a 13.15 Ohm-m), y la tercera capa con profundidad mayor a los 322.97 m (con 52.67 Ohm-m) que podría representar el basamento rocoso (véase Figura 6-23).

Figura 6-23: Resultado TDEM P01 Perú

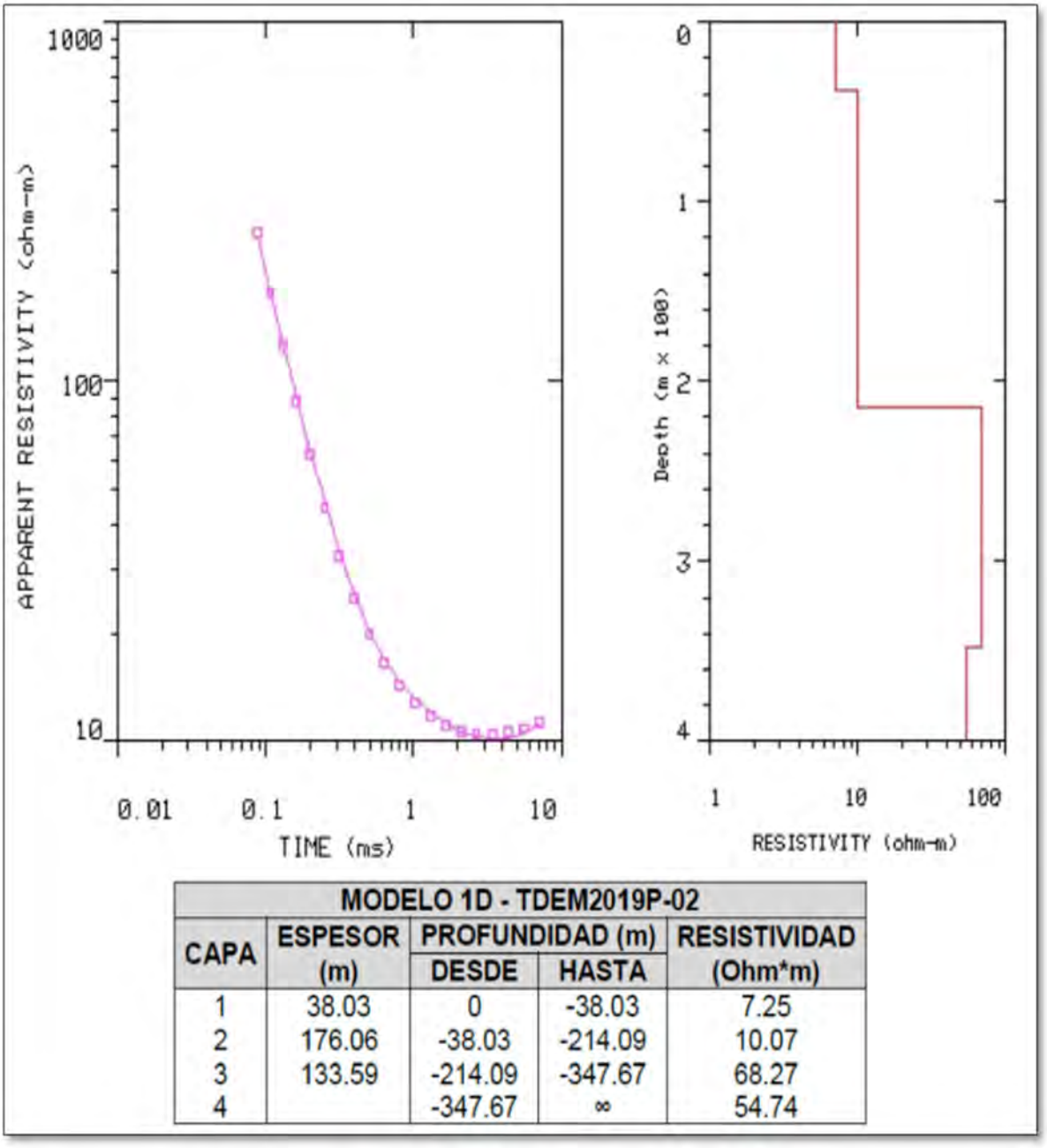


MODELO 1D - TDEM2019P-01				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	27.87	0	-27.87	241.69
2	10.26	-27.87	-38.12	0.15
3	284.84	-38.12	-322.97	13.15
4		-322.97	∞	52.67

TDEM-P02 – Perú

Se ha generado un modelo de 4 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas se podrían dividir en 2 capas bastante marcadas, una primera capa hasta los 347.67 m de profundidad (con 7.25 Ohm-m a 10.07 Ohm-m), y una segunda capa con profundidad mayor a 347.67 m (con 68.27 Ohm-m a 54.74 Ohm-m) que podría representar el basamento rocoso (Figura 6-24).

Figura 6-24: Resultado TDEM P02 Perú

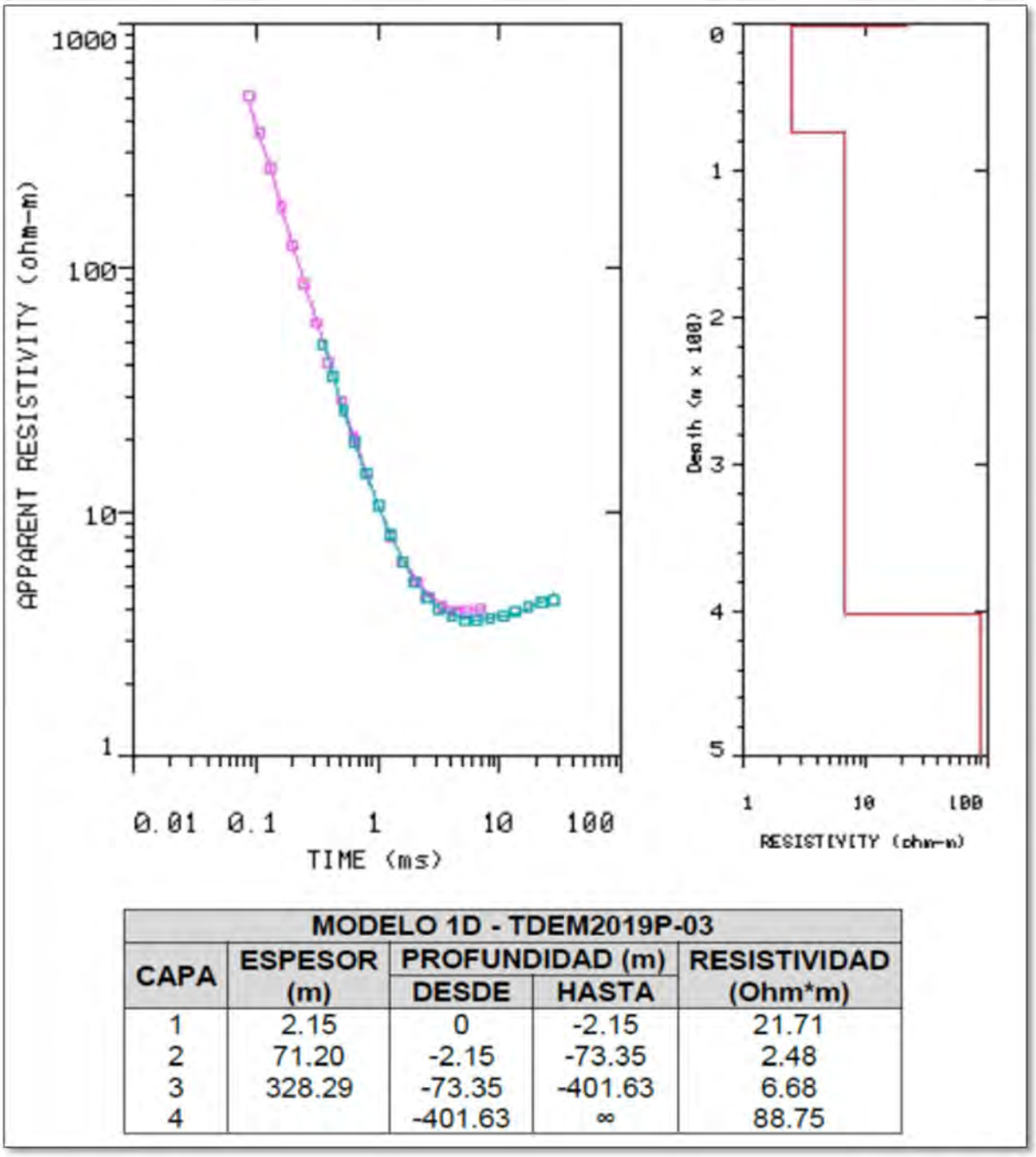


MODELO 1D - TDEM2019P-02				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	38.03	0	-38.03	7.25
2	176.06	-38.03	-214.09	10.07
3	133.59	-214.09	-347.67	68.27
4		-347.67	∞	54.74

TDEM-P03 – Perú

Se ha generado un modelo de 4 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas se podrían dividir en 3 capas bastante marcadas, una primera capa hasta los 73.35 m de profundidad (con 2.48 Ohm-m), una segunda capa hasta una profundidad de 401.63 m (con 6.68 Ohm-m, y una tercera capa con profundidad mayor a 401.64 m (con 88.75 Ohm-m) que podría representar el basamento rocoso (véase Figura 6-25).

Figura 6-25: Resultado TDEM P03 Perú

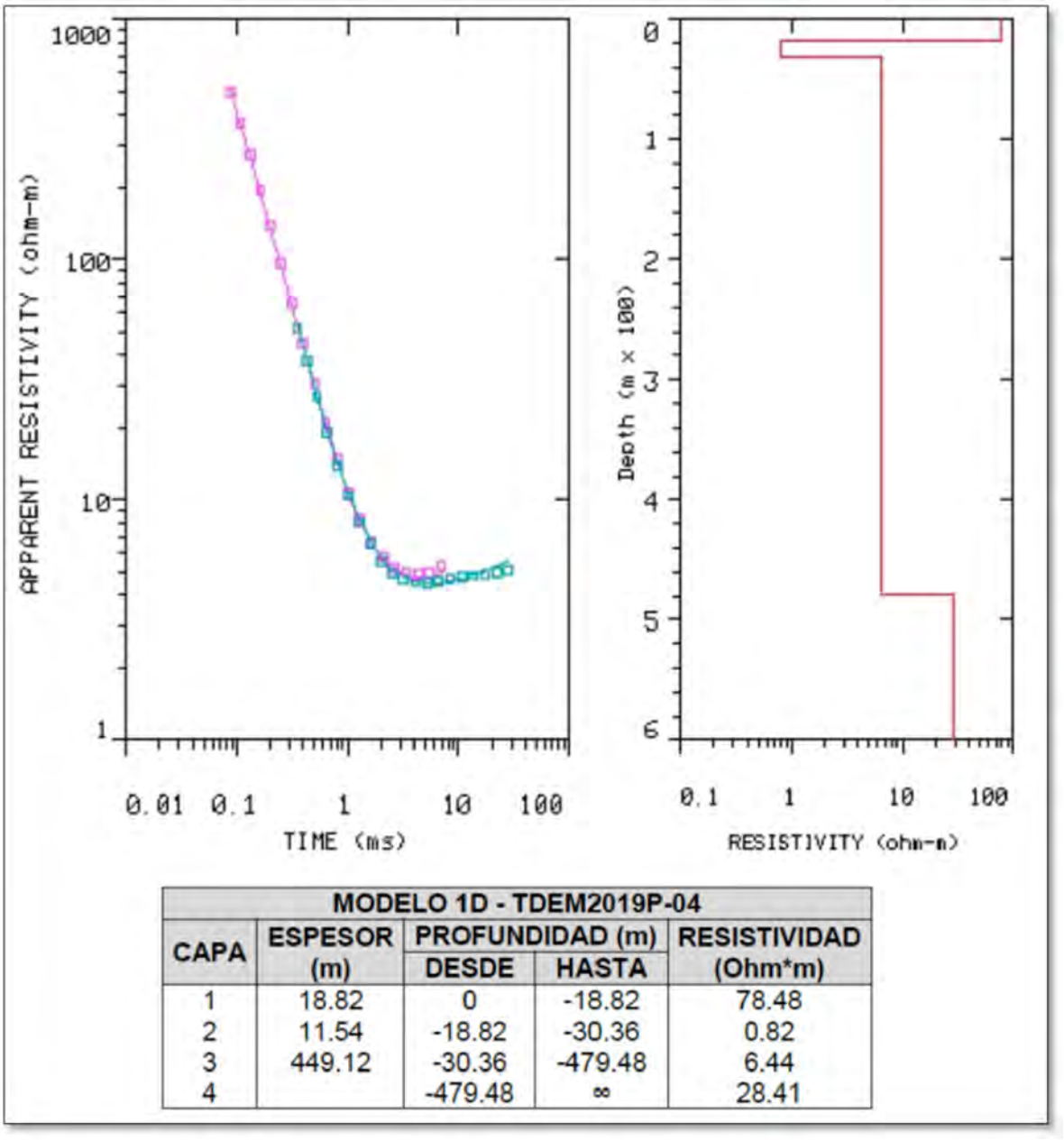


MODELO 1D - TDEM2019P-03				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	2.15	0	-2.15	21.71
2	71.20	-2.15	-73.35	2.48
3	328.29	-73.35	-401.63	6.68
4		-401.63	∞	88.75

TDEM-P04 – Perú

Se ha generado un modelo de 4 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas se podrían dividir en 3 capas bastante marcadas, una primera capa hasta los 18.82 m de profundidad (con 78.48 Ohm-m), una segunda capa hasta una profundidad de 401.63 m (con 6.68 Ohm-m, y una tercera capa con profundidad mayor a 479.48 m (con 0.82 Ohm-m a 6.44 Ohm-m), y una tercera capa a una profundidad mayor a 479.48 m (con 28.41 Ohm-m) que podría representar el basamento rocoso (véase Figura 6-26).

Figura 6-26: Resultado TDEM P04 Perú

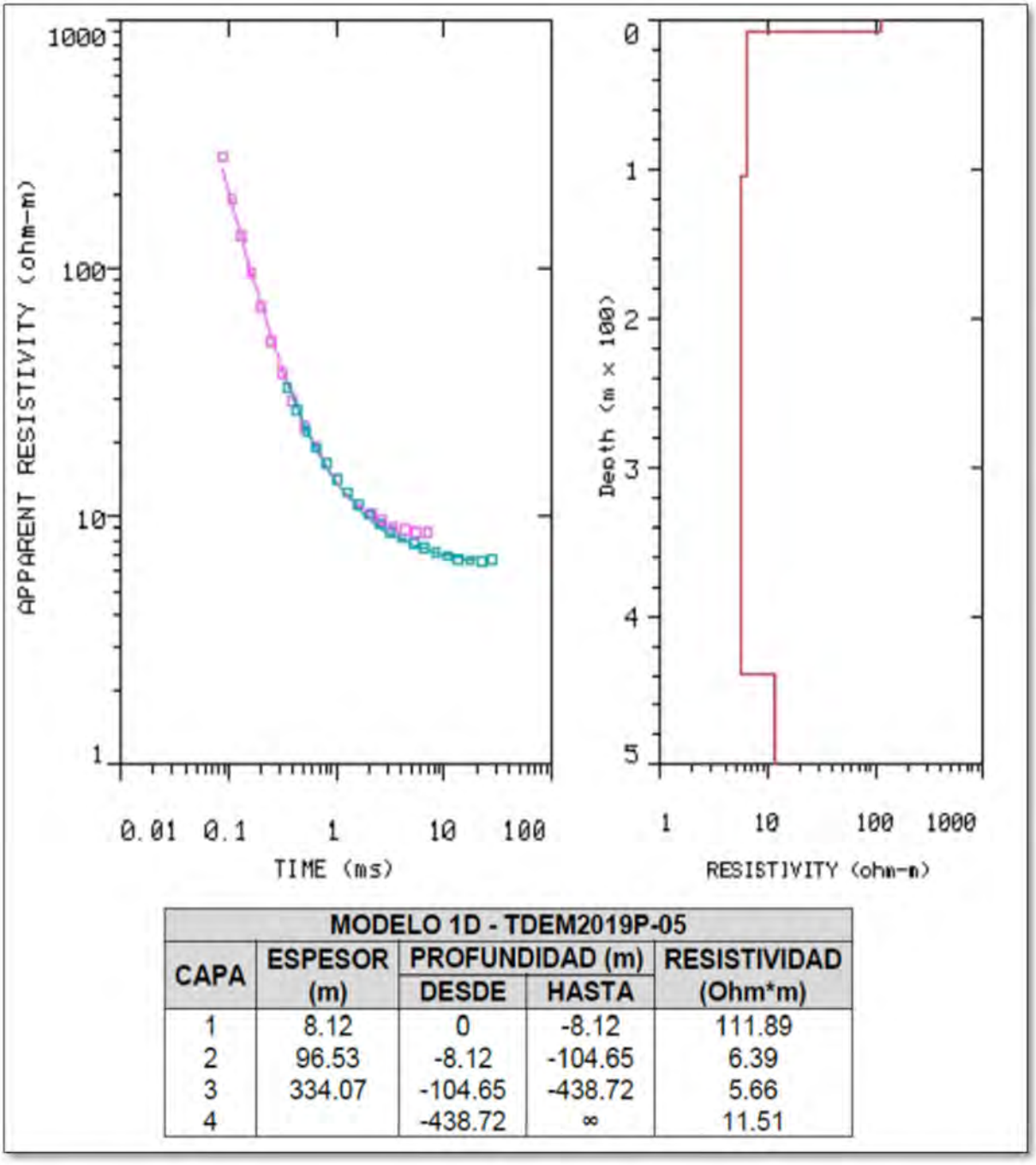


MODELO 1D - TDEM2019P-04				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	18.82	0	-18.82	78.48
2	11.54	-18.82	-30.36	0.82
3	449.12	-30.36	-479.48	6.44
4		-479.48	∞	28.41

TDEM-P05 – Perú

Se ha generado un modelo de 4 capas, aunque por los valores de las resistividades obtenidas se podrían dividir en 3 capas bastante marcadas, una primera capa hasta los 8.12 m de profundidad (con 111.89 Ohm-m), una segunda capa hasta una profundidad de 438.72 m (con 6.39 Ohm-m a 5.66 Ohm-m), y una tercera capa con profundidad mayor a 438.72 m (con 11.51 Ohm-m), que podría representar el basamento rocoso fracturado (véase Figura 6-27).

Figura 6-27: Resultado TDEM P05 Perú



MODELO 1D - TDEM2019P-05				
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)		RESISTIVIDAD (Ohm*m)
		DESDE	HASTA	
1	8.12	0	-8.12	111.89
2	96.53	-8.12	-104.65	6.39
3	334.07	-104.65	-438.72	5.66
4		-438.72	∞	11.51

La Tabla 6-7 presenta el cuadro con la interpretación cuantitativa.

Tabla 6-7: Capas Geoeléctricas TDEM

Sondeo Transitorio Electromagnético (TDEM)	Capa Geoeléctrica					
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
TDEM-P01 - Ecuador	96.16	32.91	1.60	6.11	315.58	594.82
	6.96	16.88	13.10	59.24	205.70	
TDEM-P02 - Ecuador	2.98	14.73	4.24	6.56	42.94	
	41.69	29.02	215.07	138.14		
TDEM-P03 - Ecuador	7.92	6.36	6.51	45.53		
	3.18	22.24	439.15			
TDEM-P04 - Ecuador	125.43	2.50	5.81	2.67	3.43	
	11.30	17.18	194.94	148.81		
TDEM-P05 - Ecuador	71.64	3.27	221.91	388.39		
	19.10	98.67	204.33			
TDEM-P01 – Perú	241.69	0.15	13.15	52.67		
	27.87	10.26	284.84			
TDEM-P02 - Perú	7.25	10.07	68.27	54.74		
	38.03	176.06	133.59			
TDEM-P03 - Perú	21.71	2.48	6.68	88.75		
	2.15	71.20	328.29			
TDEM-P04 - Perú r	78.48	0.82	6.44	28.41		
	18.82	11.54	449.12			
TDEM-P05 - Perú	111.89	6.39	5.66	11.51		
	8.12	96.53	334.07			

Nota: R = Resistividad de la capa en Ohm-m; **h** = Espesor de la capa en metros

En el Anexo III-B se presenta el informe completo del subconsultor especializado a cargo de la prospección geofísica TDEM. Todos los archivos originales (dump) y archivos finales corregidos se encuentran incluidos como Anexo III-D (solo digital), junto con los datos procesados. Los datos de cada sondaje se incluyen en formatos ASCII.

6.7 CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.7.1 Resistividades Eléctricas de los Horizontes Permeables Saturados

En base a las interpretaciones revisadas de los estudios geofísicos e hidrogeológicos realizados por la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA), considerados oficiales y válidos (véase Anexo III-C), y complementando con los resultados obtenidos de la geofísica actual (resistividades eléctricas), se ha realizado una interpretación de las potenciales condiciones litológicas del área de la Cuenca Zarumilla y se ha definido la existencia de dos (02) horizontes subregionales principales, uno somero y otro profundo (véase Figura 6-28), lo que en conjunto podrían representar una Unidad Hidrogeológica (acuífero libre).

Debido a la muy limitada información litológica del subsuelo (en profundidad) en el área de estudio, y en base a experiencia en proyectos en condiciones geológicas similares, para definir el contacto de ambos horizontes se ha apoyado en los estudios geofísicos, un total de 500 SEV y 80 TDEM (véase Anexo III-C) y se ha considerado el punto de cambio considerable entre las resistividades obtenidas. Así, los bajos valores de las resistividades (por ejemplo, de 2.52 a 7.99 Ω.m) se ha considerado que corresponden al horizonte somero (Horizonte 1), constituido por material cuaternario y macizos rocosos altamente fracturados; mientras que los valores altos (por ejemplo, de 53.57 a 105.11 Ω.m o más), se interpreta que corresponderían al horizonte profundo (Horizonte 2), compuesto por macizos rocosos levemente fracturados (véase Figura 6-28).

6.7.2 Espesor de los Horizontes Permeables Saturados

De acuerdo a las interpretaciones efectuadas de las resistividades eléctricas, tanto de SEV como de TDEM, complementado con la información histórica existente, se ha calculado que el espesor del horizonte somero (Horizonte 1), emplazado mayormente en los materiales cuaternarios de los valles y parte del macizo rocoso altamente fracturado y meteorizado, sobre todo en la parte intermedia y baja de la Cuenca Zarumilla, podría variar desde algunas decenas de metros (40 a100 m) hasta centenas de metros (hasta los 300 m) en algunos lugares influenciados por la actividad tectónica, donde las fallas geológicas regionales han ocasionado desplazamientos verticales (sistemas de Horst y Graben) y han profundizado el contenido de materiales cuaternarios con las rocas meteorizadas y fracturadas (véase Figuras 6-29 a 6-36).

El horizonte profundo (Horizonte 2), compuesto por los macizos rocosos levemente fracturados de diferentes composiciones litológicas (mayormente metamórficos), emplazados generalmente desde la parte intermedia hasta la parte alta de la Cuenca Zarumilla, podrían tener un espesor en promedio de 200 m, hasta una profundidad de 300 m, hasta donde se efectuó los estudios de TDEM.

Para la corroboración de las condiciones litológicas del área de estudio, se tuvo acceso a información de siete (07) pozos con datos litológicos proporcionados por la ANA (ANA, 2018), con profundidades de 70 a 125.65 m, aunque los registros litológicos no eran concordantes con las formaciones geológicas en dichas profundidades y eran interpretadas en su totalidad como materiales cuaternarios (véase Figuras 6-29 a 6-36). Adicionalmente, de los siete pozos, cinco de ellos se encuentran en la periferia de las ciudades de Zarumilla y Huaquillas, por lo que su aporte de información fue bastante limitado.

Los limitados registros litológicos de los pozos fueron incorporados dentro de las secciones geofísicas, los que sirvieron de soporte para la interpretación hidrogeológica posterior.

Tomando en cuenta los resultados de los estudios geofísicos obtenidos, éstos se pueden correlacionar con las condiciones generales de los materiales geológicos presentes en el área de estudio. Es decir, los depósitos cuaternarios, compuestos por materiales sueltos de grava, arena, limo y arcilla, tienen una alta permeabilidad y almacenan agua subterránea en cantidades considerables, al igual que los macizos rocosos que se encuentran altamente fracturados y meteorizados, aun así, éstos sean de origen metamórfico o similares; y que generalmente se encuentran en las primeras decenas o centenas de metros de profundidad.

Por otro lado, es concordante con la interpretación sobre los macizos rocosos, que a mayor profundidad generalmente se encuentran con menor grado de fracturamiento y, por ende, con una menor permeabilidad.

Debido a estas condiciones, es que la mayoría de los pozos a tajo abierto existentes en toda la Cuenca Zarumilla se encuentran instalados en los materiales cuaternarios, con profundidades mayormente entre 30 y 40 m, y sólo algunos pozos tubulares para abastecimiento de agua potable a algunas poblaciones o ciudades se encuentran instalados a profundidades mayores a los 100 m.

Aunque por las interpretaciones hidrogeológicas realizadas en este estudio en base a los estudios geofísicos, es posible considerar la existencia de una Unidad Hidrogeológica correspondiente a un acuífero libre con espesores de hasta 150 a 200 m, y en algunos casos hasta 300 m (véase Figuras 6-29 a 6-36).

Figura 6-28: Mapa de Georesistividad Interpretada

Figura 6-29: Sección Georesistiva Interpretada 1-1´

Figura 6-30: Sección Georesistiva Interpretada 2-2´

Figura 6-31: Sección Georesistiva Interpretada 3-3´

Figura 6-32: Sección Georesistiva Interpretada 4-4´

Figura 6-33: Sección Georesistiva Interpretada 5-5´

Figura 6-34: Sección Georesistiva Interpretada 6-6´

Figura 6-35: Sección Georesistiva Interpretada 7-7´

Figura 6-36: Sección Georesistiva Interpretada 8-8´

7 ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA SUBTERÁNEA

El presente capítulo describe lo resultados de las actividades realizadas como parte de la actualización del inventario de fuentes (pozos, piezómetros, captaciones, manantiales, galerías filtrantes, y similares) de agua subterránea.

7.1 INVENTARIO DE POZOS

7.1.1 Toma de Datos

A continuación, se describe la metodología considerada para la toma de datos:

- Datos de ubicación

  Utilizando un dispositivo GPS navegador, se ubicó geográficamente el punto de agua (pozo, captación, entre otros) en coordenadas UTM, considerando el Datum WGS84, realizando la lectura, registro en la ficha de campo y almacenamiento en la memoria del GPS de las coordenadas y elevación (msnm). Estos datos fueron tomados en la boca del pozo, y cuando no fue posible, se tomó en el punto más próximo al pozo en superficie, con el siguiente detalle:

  - Coordenadas Norte y Este: UTM medida en metros (m)
  - Elevación: expresada en metros sobre el nivel del mar (msnm)

  Cuando no se pudo tomar datos porque no fue permitido el ingreso, por la ausencia de sus propietarios, las coordenadas incluidas en la ficha fueron tomadas en el punto más cercano al que se pudo aproximar o tomadas del inventario anterior (contrastado con código IRHS, zona de ubicación y propietario). En el caso de pozos no encontrados, respecto a los identificados en inventarios previos, se incluyó la coordenada del sitio donde debería haberse ubicado y se llegó a buscar.

- Datos hidrológicos/hidráulicos

  El registro de los datos hidrológicos/hidráulicos en campo incluyó:

  - Objeto de perforación: que pudo haber sido realizado previamente para el aprovechamiento de agua, exploración hidrogeológica o cualquier otro fin, que incluyó el año de perforación y su profundidad inicial.
  - Uso: Descripción del uso del agua extraída (ej.: uso doméstico, abastecimiento público, agrícola, pecuario, industrial, etc.);
  - Régimen de bombeo: Número de horas por día, así como días por mes que se bombea o usa el pozo;
  - Nivel piezométrico estático: medición de la elevación del nivel freático en su estado natural mediante el uso de una sonda eléctrica. El procedimiento para el uso de la sonda eléctrica consistió en ingresar el instrumento cuidadosamente, desenrollando de manera progresiva la cinta métrica, evitando de esta manera que el sensor de nivel quede atascado en el interior del pozo; el cual se activó al ponerse en contacto directo con el nivel piezométrico.

- Nivel dinámico: medición del nivel del agua en el acuífero cuando se realizaba la extracción del agua subterránea a través de una bomba, mediante el uso de una sonda eléctrica y siguiendo el mismo procedimiento que para la medición del nivel piezométrico estático;
- Caudal: se calculó utilizando el método volumétrico, con la ayuda de un recipiente calibrado y un cronómetro.

- Parámetros fisicoquímicos *in situ*

  La medición de parámetros fisicoquímicos en campo incluyó:

  - Grado de acidez o basicidad (pH).
  - Sólidos Totales Disueltos (TDS): presencia de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua.
  - Conductividad eléctrica (CE): cantidad de sales disueltas en el agua.
  - Temperatura (T°): temperatura del agua

  Para esta medición se utilizaron equipos multiparamétricos con sus respectivas sondas, y reactivos de calibración. Previo a la utilización de los equipos, se realizaron una adecuada calibración de éstos.

  Adicionalmente, para garantizar una adecuada operación de los equipos y resultados fiables en la toma de datos, se lavaron las sondas permanentemente (antes de cada medición) con agua destilada.

- Datos constructivos

  Se tomaron registros sobre el tipo de captación, diámetro, profundidad, tipo de revestimiento de los pozos o piezómetros. A continuación, se detallan los datos tomados en consideración:

  - Fecha de construcción: Fecha de la excavación y/o perforación.
  - Diámetro exterior: Espacio anular externo de la tubería de revestimiento del pozo, dado generalmente en pulgadas.
  - Diámetro de la perforación: Espacio anular de la perforación sin el revestimiento, dado generalmente en pulgadas.
  - Profundidad: Distancia vertical desde la superficie hasta el fondo del pozo, dada en metros.
  - Material de revestimiento: Material con el que se entubó el pozo, pudiendo ser de acero al carbón, galvanizado o PVC.
  - Método de extracción de agua: Descripción del dispositivo utilizado para elevar hasta la superficie el agua subterránea. Pudiendo ser bombas sumergibles (mecánica o manual) o bombas centrífugas de succión.

- Características físicas del agua

  Se tomaron registro sobre los aspectos del agua visibles, tomando en cuenta características como color, turbidez, olor y otros.

- Croquis de ubicación
- Croquis de diseño de pozo

7.1.2 Clave para Identificar los Pozos Inventariados

Los pozos inventariados fueron codificados en campo y posteriormente en gabinete se les asignó un código final, según se detalla a continuación.

7.1.3 Codificación de los Pozos/Captaciones en Campo

Los códigos asignados a los pozos/captaciones inventariadas en la ficha de campo incluyeron información de la brigada de trabajo que levantó la información, la zona del área de estudio y un número correlativo que identifica el orden en el que fue inventariado en ese sector específico. A manera de ejemplo se describe a continuación:

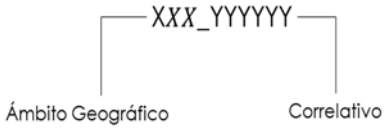
- H1-MAT-002: Pozo número 2, inventariado por la Brigada 1, en el distrito de Matapalo.
- H5-AGV-187: Pozo número 187, inventariado por la Brigada 5, en la zona de Aguas Verdes.

En el caso de los pozos/captaciones que tenían códigos de inventario de la Autoridad o institución de la gestión del agua correspondiente (ANA o SENAGUA), éstos también se consideraron en el registro, cuando fue posible su identificación en campo.

7.1.4 Codificación Final de los Pozos/Captaciones Inventariadas

Se ha realizado una codificación de las fuentes y captaciones de agua subterránea tomando como criterio la ubicación geográfica a nivel de país de cada pozo levantado en campo, permitiendo una normalización y estandarización de la descripción e identificación de cada pozo.

La información georreferenciada de cada pozo se encuentra identificado mediante un descriptor de acuerdo con el siguiente esquema:



A continuación, se ilustra un ejemplo con un nombre de pozo georreferenciado de la base de datos espacial:

EC – 0001

Donde:

EC: Indica que está ubicado en el país de Ecuador

0001: Número correlativo de pozos considerando de Sur a Norte su ubicación en el área de estudio

7.1.5 Pozos Inventariados

En acuerdo con la Supervisión/Fiscalización, integrantes del Grupo Técnico Binacional (GTB) y especialistas de la ANA y SENAGUA, se definió que los trabajos de campo considerarán únicamente el inventario de los pozos en los estados Utilizado y Utilizables; por lo cual, no se presentan otras fuentes de agua subterránea (cochas, pozas, y similares); asimismo, se indica que no se registraron piezómetros ni galerías filtrantes.

El 100% de pozos, captaciones-galerías filtrantes- inventariados asciende a un total de 1388 pozos en estado utilizado, utilizable y en perforación, identificando un total de 516 pozos en Ecuador y 872 pozos en Perú, según se detalla a nivel de distrito o parroquia, según corresponda, en la Tabla 7-1 y se presenta en la Figura 7-1.

Tabla 7-1: Resumen General de Pozos/Captaciones Inventariadas

Sector	Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Pozos Inventariados
Ecuador	El Oro	Arenillas	Carcabón	136
	El Oro	Arenillas	Chacras	181
	El Oro	Arenillas	Palmales	116
	El Oro	Huaquillas	Huaquillas	83
			Subtotal	**516**
Perú	Tumbes	Zarumilla	Matapalo	322
	Tumbes	Zarumilla	Papayal	299
	Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	238
	Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	13
			Subtotal	**872**
			Total	**1388**

En el Anexo IV-A se presenta la tabla del inventario que contiene todos los datos e información registrada, según la ficha aprobada, para cada uno de los 1388 pozos inventariados; asimismo, en el Anexo IV-B se presentan las fichas de campo generadas para cada pozo inventariado.

Figura 7-1: Pozos Inventariados por Sector

7.1.5.1 Tipos de Pozos Inventariados

En la Tabla 7-2 se presenta un resumen de los pozos inventariados según el tipo de construcción (véase Figura 7-2) de acuerdo con los datos registrados en tablas presentadas en el Anexo IV-A, observándose que la mayoría de los pozos inventariados son del tipo tubular (606 pozos) seguidas por las del tipo mixto (400 pozos) y finalmente tajo abierto (382 pozos).

Tabla 7-2: Pozos Inventariados por Tipo

Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Pozos Inventariados Según su Tipo			Total
			Tubular	Mixto	Tajo Abierto	
Ecuador						
El Oro	Arenillas	Carcabón	55	31	50	136
El Oro	Arenillas	Chacras	144	18	19	181
El Oro	Arenillas	Palmales	91	1	24	116
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	68	12	3	83
Subtotal			**358**	**62**	**96**	**516**
Perú						
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	94	111	117	322
Tumbes	Zarumilla	Papayal	86	102	111	299
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	55	125	58	238
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	13	0	0	13
Subtotal			**248**	**338**	**286**	**872**
Total			**606**	**400**	**382**	**1388**

7.1.5.2 Estado de Pozos Inventariados

En la Tabla 7-3 se presenta un resumen de los pozos inventariados según el estado del mismo (véase Figura 7-3) de acuerdo con las tablas presentadas en el Anexo IV-A, observándose que la mayoría de los pozos actualmente son Utilizados (880 pozos), seguidos por los Utilizables (499 pozos).

Tabla 7-3: Pozos Inventariados por Estado de Pozo

Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Pozos Inventariados Según su Estado			Total
			Utilizado**	Utilizable***	En Perforación	
Ecuador						
El Oro	Arenillas	Carcabón	98	37	1	136
El Oro	Arenillas	Chacras	125	54	2	181
El Oro	Arenillas	Palmales	75	41	0	116
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	59	24	0	83
Subtotal			**357**	**156**	**3**	**516**
Perú						
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	214	104	4	322
Tumbes	Zarumilla	Papayal	170	127	2	299
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	129	109	0	238
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	10	3	0	13
Subtotal			**523**	**343**	**6**	**872**
Total			**880**	**499**	**9**	**1388**

**Nota: (***) Utilizado: trabajando durante el censo/trabajando durante período de explotación; y (**) Utilizable: sin equipo – abandonado por bajo rendimiento – seco eventual – sellado en reserva – equipo malogrado.

La Tabla 7-4 presenta el detalle del tipo de pozos inventariados en estado Utilizado, es decir que se encontraron operativos ya sea durante el inventario o indicaron estaba trabajando en el periodo de explotación, de acuerdo con los datos registrados en las tablas presentadas en el Anexo IV-A. Como se observa en la tabla, aproximadamente el 70% de los pozos utilizados en Ecuador son del tipo tubular; mientras que en Perú se registraron más pozos del tipo mixto en estado Utilizado.

Tabla 7-4: Detalle de los Pozos Utilizados Según su Tipo

Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Pozos Utilizados Según su Tipo			Total
			Tubular	Mixto	Tajo Abierto	
Ecuador						
El Oro	Arenillas	Carcabón	44	21	33	98
El Oro	Arenillas	Chacras	96	13	16	125
El Oro	Arenillas	Palmales	57	0	18	75
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	50	7	2	59
Subtotal			**247**	**41**	**69**	**357**
Perú						
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	58	93	63	214
Tumbes	Zarumilla	Papayal	54	72	44	170
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	30	88	11	129
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	10	0	0	10
Subtotal			**152**	**253**	**118**	**523**
Total			**399**	**294**	**187**	**880**

La Tabla 7-5 presenta el detalle del tipo de pozos inventariados en estado Utilizable, es decir que se no encontraron operativos al estar sellados en reserva o abandonados, pero en buen estado y que podrían ser usados nuevamente. Como se observa en la tabla, alrededor del 70% de los pozos Utilizables en Ecuador son del tipo tubular; mientras que, en Perú, la mayoría de los pozos en estado Utilizable son del tipo Tajo Abierto.

Tabla 7-5: Detalle de los Pozos Utilizables Según su Tipo

Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Pozos Utilizables Según su Tipo			Total
			Tubular	Mixto	Tajo Abierto	
Ecuador						
El Oro	Arenillas	Carcabón	11	10	16	37
El Oro	Arenillas	Chacras	46	5	3	54
El Oro	Arenillas	Palmales	34	1	6	41
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	18	5	1	24
Subtotal			**109**	**21**	**26**	**156**
Perú						
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	32	18	54	104
Tumbes	Zarumilla	Papayal	32	30	65	127
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	25	37	47	109
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	3	0	0	3
Subtotal			**92**	**85**	**166**	**343**
Total			**201**	**106**	**192**	**499**

Figura 7-2: Pozos Inventariados por Tipo

Figura 7-3: Pozos Inventariados por Estado

7.1.5.3 Uso de los Pozos

En la Tabla 7-6 se presenta un resumen de los pozos inventariados según el uso del agua del pozo registrado en el inventario, de acuerdo con los datos registrados en las tablas presentadas en el Anexo IV-A, observándose que la mayoría de los pozos son de uso agrícola (1219 pozos), seguido muy por debajo por el uso industrial (104 pozos) pero con una marcada diferencia. Los pozos/captaciones inventariados según su uso se presentan en la Figura 7-4.

Tabla 7-6: Pozos Inventariados Según Uso del Agua

Sector	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Pozos Inventariados Según su Uso						Total
			Agrícola	Poblacional	Industrial	Agrícola y Poblacional	Agrícola e Industrial	Poblacional e Industrial	
Ecuador									
El Oro	Arenillas	Carcabón	123	6	6	0	1	0	136
El Oro	Arenillas	Chacras	107	18	52	1	1	2	181
El Oro	Arenillas	Palmales	102	10	2	2	0	0	116
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	41	6	33	2	1	0	83
Subtotal			**373**	**40**	**93**	**5**	**3**	**2**	**516**
Perú									
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	308	6	0	8	0	0	322
Tumbes	Zarumilla	Papayal	287	12	0	0	0	0	299
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	234	2	1	1	0	0	238
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	5	3	5	0	0	0	13
Subtotal			**834**	**23**	**6**	**9**	**0**	**0**	**872**
Total			**1207**	**63**	**99**	**14**	**3**	**2**	**1388**

7.1.5.4 Pozos/Captaciones Según Profundidad Actual de Pozo

La Tabla 7-7 presenta un resumen de los pozos inventariados diferenciándose dos tipos de pozos según su profundidad actual, de acuerdo con los datos registrados en las tablas presentadas en el Anexo IV-A. El primer tipo corresponde a pozos someros que se encuentran a menos de 50 m de profundidad, y el segundo a pozos profundos que sobrepasan los 50 m de profundidad (véase Figura 7-5). Se observa que en la mayoría de los casos son someros con menos de 50 m de profundidad.

Tabla 7-7: Pozos Inventariados Según su Profundidad

Sector	Profundidad > 50 m	Profundidad ≤ 50 m	Sin Dato (*)												Total
			SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8	SD9	SD10	SD11	No obtenido	
Ecuador	85	341	36	20	2	1	1	12	1	15	0	1	1	0	516
Perú	52	396	9	28	4	18	4	90	7	61	3	13	0	187	872
Total	**137**	**737**	**45**	**48**	**6**	**19**	**5**	**102**	**8**	**76**	**3**	**14**	**1**	**187**	**1388**

Nota: (*) Sin dato: SD1 No se pudo acceder al pozo, medir o registrar datos por no tener permiso de ingreso, estar cercado, sin persona a cargo, SD2 Pozo con caseta, tapiado con palos, sellado o cerrado con candado, SD3 Pozo en perforación, SD4 Pozo abandonado por bajo rendimiento, arenado, SD5 Pozo enterrado, desviado, obstruido, derrumbado o seco, SD6 Pozo trabajando durante el censo, SD7 Pozo con acceso peligroso, SD8 Pozo saturado de mangueras/tuberías sin ser posible el ingreso de la sonda, o con riesgo de pérdida de sonda, SD9 Pozo inaccesible por estar cubierto por monte (maleza, arbustos y árboles), SD10 Pozo inaccesible por estar cubierto de agua o inundado, y SD 11 Agua salobre, contaminada o estancada.

Como muestra la Tabla 7-7, no se cuenta con información de profundidad actual de una parte de los pozos inventariados en el sector peruano (187 pozos); esto debido a razones de inaccesibilidad, restricción de ingreso, sellado del pozo, y en muchos casos no se pudo medir la profundidad puesto que se identificó un riesgo de atasco de la herramienta de medición. Para la determinación de los datos actualizados de profundidad de pozos, se recomienda llevar a cabo estas mediciones a través de las Autoridades gubernamentales de Perú y Ecuador durante los períodos de monitoreo que tienen establecidos.

La Tabla 7-8 presenta las profundidades mínimas y máximas registradas por tipo de pozos (sistema de perforación) inventariadas a nivel de distrito o parroquia, según corresponda, de acuerdo con los datos registrados en las tablas presentadas en el Anexo IV-A.

Tabla 7-8: Profundidad Mínima y Máxima de Pozos Inventariados Según su Tipo

Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Tubular		Mixto		Tajo Abierto	
			Profundidad Mínima	Profundidad Máxima	Profundidad Mínima	Profundidad Máxima	Profundidad Mínima	Profundidad Máxima
Ecuador								
El Oro	Arenillas	Carcabón	4.35	126.9	0.5	6.3	1	25
El Oro	Arenillas	Chacras	3.26	170	1.27	98.2	3.18	17.6
El Oro	Arenillas	Palmales	2.85	124	4.1	4.1	1.5	15
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	12.86	183	3.1	28	10.35	10.35
Perú								
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	2.58	80	0.0	160	0.85	10.5
Tumbes	Zarumilla	Papayal	1.41	200	3.46	36	3.46	10.06
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	7.07	110	2.8	115	2.8	21.21
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	23.3	120	-	-	-	-

Nota: (-) No se registraron pozos de ese tipo.

7.1.5.5 Rendimiento (Caudal de Explotación) de los Pozos

De acuerdo con los datos registrados en el inventario realizado (véase Anexo IV-A), los pozos instalados tanto en Ecuador como en Perú no cuentan con un adecuado diseño ni instalación, por lo que su rendimiento es deficiente.

La mayoría de los pozos con fines de uso agrícola, ubicados mayormente en la parte media de la cuenca Zarumilla, se encuentran instalados en los materiales aluviales, compuesto generalmente de arena fina y a una profundidad muy somera, en mucho de los casos menores a 10 m de profundidad y de manera artesanal. Es decir, no cuentan con materiales de filtro en los espacios anulares y las aperturas de los tramos ranurados son grandes (hasta centimétricos), por donde ingresa material fino al interior del pozo durante su extracción, produciendo un “arenamiento” o “colmatación” y su consiguiente reducción de la profundidad del pozo, que en muchos casos conlleva a la inutilidad del pozo, convirtiéndolo en no utilizables.

Figura 7-4: Pozos Inventariados por Uso del Agua

Figura 7-5: Pozos Inventariados por Profundidad del Pozo

7.1.5.6 Explotación del Acuífero Mediante Pozos

Para efectos del cálculo de explotación del agua subterránea en la cuenca Zarumilla, se procedió inicialmente con la evaluación de los datos obtenidos durante el inventario realizado de setiembre a octubre del 2019; sin embargo, debido a que mucho de los pozos no contaban con información de caudal y régimen de uso registrado, éstos se completaron, en la medida de lo posible, con caudales en base al uso del agua y características de las bombas que fueron registradas para el mismo pozo y los pozos cercanos durante el inventario.

Esta complementación de datos es muy importante si se tiene en cuenta que los pozos con datos de campo obtenidos durante el inventario sólo representan el 27 % frente a los datos completados, o de otra forma, los datos completados representan el 368% de los pozos con datos (véase Tabla 7-9). El mayor porcentaje se aprecia en Perú, donde los datos completados representan el 591% frente a los datos obtenidos en campo; a diferencia de Ecuador que tiene un porcentaje menor (185%). Para una mayor precisión sobre el cálculo de explotación, se sugiere efectuar los inventarios de uso de agua subterránea (explotación) de manera periódica por las autoridades gubernamentales de ambos países.

Tabla 7-9: Comparación de Datos de Explotación Inventariados (2019) versus Completados

País	Pozos Inventariados (2019)	Pozos Utilizados y Utilizables	Pozos Abandonados/ sin Uso	Pozos con Datos de Campo (inventario 2019)	Pozos con Datos Completados	Pozos con Datos de Campo vs Completados	Pozos Completados vs Pozos con Datos de Campo
Perú	872	753	119	109	644	17%	591%
Ecuador	516	379	137	133	246	54%	185%
Total	**1388**	**1132**	**256**	**242**	**890**	**27%**	**368%**

De acuerdo con la información recopilada (datos de campo) durante el inventario efectuado inicialmente se calculó que en Ecuador se utiliza un total de 7 640 112.31 de m^3/año (7.64 MMC) de agua subterránea y en el Perú 10 694 265.19 de m^3/año (10.69 MMC), haciendo un total de 18 334 377.50 m^3/año (18.33 MMC), tal como se muestra en la Tabla 7-10. Sin embargo, con la complementación de datos efectuada, se obtuvo que en Ecuador se utiliza un total de 12 558 568.50 de m^3/año (12.56 MMC) de agua subterránea y en el Perú 41 286 799.78 de m^3/año (41.29 MMC), haciendo un total de 53 845 368.28 m^3/año (53.85 MMC), tal como se muestra en la Tabla 7-11.

Tabla 7-10: Volumen de Explotación Mensual de Agua Subterránea en la Cuenca Zarumilla según Inventario del 2019

Mes	Volumen de Explotación (m^3/año)					
	Ecuador		Perú		Total	
	m^3/mes	horas/mes	m^3/mes	horas/mes	m^3/mes	Porcentaje (%)
Enero	380165.90	15414.50	319298.40	10658.00	699464.30	3.82
Febrero	378520.34	15020.00	227592.00	6420.00	606112.34	3.31
Marzo	380542.46	15511.50	262407.60	8074.00	642950.06	3.51
Abril	492679.80	22185.00	593423.50	21676.50	1086103.30	5.92
Mayo	551944.08	28246.50	818686.44	33135.50	1370630.52	7.48
Junio	773163.00	42411.00	1105031.45	44697.50	1878194.45	10.24

Mes	Volumen de Explotación (m^3/año)					
	Ecuador		Perú		Total	
	m^3/mes	horas/mes	m^3/mes	horas/mes	m^3/mes	Porcentaje (%)
Julio	780561.36	43109.50	1108194.84	44734.50	1888756.20	10.30
Agosto	780561.36	42941.50	1207382.04	48435.50	1987943.40	10.84
Setiembre	780155.64	43178.00	1272841.85	53635.50	2052997.49	11.20
Octubre	781425.36	43375.50	1276588.44	53663.50	2058013.80	11.22
Noviembre	779129.64	43446.00	1263677.40	56646.50	2042807.04	11.14
Diciembre	781263.36	43450.50	1239141.24	50536.50	2020404.60	11.02
Total	**7 640 112.31**	**398 289.50**	**10 694 265.19**	**432 313.50**	**18 334 377.50**	**100.00**

Tabla 7-11: Volumen de Explotación Mensual de Agua Subterránea en la Cuenca con Datos Completados

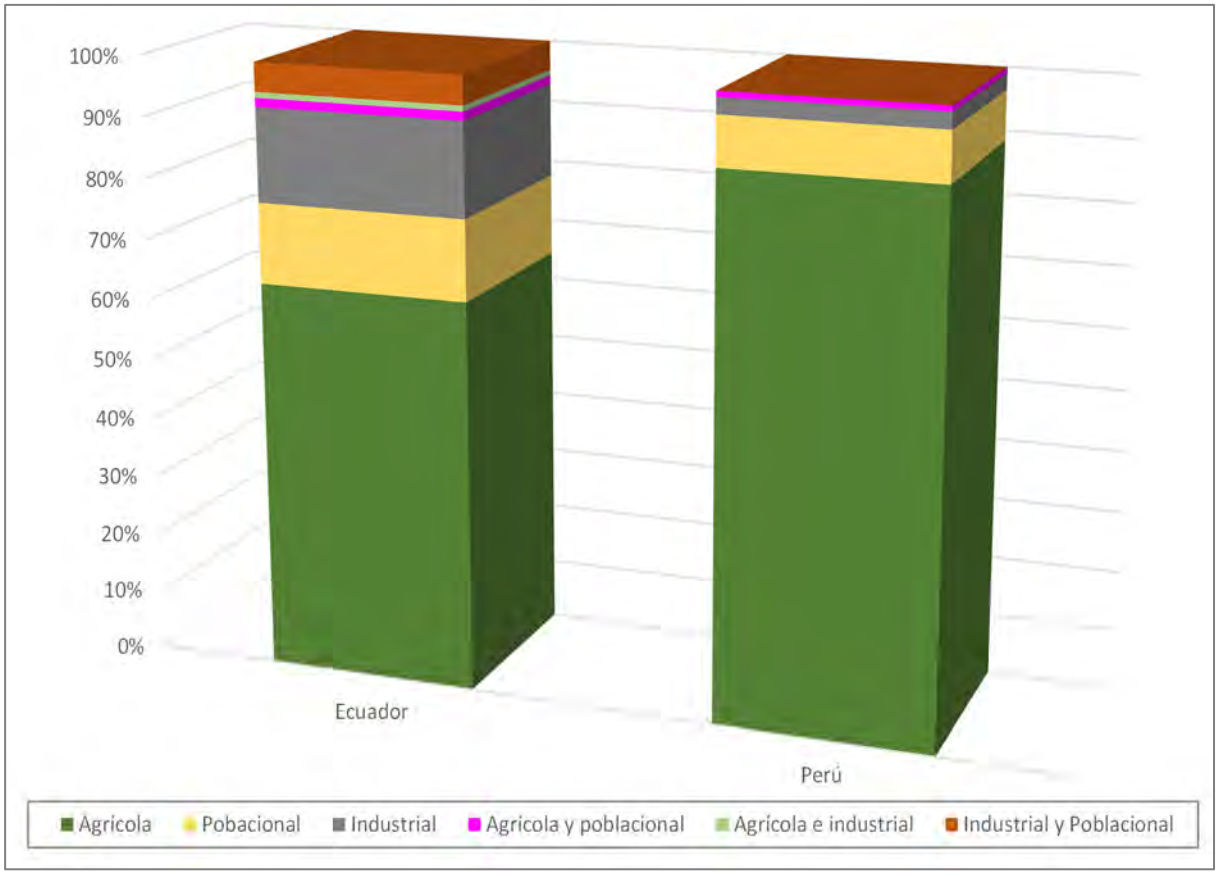
Mes	Volumen de Explotación con Datos Completados (m^3/año)					
	Ecuador		Perú		Total	
	m^3/mes	horas/mes	m^3/mes	horas/mes	m^3/mes	Porcentaje (%)
Enero	402105.81	11411.50	469454.77	10658.00	871560.58	1.62
Febrero	399218.37	11288.00	354722.53	6420.00	753940.90	1.40
Marzo	402482.37	11491.50	420832.34	8074.00	823314.71	1.53
Abril	574323.49	18373.00	936299.15	21676.50	1510622.64	2.81
Mayo	978003.49	35147.27	4448027.94	118075.87	5426031.43	10.08
Junio	1387681.25	49480.77	4816812.42	129637.87	6204493.68	11.52
Julio	1398645.01	50027.27	4818091.88	129674.87	6216736.90	11.55
Agosto	1398645.01	50027.27	4931931.89	133375.87	6330576.90	11.76
Setiembre	1399534.59	50054.77	5021185.06	138575.87	6420719.65	11.92
Octubre	1404690.20	50461.27	5022349.97	138603.87	6427040.17	11.94
Noviembre	1405719.51	50389.77	5124672.78	141586.87	6530392.30	12.13
Diciembre	1407519.40	50494.27	4922419.02	135476.87	6329938.42	11.76
Total	**12 558 568.50**	**438 646.64**	**41 286 799.78**	**1 111 836.49**	**53 845 368.28**	**100.00**

Con esta actualización, se ha estimado que los principales volúmenes de agua subterránea que vienen siendo explotados en el área de estudio corresponden a la actividad agrícola con 44 578 513.26 de m^3/año (44.58 MMC) que representa el 82.79% del total de volumen de explotación, el poblacional con 4 973 997.67 m^3/año (4.97 MMC) que representa el 9.24% y el industrial con 3 000 318.87 m^3/año (3.00 MMC) que representa el 5.57%, tal como se muestra en. la Tabla 7-12 y Gráfico 7-1.

Tabla 7-12: Volumen de Explotación de Agua Subterránea en la Cuenca Zarumilla con Datos Completados

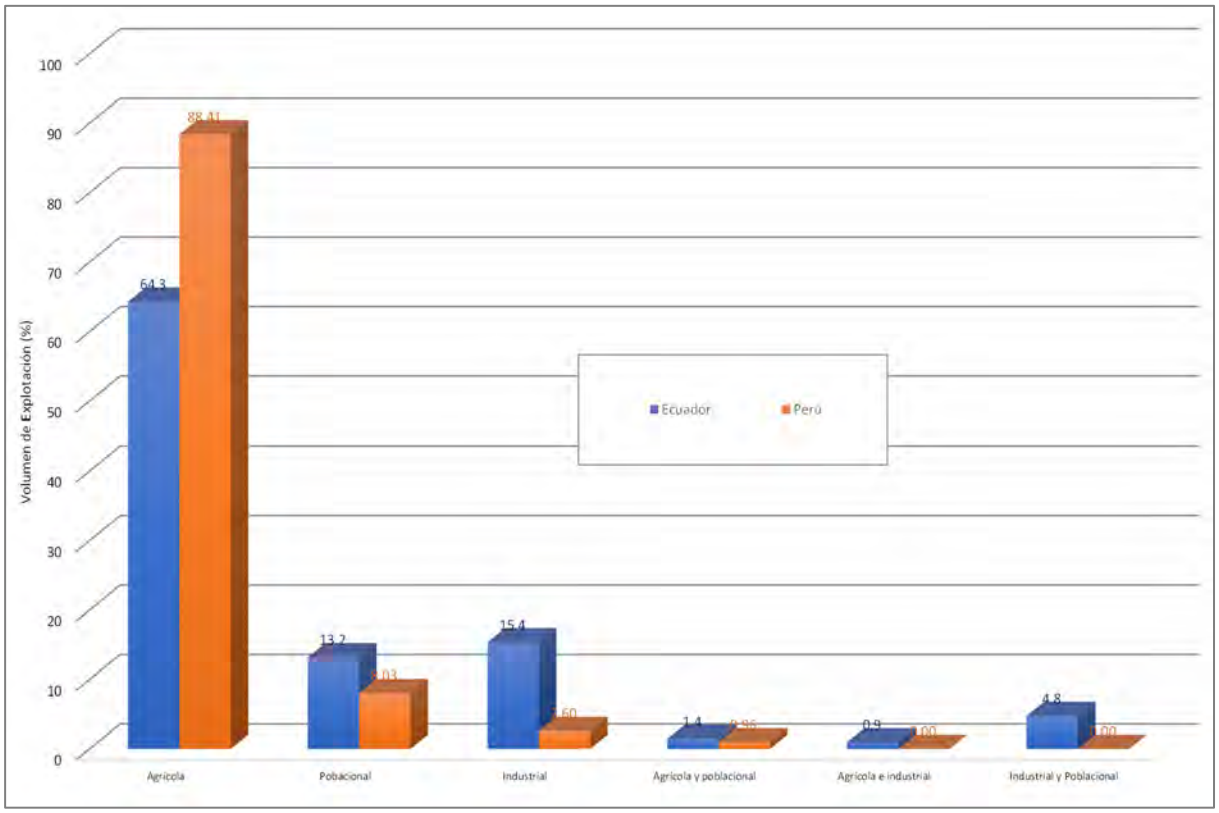
Uso	Volumen de Explotación (m^3/año)					
	Ecuador	Porcentaje (%)	Perú	Porcentaje (%)	Total	Porcentaje (%)
Agrícola	8075173.05	64.30	36503340.21	88.41	44578513.26	82.79
Poblacional	1657232.54	13.20	3316765.13	8.03	4973997.67	9.24
Industrial	1928206.06	15.35	1072112.80	2.60	3000318.87	5.57
Agrícola y poblacional	181665.20	1.45	394581.64	0.96	576246.84	1.07
Agrícola e industrial	119094.85	0.95	0.00	0.00	119094.85	0.22
Industrial y Poblacional	597196.80	4.76	0.00	0.00	597196.80	1.11
Total	**12558568.50**	**100.00**	**41286799.78**	**100.00**	**53845368.28**	**100.00**

Gráfico 7-1: Volumen Estimado de Agua Subterránea Explotada con Datos Completados



El porcentaje de uso de agua subterránea es diferente en ambos países. En Ecuador, el 4.30% es para uso agrícola, seguido del industrial (15.35%) y poblacional (13.20%); mientras que en Perú, los principales usos son agrícola y poblacional con 82.79% y 9.24.49%, respectivamente, tal como se muestra en el Gráfico 7-3: .

Gráfico 7-2: Volumen Estimado de Agua Subterránea Explotada con Datos Completados

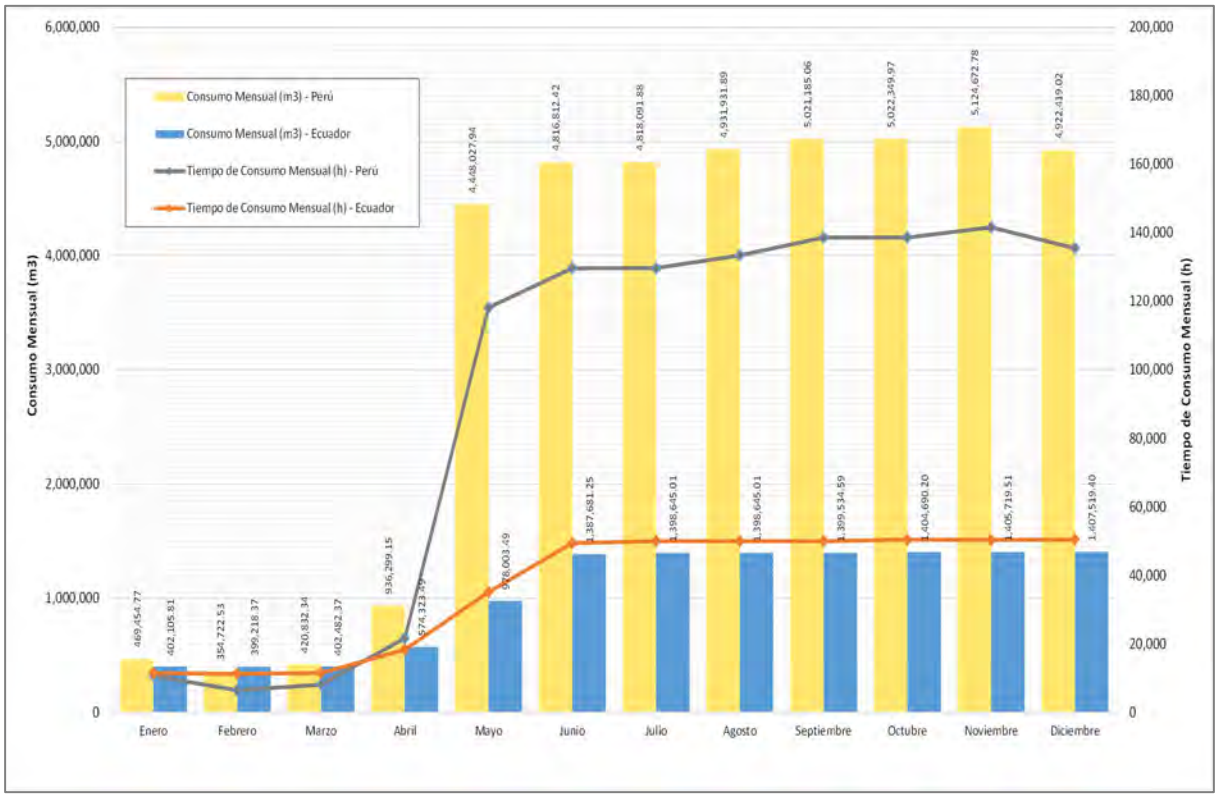


Los cálculos de volumen de explotación de agua subterránea mensual indican que éstas son mayormente usadas durante los meses de junio a diciembre y en menor cantidad los meses de enero a marzo (véase Tabla 7-11 y Gráfico 7-3:). Esto se correlaciona con los meses de lluvia (entre noviembre y marzo), donde los pobladores hacen mayor uso de agua superficial que de agua subterránea.

De acuerdo con los cálculos de uso de agua subterránea por horas mes, se tiene que en Ecuador durante los meses de junio a diciembre utilizan en el rango de 49 481 a 50 494 horas, mientras que en Perú en el mismo período el uso es de 129 638 a 135 477 horas (véase Tabla 7-11).

De acuerdo con los resultados del estudio y en base al caudal de explotación actual de los pozos, principalmente someros, no existe la posibilidad de sobre explotación del acuífero. Sin embargo, esto solo podrá ser determinado con mayor detalle cuando se realicen estudios hidrogeológicos más detallados y focalizados para cada sector o área de interés

Gráfico 7-3: Volumen Mensual Estimado de Agua Subterránea Explotada con Datos Completados



7.1.5.7 Situación Legal de las Fuentes de Agua Subterránea (Derecho/autorización de Uso o Aprovechamiento)

Del total de 516 pozos inventariados en Ecuador, sólo 30 manifestaron contar con algún tipo de permiso; mientras que 328 indicaron no contar con permiso y el resto indicó no tener conocimiento, tal como se muestra en la Tabla 7-13.

En Perú, casi la totalidad de los encargados o propietarios de los pozos indicaron no tener conocimiento de si cuentan o no con permiso, y sólo 69 indicaron contar con el mismo (véase Tabla 7-13).

Tabla 7-13: Situación Legal de los Pozos Inventariados

Sector	Con Permiso	Sin Permiso	No Sabe/Sin Dato	Total
Ecuador	30	328	158	516
Perú	69	79	724	872
Total	**99**	**407**	**882**	**--**
Gran Total				**1388**

7.1.5.8 Características Técnicas de los Pozos

De los 1388 pozos inventariados, 808 cuentan con equipo y 575 pozos no cuentan con equipo; siendo en su mayoría los pozos tubulares los que cuentan con equipo (392 pozos) seguido por los del tipo mixto (250 unidades) y los del tipo tajo abierto (166 pozos), tal como se muestra en la Tabla 7-14.

Tabla 7-14: Detalle de Pozos Inventariados por Tipo y Equipamiento

Sector	Tubular						Mixto		Tajo Abierto			Total
	Con Equipo	Sin Equipo	Sin Dato(*)				Con Equipo	Sin Equipo	Con Equipo	Sin Equipo	Sin Dato(*)	
			SD1	SD2	SD3	SD9					SD1	
Ecuador	242	115	1	0	0	0	31	31	48	47	1	516
Perú	150	95	0	1	1	1	219	119	118	168	0	872
Subtotal	**392**	**210**	**1**	**1**	**1**	**1**	**250**	**150**	**166**	**215**	**1**	**--**
Total	**606**						**400**		**382**			**--**
Gran Total												**1388**

Nota: (*)Sin dato: SD1 No se pudo acceder al pozo, medir o registrar datos por no tener permiso de ingreso, estar cercado, sin persona a cargo o no quiso brindar información, SD2 Pozo con caseta, tapiado con palos, sellado o cerrado con candado, SD3 Pozo en perforación, no quisieron brindar información, SD9 Pozo inaccesible por estar cubierto por monte (maleza, arbustos y árboles.

7.2 POZOS EN ESTADO NO UTILIZABLE

Durante la ejecución del inventario se identificaron pozos en estado No Utilizable en un total de 380 pozos (ver Tabla 7-15) cuya ubicación se presenta en la Figura 7-6.

Tabla 7-15: Pozos en Estado No Utilizable

Sector	Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Cantidad de Pozos
Ecuador	El Oro	Arenillas	Carcabón	21
	El Oro	Arenillas	Chacras	26
	El Oro	Arenillas	Palmales	24
	El Oro	Huaquillas	Huaquillas	7
Subtotal				**78**
Perú	Tumbes	Zarumilla	Matapalo	83
	Tumbes	Zarumilla	Papayal	118
	Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	101
	Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	0
Subtotal				**302**
Total				**380**

Figura 7-6: Pozos en Estado No Utilizable

7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INVENTARIO ACTUAL CON RESULTADOS PREVIOS

Esta sección presenta una comparación entre los resultados obtenidos en el presente estudio, en adelante Inventario 2019, y lo registrado en inventarios previos del acuífero Zarumilla, tanto para el sector peruano como para el sector ecuatoriano, los cuales fueron alcanzados por el PNUD como parte de los documentos para la elaboración de la propuesta y como información existente en la etapa inicial de la presente consultoría.

Para el sector peruano se usó el inventario presentado como parte del estudio "*Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Zarumilla"* (MINAGRI - ANA, Noviembre 2009), en adelante Inventario 2009; mientras que, para el sector ecuatoriano, la información se extrajo de la base de datos cartográfica de pozos entregada por el PNUD.

En la Tabla 7-16 se presenta un resumen comparativo del total de pozos inventariados/ registrados por sector peruano y ecuatoriano, considerando el nivel de detalle que permite el nivel de división política en el que fueron presentados los resultados del inventario o estudios previos.

Tabla 7-16: Comparativo de Cantidad Total de Pozos/Captaciones Inventariadas

Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Cantidad de Pozos	
			Base de Datos de Pozos en Ecuador(a)/ Inventario 2009(b)	Inventario 2019
Sector Ecuatoriano				
El Oro	Arenillas	Carcabón	278	136
El Oro	Arenillas	Chacras		181
El Oro	Arenillas	Palmales		116
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	19	83
Total			**297**	**516**
Sector Peruano				
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	206	322
Tumbes	Zarumilla	Papayal	281	299
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	326	238
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	47	13
Total			**860**	**872**

Fuente: (a) Base de datos cartográfica de inventario de pozos subterráneos en Ecuador proporcionada por PNUD; (b) Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Zarumilla" (MINAGRI - ANA, Noviembre 2009)

Los niveles de detalle de la información previa difieren entre los sectores peruano y ecuatoriano, presentándose mayor detalle para el sector peruano que el ecuatoriano; por lo cual, las comparaciones para el sector ecuatoriano son limitadas.

La Figura 7-7 y la Figura 7-8 presentan, para Perú y Ecuador, respectivamente, un comparativo de los pozos inventariados/registrados previamente y en el 2019.

La Tabla 7-17 presenta el comparativo de los pozos inventariados según el tipo de los mismos, observándose que en el Inventario 2009 en el sector peruano la mayoría de los pozos eran

del tipo tajo abierto (565 pozos), mientras que en el Inventario 2019, la mayoría de los pozos son del tipo mixto (338 pozos).

La Tabla 7-18 presenta el comparativo de los pozos inventariados según el estado de los mismos, observándose que en el Inventario 2009 en el sector peruano la mayoría de los pozos eran Utilizables (373 pozos), mientras que en el Inventario 2019, la mayoría de los pozos son Utilizados (523 pozos), seguidos por los Utilizables (343 pozos).

En la Tabla 7-18 también se aprecia que en el Inventario 2009 en el sector peruano se consideraron como parte del inventario los pozos No Utilizables, siendo éstos 222 pozos; sin embargo, en el Inventario 2019, éstos fueron descartados como parte del inventario y se muestra solo a manera ilustrativa con la finalidad de tomar en cuenta la cantidad actual de éstos tanto en Perú como Ecuador (302 pozos en total, ver detalle en el ítem 7.2).

Tabla 7-17: Comparativo de Pozos/Captaciones Inventariadas por su Tipo

Departamento/ Provincia	Provincia/ Cantón	Distrito/ Parroquia	Base de Datos de Pozos en Ecuador(a) / Inventario 2009(b)				Inventario 2019			
			Tubular	Tajo Abierto	Mixto	Total	Tubular	Tajo Abierto	Mixto	Total
Sector Ecuatoriano										
El Oro	Arenillas	Carcabón	278			278	55	50	31	136
El Oro	Arenillas	Chacras				0	144	19	18	181
El Oro	Arenillas	Palmales				0	91	24	1	116
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	19			19	68	3	12	83
Subtotal			**297**			**297**	**358**	**96**	**62**	**516**
Sector Peruano										
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	68	136	2	206	94	117	111	322
Tumbes	Zarumilla	Papayal	87	189	5	281	86	111	102	299
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	108	205	13	326	55	58	125	238
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	12	35	0	47	13	0	0	13
Subtotal			**275**	**565**	**20**	**860**	**248**	**286**	**338**	**872**
Total	**1157**						**1388**			

Fuente: (a) Base de datos cartográfica de pozos subterráneos en Ecuador proporcionada por PNUD; (b) Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Zarumilla" (MINAGRI - ANA, Noviembre 2009)

Tabla 7-18: Comparativo de Pozos/Captaciones Inventariadas por su Estado

Departamento / Provincia	Provincia / Cantón	Distrito/ Parroquia	Base de Datos de Pozos en Ecuador(a) / Inventario 2009(b)				Inventario 2019				
			Utilizado	Utilizable	No Utilizable	Total	Utilizado (*)	Utilizable (**)	No Utilizable(***)	En Perforación	Total
Sector Ecuatoriano											
El Oro	Arenillas	Carcabón	278			278	98	37	21	1	136
El Oro	Arenillas	Chacras				0	125	54	26	2	181
El Oro	Arenillas	Palmales				0	75	41	7	0	116
El Oro	Huaquillas	Huaquillas	19			19	59	24	24	0	83
Total			**297**			**297**	**357**	**156**	**78**	**3**	**516**
Sector Peruano											
Tumbes	Zarumilla	Matapalo	94	88	24	206	214	104	83	4	322
Tumbes	Zarumilla	Papayal	101	110	70	281	170	127	118	2	299
Tumbes	Zarumilla	Aguas Verdes	64	144	118	326	129	109	101	0	238
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	6	31	10	47	10	3	0	0	13
Total			**265**	**373**	**222**	**860**	**523**	**343**	**302**	**6**	**872**
Gran Total			**1157 (incluidos los No Utilizables)**				**1388 (sin incluir los No Utilizables)**				

Fuente: Fuente: (a) Base de datos cartográfica de pozos subterráneos en Ecuador proporcionada por PNUD; (b) Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Zarumilla" (MINAGRI - ANA, Noviembre 2009)
Nota: (*) Utilizado: trabajando durante el censo – trabajando durante período de explotación; y (**) Utilizable: sin equipo – abandonado por bajo rendimiento – seco eventual – sellado en reserva – equipo malogrado; (***) Los pozos en estado No Utilizable no se contabilizan en el inventario 2019 y solo se muestran a manera informativa.

Figura 7-7: Pozos del Inventario 2019 versus Pozos del Inventario Previo Ecuador

Figura 7-8: Pozos del Inventario 2019 versus Pozos del Inventario Previo Perú

8 RESERVORIO ACUÍFERO

8.1 EL RESERVORIO ACUÍFERO

8.1.1 Geometría, Litología y Límites del Reservorio

8.1.1.1 Forma y Límites del Acuífero

El acuífero libre identificado en el área de estudio, en base a la interpretación de los resultados del estudio geofísico y la geología estructural, muestra una geometría similar a la cuenca hidrológica, aunque con una mayor extensión lateral en la desembocadura de la cuenca (véase Figura 8-1). Para una mejor interpretación hidrogeológica, se ha dividido la cuenca en tres (03) zonas: 1) zona alta, hacia el sur de la cuenca y por encima de los 250 msnm; 2) zona intermedia, entre los 50 y 250 msnm; y 3) zona baja, hacia el norte de la cuenca, entre los 0 y 50 msnm.

Es necesario precisar que en muchos casos el límite de la cuenca hidrológica (agua superficial) no necesariamente es el límite de la cuenca hidrogeológica (agua subterránea), y que generalmente se extienden a una mayor área, tal como se observa en esta cuenca Zarumilla. Para conocer esta delimitación es necesario la información de los niveles de agua subterránea (niveles freáticos o piezométricos) en los pozos dentro y fuera del área de estudio. En vista de la ausencia de esta información, se ha considerado como límite de la cuenca hidrogeológica la definida en la Tesis de Postgrado del Sr. Coello (Coello-Rubio, Junio 2006), la cual se presenta en la Figura 8-1.

Para la confirmación de la delimitación de la cuenca hidrogeológica Zarumilla se recomienda realizar monitoreos frecuentes de los niveles piezométricos/freáticos en los pozos sugeridos en el Capítulo 13.

8.1.1.2 Dimensiones del Acuífero

Tomando en consideración el límite del acuífero establecido por estudios anteriores (Coello-Rubio, Junio 2006), se realizó el inventario de los pozos en sus cercanías a este límite para definir las divisiorias hidrogeológicas.

Como resultado, se obtuvo un área total del acuífero Zarumilla de 1090.98 Km^2 (109 097.75 ha); mientras que el área total de la cuenca hidrográfica 874.72 Km2 (87472.31 ha).

En la zona media y alta de la cuenca, ambos límites coinciden, a diferencia de la zona baja, donde el límite de la cuenca hidrográfica se amplia, principalmente hacia el este (hacia Tumbes), en vista que su topografía es más plana y no hay una divisoria topográfica marcada (véase Figura 8-1).

Verticalmente, se considera que este acuífero podría tener un espesor variabe, entre 60 a 100 m, que se concentra en las zonas media y baja de la cuenca, dividido en dos (02) capas u horizontes diferenciados por su conductividad hidráulica (permeabilidad).

Es importante tomar en consideración que la interpretación vertical del acuífero en estudio es referencial, debido a que el presente trabajo es a una escala regional de la cuenca Zarumilla y ofrece los hallazgos hidrogeológicos de toda la cuenca en su conjunto. Sin embargo, para una determinación con mayor exactitud de las dimensiones del acuífero, tanto laterales como

verticales, será posible con estudios hidrogeológicos más detallados y localizados, de acuerdo a la necesidad y requerimiento de los actores del sitio.

8.1.1.3 Litología del Acuífero

La información sobre la litología del acuífero Zarumilla es bastante limitado, por lo que se infiere que el límite inferior (piso) del acuífero esté condicionado al espesor de los materiales cuaternarios, como depósitos recientes marinos, depósitos coluviales, aluviales y terrazas marinas; así como por los macizos rocosos altamente fracturados y meteorizados del Neógeno, compuesto mayormente por la Formación Tumbes, Cardalitos y Zorritos (mayormente entre 60 a 100 m, a veces hasta 300 m). También es posible que en algunos sectores, generalmente donde hay mayor presencia de fallas geológicas, el límite se extienda a mayores profundidades dentro de los macizos rocosos levemente fracturados, que podrían fluctuar entre los 300 m y más (véase Figura 8-2).

8.1.2 Secciones Hidrogeológicas

En base a las informaciones geológicas y geofísicas obtenidas, se ha elaborado secciones hidrogeológicas interpretadas longitudinales y transversales para la cuenca Zarumilla (Figura 8-1). En éstas se muestran los niveles freáticos interpretados a partir de la información obtenida del inventario de pozos, tanto en el presente estudio como de los datos históricos de ANA y SENAGUA (véase Figura 8-3 a Figura 8-10).

Sección 1-1’ de Norte a Sur en Sector Peruano:

La sección 1-1’ presenta una dirección prácticamente N-S, de manera longitudinal a la cuenca, donde el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte.

En el sector sureste (parte alta de cuenca Zarumilla), se interpreta que el agua subterránea presenta profundidades de 300 m a 20 m hasta llegar a Quebrada Seca. En este sector se encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 2 (Macizo rocoso levemente fracturado).

Desde la altura de Quebrada Seca hasta el sector Cuchareta Baja las profundidades del acuífero varían de 20 m a 50 m, en este sector se encuentra la predominancia de la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado), cabe indicar que la Unidad Hidrogeológica Horizonte 2 a la altura de las progresivas 12000 y 18000 se encuentra aproximadamente a 50 y 100 m de profundidad respectivamente.

Aguas abajo del sector Cuchareta Baja hasta la línea costera, el agua subterránea presenta profundidades aproximadamente de 2 a 10 m, en este sector se encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado), con predominancia del material cuaternario.

Sección 2-2’ de Noroeste a Sureste en Sector Ecuatoriano:

La sección 2-2’ presenta una dirección NW–SE, de manera longitudinal a la cuenca, y el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte.

En el sector sureste (parte alta de cuenca Zarumilla), se interpreta que el agua subterránea presenta profundidades de 300 m a 20 m hasta llegar al río El Guineo. En este sector se

encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 2 (Macizo rocoso levemente fracturado).

Desde la altura del río El Guineo hasta el sector Huaquillas las profundidades del acuífero varían de 20 m a 50 m. En este sector se encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado).

Aguas abajo del sector Huaquillas hasta la línea costera, el agua subterránea presenta profundidades aproximadamente de 2 m a 10 m. En este sector se encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado).

Sección 3-3’ de Oeste a Este en Sector Peruano-Ecuatoriano:

La sección 3-3’ presenta una dirección prácticamente W–E, de manera transversal y en la parte baja de la cuenca, y el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte, aunque se puede observar la dinámica de la dirección del acuífero transversalmente, de manera muy localizada, con direcciones de flujo del SW–NE y SE–NW.

En la sección en general el agua subterránea presenta profundidades de 5 m a 8 m, lo cual indica que el acuífero se encuentra dentro de ese rango de profundidad en las ciudades de Zarumilla, Huaquillas y el río Zarumilla. En este sector se encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado), aunque también se puede observar que la Unidad Hidrogeológica Horizonte 2 (Macizo rocoso levemente fracturado) se encuentra aproximadamente a 20 m de profundidad en la ciudad de Zarumilla y va profundizándose progresivamente en dirección al NE.

Sección 4-4’ de Oeste a Este en Sector Peruano-Ecuatoriano:

La sección 4-4’ presenta una dirección prácticamente W–E, de manera transversal y en la parte baja de la cuenca, y el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte, aunque se puede observar la dinámica de la dirección del acuífero transversalmente, de manera muy localizada, con direcciones de flujo del SW–NE y SE–NW.

En la sección en general el agua subterránea presenta profundidades de 20 m a 35 m, lo cual indica que el acuífero se encuentra dentro de ese rango de profundidad en la localidad de Papayal. Cabe indicar que aproximadamente entre las progresivas 11000 – 12000 y 13000 – 14000 la profundidad del agua subterránea está a aproximadamente 10 m. En este sector se encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado).

Sección 5-5’ de Oeste a Este en Sector Peruano-Ecuatoriano:

La sección 5-5’ presenta una dirección prácticamente W–E, de manera transversal y en la parte intermedia lata de la cuenca, y el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte, aunque se puede observar la dinámica de la dirección del acuífero transversalmente, de manera muy localizada, con direcciones de flujo del SW–NE y SE–NW.

Desde el sector suroeste hasta el río Zarumilla el agua subterránea presenta profundidades de 20 m a 60 m, y desde la altura de río Zarumilla hacia el noreste varían de 50 m a 150 m. En estos sectores se encuentra la predominancia de la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado).

Sección 6-6’ de Oeste a Este en Sector Peruano-Ecuatoriano:

La sección 6-6’ presenta una dirección prácticamente W–E, de manera transversal y en la parte alta de la cuenca, y el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte, aunque se puede observar la dinámica de la dirección del acuífero transversalmente, de manera localizada, con direcciones de flujo del SW–NE y SE–NW.

Desde el sector suroeste hasta la Quebrada Intermitente (progresiva 21500) el agua subterránea presenta profundidades de 100 m a 200 m, y desde la altura de la Quebrada Intermitente (progresiva 21500) hacia el noreste las profundidades del acuífero varían de 200 m a 600 m (sectores montañosos). En estos sectores se encuentra la predominancia de la Unidad Hidrogeológica Horizonte 2 (Macizo rocoso levemente fracturado).

Sección 7-7’ de Oeste a Este en Sector Peruano-Ecuatoriano:

La sección 7-7’ presenta una dirección prácticamente W–E, de manera transversal y en la parte baja de la cuenca, y el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte. Asimismo, se puede observar que la dinámica de la dirección del acuífero transversalmente, de manera localizada, tiene direcciones de flujo del SW–NE y SE–NW.

En la sección en general el agua subterránea presenta profundidades de 20 m a 35 m, lo cual indica que el acuífero se encuentra dentro de ese rango de profundidad en las localidades de El Porvenir y Chacras. Cabe indicar que aproximadamente entre las progresivas 6000 – 6500 y 12400 – 12600, la profundidad del agua subterránea es aproximadamente 8 m. En este sector se encuentra predominando la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado).

Sección 8-8’ de Noroeste a Sureste en Sector Peruano-Ecuatoriano:

La sección 8-8’ presenta una dirección NWW–SEE, de forma transversal y en la parte intermedia de la cuenca, donde el flujo del agua subterránea se dirige aproximadamente en dirección de sur a norte, aunque se puede observar la dinámica de la dirección del acuífero transversalmente, y de manera muy localizada, direcciones de flujo del SW–NE y SE–NW.

Desde el sector suroeste hasta el río Zarumilla el agua subterránea presenta profundidades de 2 m a 50 m, y desde la altura de río Zarumilla hasta la progresiva 27000 varían de 2 m a 20 m. Desde la progresiva 27000 hacia el sureste se encuentran a profundidades de 50 m a 150 m.

En estos sectores se encuentra la predominancia de la Unidad Hidrogeológica Horizonte 1 (Material cuaternario/ macizo rocoso altamente fracturado), aunque hacia el sureste de la sección, la Unidad Hidrogeológica Horizonte 2 se encuentra a 80 m de profundidad, aproximadamente.

8.1.3 Napa Freática

En base a las mediciones de los niveles de agua subterránea en los pozos inventariados, y complementadas con los monitoreos históricos, se elaboró un mapa hidrogeológico del acuífero libre (véase Figura 8-1). Aunque la mayoría de las mediciones de los niveles de agua en los pozos han sido niveles dinámicos, incluyendo los inventariados por la ANA y el SENAGUA, se ha calculado los probables niveles estáticos correspondientes, considerando

las elevaciones topográficas del terreno y diferenciando los pozos ubicados en las orillas de los ríos o quebradas, de los ubicados en montañas o laderas.

8.1.3.1 Morfología del Techo de la Napa Freática

Dada la limitada precipitación en la parte media y baja de la cuenca Zarumilla y, por ende, con una muy limitada recarga vertical hacia el acuífero, se interpreta que la geometría del nivel freático del acuífero, sobre todo en la parte intermedia de la cuenca, debe reflejar la topografía superficial y que sus límites laterales podrían coincidir en mayor parte con los límites de la cuenca hidrográfica. Sin embargo, en la parte alta de la cuenca, por el tipo de litología (rocas metamórficas), se interpreta que la napa freática del acuífero podría estar limitada a una profundidad somera, donde se encuentre roca meteorizada o altamente fracturada.

Se puede interpretar que regionalmente, en la zona baja de la cuenca, la napa freática del acuífero tiene bastante similitud con la topografía del terreno y tiene una gradiente hidráulica de 0.2%, con una dirección de flujo hacia el norte hasta desembocar en el estuario que comparten tanto Perú como Ecuador; aunque localmente, esta dirección de flujo podría variar dependiendo la topografía del terreno, hacia el noreste o noroeste. En la zona intermedia sucede lo mismo, aunque la gradiente hidráulica varía entre 0.5% a 0.6%; y en la zona alta de la cuenca la gradiente hidráulica se incrementa, debido a la presencia de montañas con topografías en muchos casos abruptas, y que varían entre 1.25% hasta 3.3%

En resumen, la morfología de la napa freática es variada, dependiendo principalmente de la topografía y precipitación, pero en forma regional la dirección del flujo se dirige del sur hacia el norte para descargar finalmente al Océano Pacífico a través del estuario. En algunas zonas donde hay quebradas poco profundas, mayormente en la parte intermedia de la cuenca, la dirección del flujo varía y se dirige localmente hacia éstas para finalmente continuar con la dirección hacia el norte (véase Figura 8-1).

8.1.3.2 Profundidad del Techo de la Napa

La profundidad interpretada de la napa freática del acuífero en base a los datos del inventario de pozos fluctúan de manera diferenciada en todo el área de la Cuenca Zarumilla.

En la parte intermedia y baja de la cuenca, en territorio ecuatoriano los niveles freáticos son muy someros y fluctúan mayoritariamente entre 1 y 3 m bajo superficie, y en algunos sectores aproximadamente hasta los 10 m; y esporádicos pozos superan los 100 m. Lo mismo ocurre en territorio peruano, donde los niveles freáticos fluctúan mayoritariamente entre 2 y 6 m bajo superficie y en algunos sectores entre 30 y 40 m, con muy esporádicos pozos que superan los 80 m bajo superficie(véase Figuras 8-2 a 8-10).

Estas profundidades muy someras de la napa freática inducen a interpretar que la gran mayoría de pozos captan agua superficial o mezclada, especialmente las ubicadas en las cercanías de los ríos y valles, y no necesariamente están captando agua propiamente subterránea. Esto es evidente, si se toma en cuenta las profundidades de los pozos instalados, que mayormente fluctúan entre los 10 m bajo superficie en territorio ecuatoriano, y entre 5 a 20 m en territorio peruano, los que principalmente se encuentran instalados en los valles y próximos a los ríos.

8.1.3.3 Fluctuaciones del Nivel Freático

Debido a que el alcance del estudio hidrogeológico (presente consultoría) solo contempló una campaña de levantamiento de información para el inventario, en una sola época climática (época seca), no fue posible comparar la fluctuación de los niveles freáticos con los que podrían registrase en la época húmeda. Sin embargo, por la información revisada de los monitoreos piezométricos y las condiciones climáticas conocidas del área de estudio, se espera que los niveles freáticos tengan un incremento en su nivel en las épocas húmedas, es decir, durante las épocas de recarga al acuífero.

Por las condiciones litológicas donde mayormente están instalados la mayoría de los pozos, en materiales cuaternarios, como arenas, grabas, limo y macizos rocosos muy fracturados, es de esperarse que las fluctuaciones de los niveles freáticos respondan rápida y directamente a los períodos de precipitaciones; es decir que el nivel freático se elevará durante el período de lluvias y descenderá cuando culmine.

Otro de los fatores para las fluctuaciones del nivel freático serán los constantes bombeos de agua desde los pozos, lo que implica mayormente descensos temporales de cortos períodos, aunque por la profundidad de los pozos instalados y por la ubicación de las bombas sumergibles, es de esperarse que éstos sean de solo algunos metros.

Figura 8-1: Mapa Hidrogeológico Interpretado (Octubre 2019)

Figura 8-2: Mapa de Isoprofundidades de la Napa Freática (octubre 2019)

Figura 8-3: Sección Hidrogeológica Interpretada 1-1´ (Octubre 2019)

Figura 8-4: Sección Hidrogeológica Interpretada 2-2´ (Octubre 2019)

Figura 8-5: Sección Hidrogeológica Interpretada 3-3´ (Octubre 2019)

Figura 8-6: Sección Hidrogeológica Interpretada 4-4´ (Octubre 2019)

Figura 8-7: Sección Hidrogeológica Interpretada 5-5´ (Octubre 2019)

Figura 8-8: Sección Hidrogeológica Interpretada 6-6´ (Octubre 2019)

Figura 8-9: Sección Hidrogeológica Interpretada 7-7´ (Octubre 2019)

Figura 8-10: Sección Hidrogeológica Interpretada 8-8´ (Octubre 2019)

9 HIDRÁULICA SUBTERRÁNEA

9.1 INTRODUCCIÓN

En base a la disponibilidad y ubicación de los pozos existentes, se programó diez (10) pruebas de bombeo, de las cuales cinco (05) fueron en Ecuador y cinco (05) en Perú.

La selección de pozos para la ejecución de las pruebas de bombeo consideró los siguientes criterios:

- Que sean pozos de bombeo equipados y operativos,
- Que sean pozos someros y profundos, según la disponibilidad del área, a fin de caracterizar los dos horizontes del acuífero libre,
- Que se abarque de la mayor distribución posible dentro de la extensión del área de estudio, y
- En vista de la falta de descripción litológica de los pozos de bombeo (registros de perforación, diseño de pozo, etc.), se consideró realizar las pruebas en pozos ubicados en sectores de litología representativa, tomando como objetivo los potenciales horizontes someros y profundos.

En vista que los pozos de bombeo servirían también para la toma de muestras de calidad de agua, se consideró priorizar los pozos de bombeo de consumo humano.

La duración de las pruebas de bombeo, debido a que se ejecutó en pozos equipados y disponibles, estuvo supeditada a la disponibilidad y condiciones del pozo de bombeo existente; es decir, a la capacidad del volumen del tanque reservorio para su almacenamiento o los períodos máximos de apagado de la bomba permitida por el operador en función a los requerimientos poblacionales, etc.

Adicionalmente, las pruebas de bombeo realizadas en pozos que registraron una rápida estabilización en sus descensos y posteriores recuperaciones, debido a la alta conductividad hidráulica (permeabilidad) del acuífero, tuvieron un menor periodo de prueba; para lo cual, previamente, se confirmó la fiabilidad de los datos obtenidos y que puedan ser útiles para la caracterización de los parámetros hidráulicos correspondientes.

9.2 PRUEBAS DE BOMBEO EXISTENTES

Por información revisada, se conoce que en el área de estudio se ejecutaron pruebas de bombeo hasta el 2009, tanto en Ecuador como en Perú, por PREDESUR e INRENA, respectivamente.

Como resultado de estas pruebas se obtuvieron datos de transmisividad, conductividad hidráulica y en algunos casos coeficiente de almacenamiento.

9.3 PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS

En la Tabla 9-1 se presentan los detalles de la ubicación de los pozos de pruebas de bombeo. En la Figura 9-1 se presenta la distribución en el área de estudio de los pozos donde se ejecutaron las pruebas de bombeo.

Tabla 9-1: Pozos de Pruebas de Bombeo Ejecutadas

N°	Código del Pozo/Captación	Sector	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)	
			Este (m)	Norte (m)
Sector Ecuatoriano				
1	H1-CHA-168	Balsalito	587255	9604130
2	H1-PAL-011	Palmales	599364	9594005
3	H1-QUE-053	Quebrada Seca	590437	9594901
4	H2-CHA-170	Chacras	588794	9607698
5	H2-HUA-250	Huaquillas	585111	9615003
Sector Peruano				
6	H1-PPY-325	Papayal	581795	9607016
7	H1-ZAR-327	Zarumilla	580208	9612465
8	H3-MAT-014	Tutumo	582470	9591446
9	H3-MAT-096	Isla Noblecilla	587089	9591440
10	H3-PPY-040	Lechugal	588982	9600274

En el Anexo V se presentan las fichas de bombeo para cada uno de los pozos donde se realizaron las pruebas.

Figura 9-1: Pruebas de Bombeo Ejecutadas

9.4 PARÁMETROS HIDRÁULICOS (T,K,S)

9.4.1 Pozo de Bombeo - Balsalito (H1-CHA-168)

La prueba de bombeo fue realizada en el pozo tubular de agua potable de la localidad de Balsalito, Parroquia de Chacras. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 587255 m / N 9604130 m y 24 msnm, con código de inventario H1-CHA-168.

9.4.1.1 Características del Pozo de Bombeo

- Diámetro de pozo: 8”
- Nivel estático: 8.38 metros bajo punto de referencia (mbpr)
- Profundidad del pozo: 83.25 mbpr
- Profundidad de la bomba: 64 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 3”
- Caudal de explotación: 5.2 l/s
- Potencia de la bomba: 7 HP
- Marca de la bomba: Franklin Electric
- *Stick up*: 0.25

9.4.1.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Posterior a la medición del nivel estático en el pozo de bombeo, se intentó ingresar la tubería de PVC de 1.5” como medida de protección del dispositivo de medición automática *datalogger*; sin embargo, no fue posible su instalación debido al pequeño espacio disponible en la tapa de cobertura del pozo por lo cual se procedió a realizar las mediciones de manera manual con una sonda eléctrica durante el transcurso de la prueba de bombeo.

La prueba de bombeo inició a las 12:57 horas del 28 de setiembre del 2019 y finalizó a las 16:27 del mismo día, incluyendo la prueba de recuperación, prolongándose por un período total de 204 minutos (cerca de 3 horas y media), donde se registró la estabilización del descenso y recuperación. El bombeo tuvo una duración de 90 minutos, posteriormente tuvo que apagarse la bomba debido al llenado del reservorio, registrándose la recuperación por un periodo de 120 minutos. El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible; sin embargo, este pozo no cuenta con un caudalímetro, por lo que la medición de los caudales se realizó con el uso de un recipiente calibrado, obteniéndose 5.2 l/s.

El nivel estático inicial fue de 8.38 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible (ingreso de agua) se encontraba a una profundidad de 64 m, lo que indicó una disponibilidad de descenso máximo de 55.62 m. Durante la prueba de bombeo, el descenso obtenido fue de 6.16 m (véase Gráfico 9-1) con un caudal de bombeo de 5.2 l/s.

Como resultado de esta prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de 5.3 x 10^{-4} m^2/s (prueba de bombeo) y 7.9 x 10^{-4} m^2/s (prueba de recuperación), tal como se muestra en el Gráfico 9-2 y Gráfico 9-3

Gráfico 9-1: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-168 – Descenso Lineal

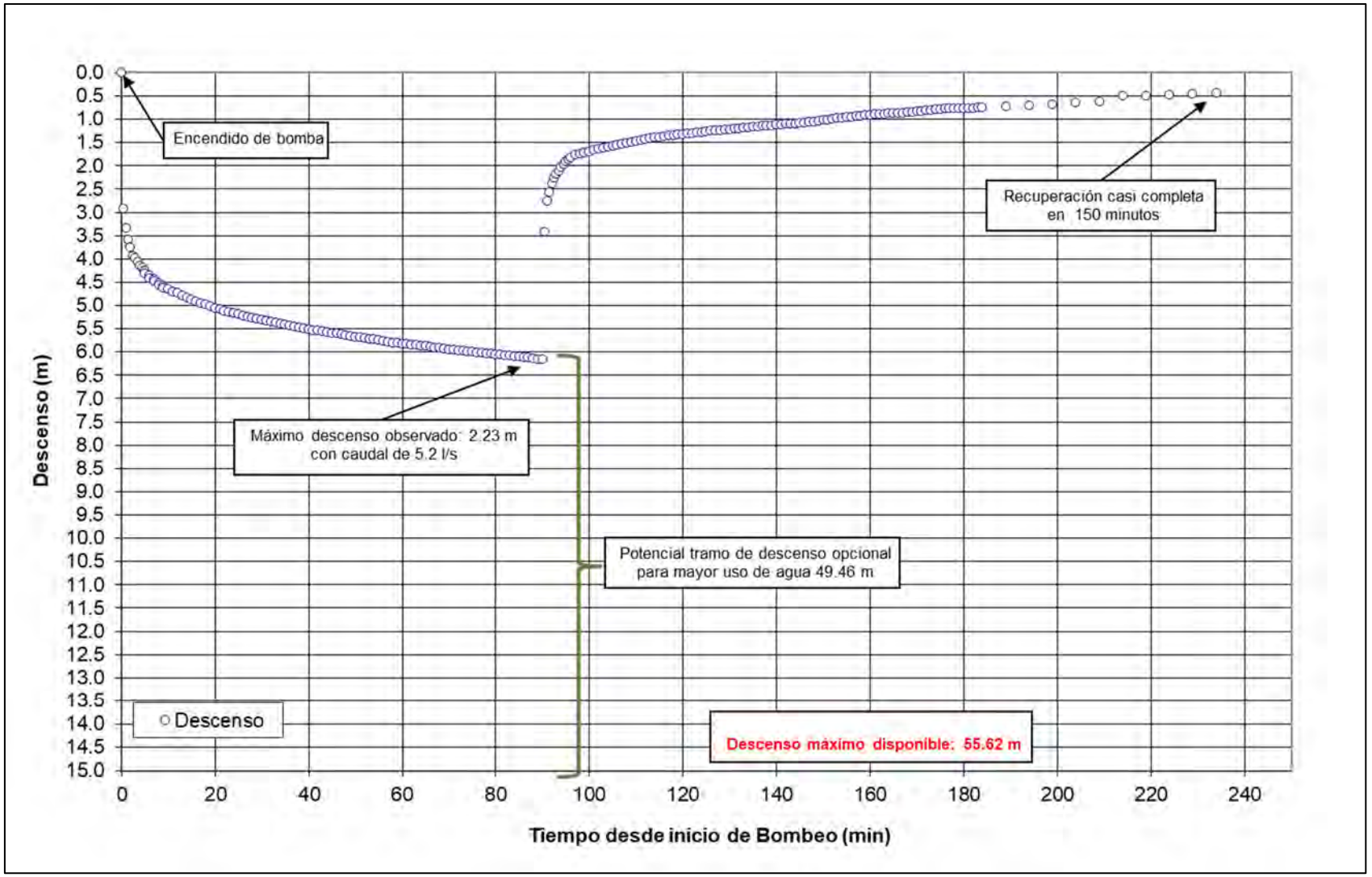


Gráfico 9-2: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-168

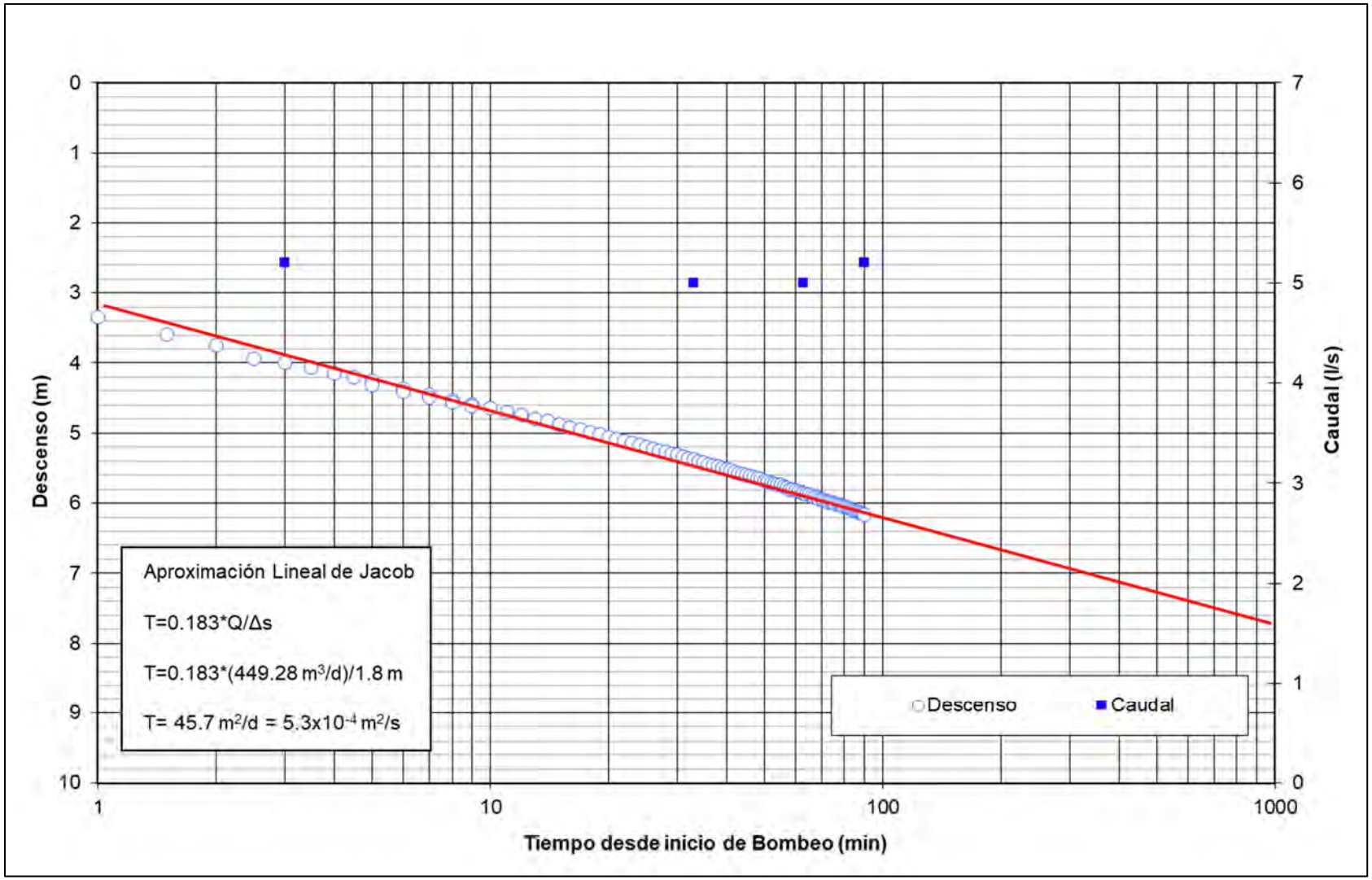
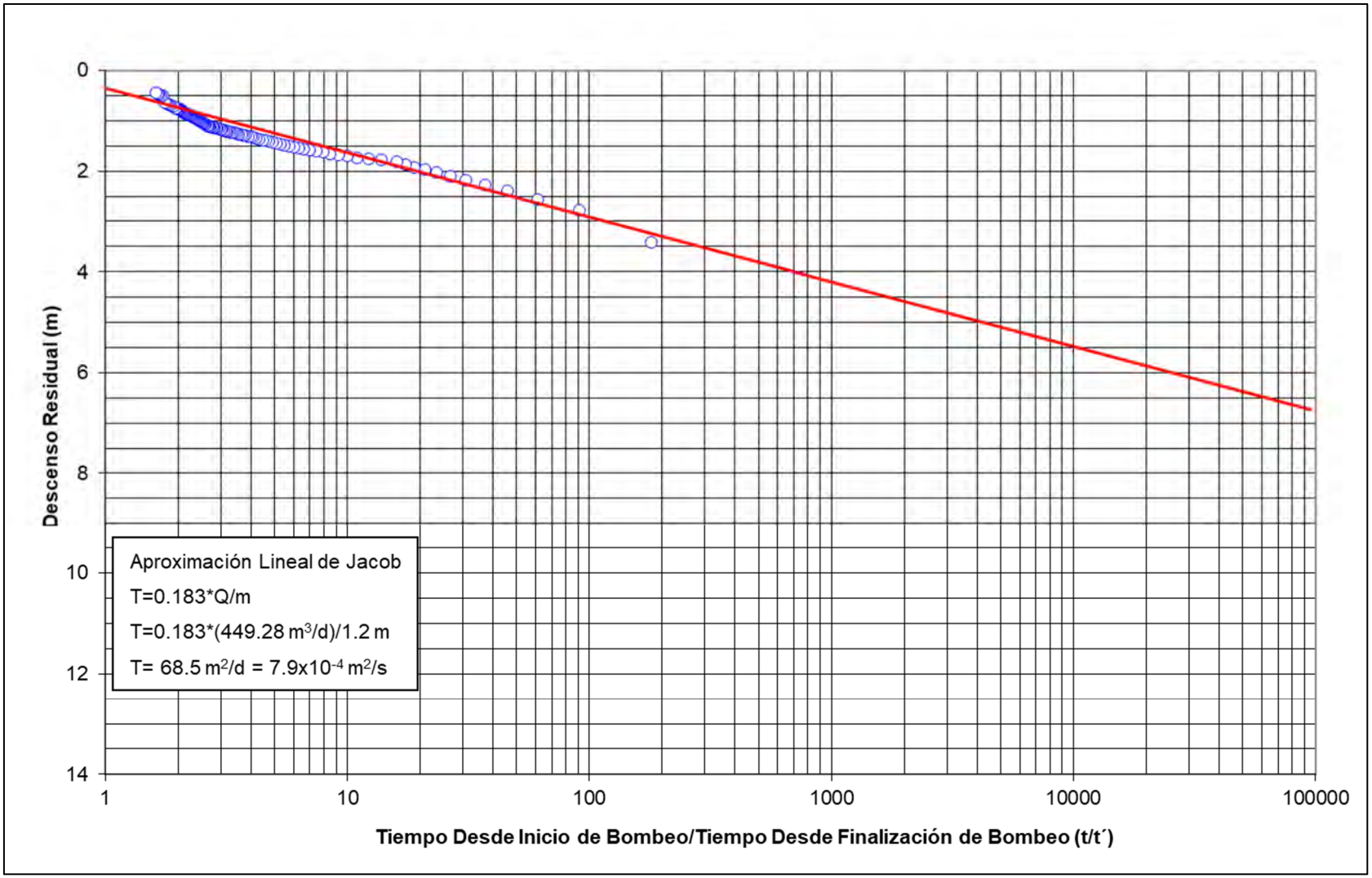
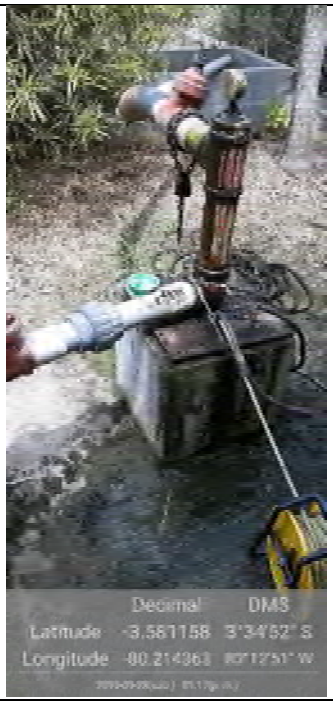


Gráfico 9-3:: Prueba de Recuperación en Pozo Balsalito- H1-CHA-168



En la Foto 9-1 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-1: Pozo Balsalito- H1-CHA-168

<table>
<tr><td>
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo – Balsalito H1-CHA-168</td><td>Vista cercana de Pozo de Bombeo – Balsalito H1-CHA-168</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Medición manual de niveles dinámicos en pozo de Bombeo H1-CHA-168</td><td>Ingreso de sonda eléctrica en pozo de Bombeo H1-CHA-168</td></tr>
</table>

9.4.2 Pozo de Bombeo – Palmales (H1-PAL-011)

La prueba de bombeo fue realizada en el pozo tubular de agua potable de la localidad de Palmales, Parroquia Palmales. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 599364 m / N 9594005 m y 71 msnm, con código de inventario H1-PAL-011.

En las cercanías, a aproximadamente 10 m, existe un pozo tubular equipado con bomba sumergible, el cual no se utiliza en la actualidad, ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 599369.6 m / N 9593998 m y 74 msnm. Este pozo, con código de inventario H1-PAL-012, fue utilizado como pozo de observación durante la prueba de bombeo ejecutada.

A continuación, se exponen las características técnicas del pozo de bombeo y del pozo de observación.

9.4.2.1 Características del Pozo de Bombeo (H1-PAL-011)

- Diámetro de pozo: 10”
- Nivel dinámico: 5.30 mbpr
- Profundidad del pozo: 60.50 mbpr
- Profundidad de la bomba: 25 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 4”
- Caudal de explotación: 20 l/s
- Potencia de la bomba: 20 HP
- Marca de la bomba: Franklin Electric
- *Stick up*: 0.50

9.4.2.2 Características del Pozo de Observación (H1-PAL-012)

- Diámetro de pozo: 10”
- Nivel dinámico: 4.72 mbpr
- Profundidad del pozo: 40.17 mbpr
- Diámetro de bomba sumergible: no conocida
- Profundidad de la bomba: no conocida
- Caudal de explotación: no se utiliza en la actualidad
- *Stick up*: 0.17

9.4.2.3 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Inicialmente, se procedió a realizar la medición del nivel dinámico, tanto en el pozo de bombeo como en el de observación. Se instaló una manguera de PVC de 1.5” de diámetro como medida de protección y realizar las medidas a través de ésta con el dispositivo de medición automática *datalogger* y con la sonda eléctrica de medición manual.

La prueba de bombeo inició a las 17:45 horas del 29 de setiembre del 2019 y finalizó a las 16:00 del 30 de setiembre, prolongándose por un período total de 1335 minutos (más de 22 horas), que incluyó la prueba de recuperación (véase Gráfico 9-4).

En este caso, la prueba se inició con la toma de datos de la recuperación, en vista que se comenzó apagando la bomba a las 17:45 horas.

El horario de bombeo fue definido por el operador del equipo en función a los requerimientos poblacionales, apagándose la bomba entre las 6:30 a 20:00 horas del 28 de setiembre del 2019 y de 6:30 a 19:30 horas del 29 de setiembre, registrándose la recuperación del nivel dinámico desde las 20:00 horas del 28 de setiembre hasta las 6:30 horas del 29 de setiembre.

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible, sin embargo, este pozo tampoco cuenta con un caudalímetro, por lo que se realizó el cálculo del caudal utilizando un recipiente calibrado (balde), obteniéndose 20 l/s. Se recomienda la instalación de un caudalímetro para futuras pruebas de bombeo a caudal constante.

El nivel estático medido fue de 5.53 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible (ingreso de agua) se encontraba a una profundidad de 25.73 m.

Durante la prueba de bombeo, el máximo descenso observado fue de 0.59 m, y un caudal de bombeo de 20 l/s. De acuerdo con la profundidad de la bomba sumergible instalada, este pozo tiene aún una capacidad de descenso de 17.61 m (véase Gráfico 9-4).

En base a esta prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de $3.7x10^{-2}$ m^2/s (prueba de bombeo) y $3.7x10^{-1}$ m^2/s (prueba de recuperación), tal como se muestra en los Gráfico 9-5 y 9-6. En base a los datos obtenidos del pozo de observación H1-PAL-012 se calculó una transmisividad de $1.7x10^{-2}$ m^2/s (véase Gráfico 9-7).

Gráfico 9-4: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-PAL-011 – Descenso Lineal

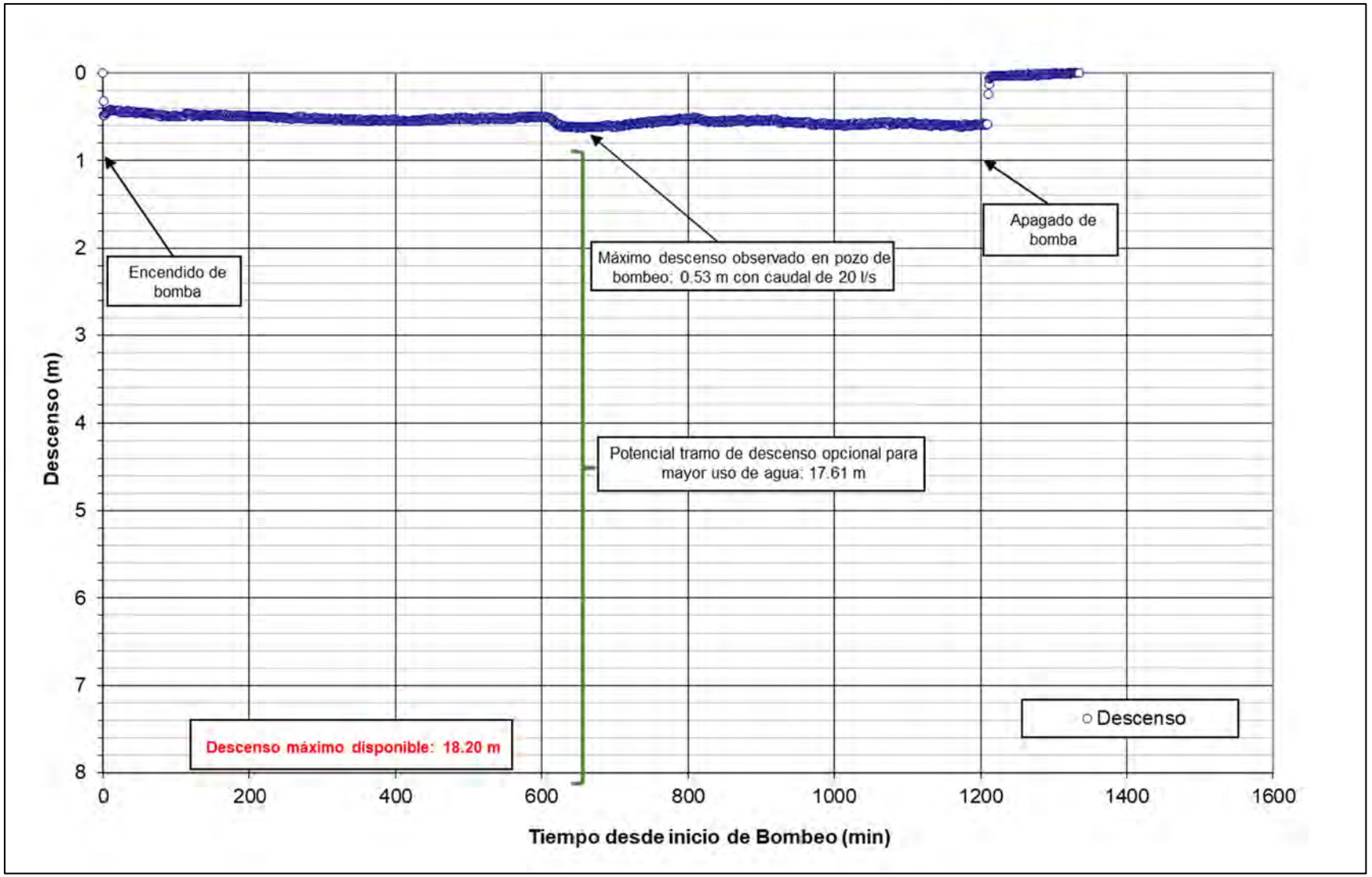


Gráfico 9-5: Prueba de Bombeo a Caudal Constante en Pozo H1-PAL-011

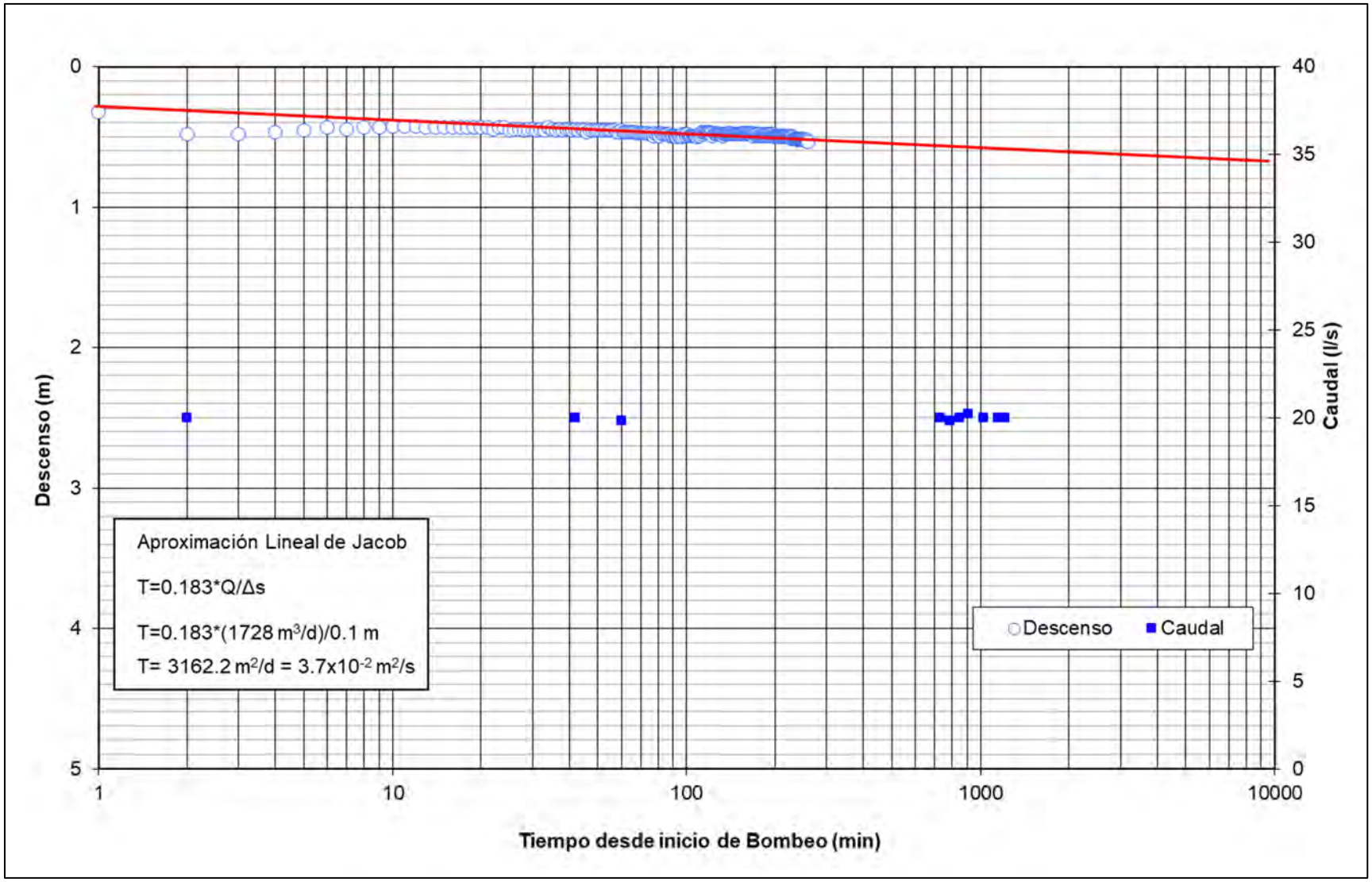


Gráfico 9-6: Prueba de Recuperación en Pozo H1-PAL-011

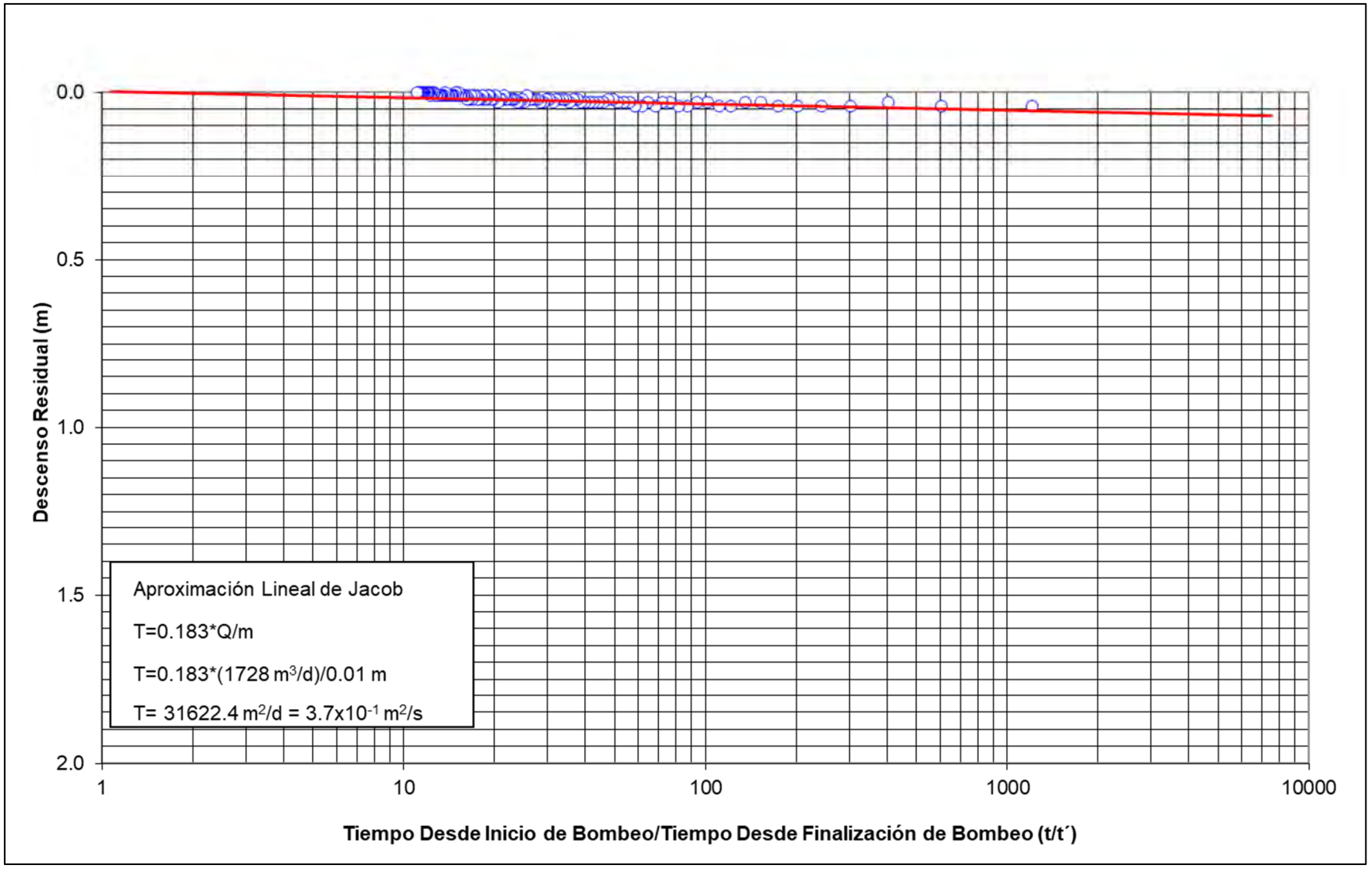
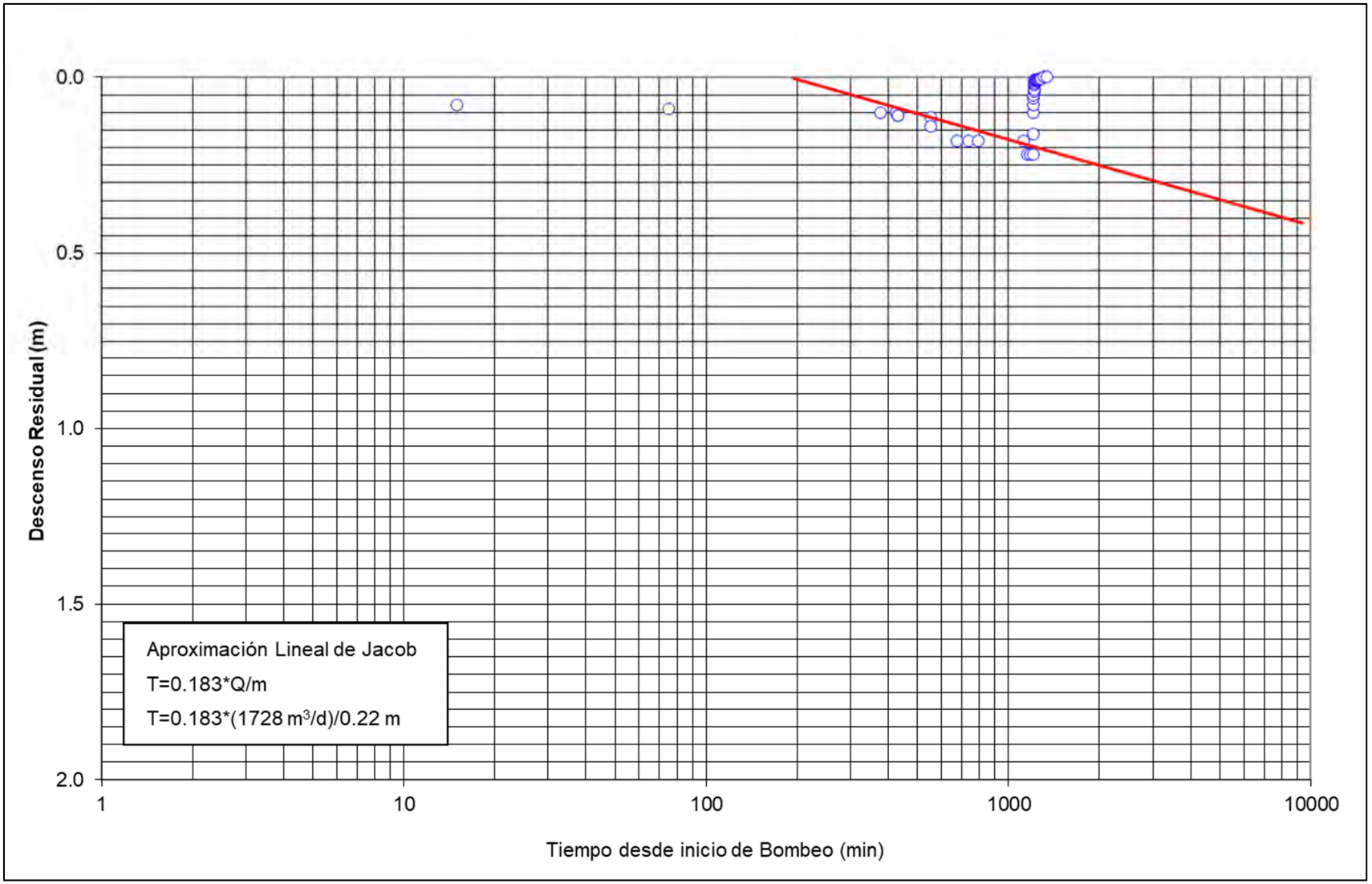


Gráfico 9-7: Prueba de Bombeo en Pozo H1-PAL-011 – Pozo de Observación H1-PAL-012



En la Foto 9-2 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-2: Pozo Palmales- H1-PAL-011 y H1-PAL-012

<table>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Observación – Palmales H1-PAL-012</td><td>Medición manual de niveles dinámicos en pozo de Bombeo H1-PAL-011</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo – Palmales H1-PAL-011</td><td>Vista de Caseta de Control de Pozo de Bombeo H1-PAL-011</td></tr>
</table>

9.4.3 Pozo de Bombeo - Quebrada Seca (H1-QUE-053)

La prueba de bombeo fue realizada en el pozo tubular de agua potable de la localidad de Quebrada Seca. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 590437 m / N 9594901 m y 38 msnm, con código de inventario H1-QUE-053.

A continuación, se presentan las características técnicas del pozo de bombeo.

9.4.3.1 Características del Pozo de Bombeo (H1-QUE-053)

- Diámetro de pozo: 6”
- Nivel estático: 10.95 m bajo superficie

- Profundidad del pozo: 45 m bajo superficie
- Profundidad de la bomba: 40 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 2”
- Caudal de explotación: 2.8 l/s
- Potencia de la bomba: 3 HP
- Marca de la bomba: Franklin Electric

9.4.3.2 Detalles de Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Posterior a la medición del nivel estático en el pozo de bombeo, se procedió con la instalación de un *datalogger* a una profundidad de 25 m, que registró las medidas de nivel de agua de manera automática y continua, y a su vez, se realizó la medición manual con una sonda eléctrica.

Luego de instalado el dispositivo de medición automática, se procedió a realizar la prueba de bombeo, la cual se inició a las 14:02 y finalizó a las 17:44 horas del 27 de setiembre del 2019, prolongándose por un período de 222 minutos (un poco más de 3 horas y media), que incluyó la prueba de recuperación.

El periodo de bombeo fue de 140 minutos (un poco más de 2 horas) debido a la capacidad del reservorio existente (40 m^3) donde se almacenó el agua extraída. Durante este periodo se registró el descenso y posterior recuperación.

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible, sin embargo, el pozo no cuenta con un caudalímetro, por lo que la medición del caudal se realizó con el uso de un recipiente calibrado (balde), obteniéndose 2.8 l/s.

El nivel estático inicial fue de 11.65 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible se encontraba a una profundidad de 40.70 m.

Durante la prueba de bombeo, con un caudal de bombeo de 2.8 l/s, el máximo descenso observado fue de 19.32 m, y en base a la profundidad instalada de la bomba sumergible, este pozo tiene aún un tramo disponible de descenso adicional de 7.73 m (véase Gráfico 9-8).

En base a esta prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de 8.1 x 10^{-5} m^2/s (prueba de bombeo) y 8.2 x 10^{-5} m^2/s (prueba de recuperación), tal como se presenta en el Gráfico 9-9 y Gráfico 9-10.

.

Gráfico 9-8: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-QUE-053 - Descenso Lineal

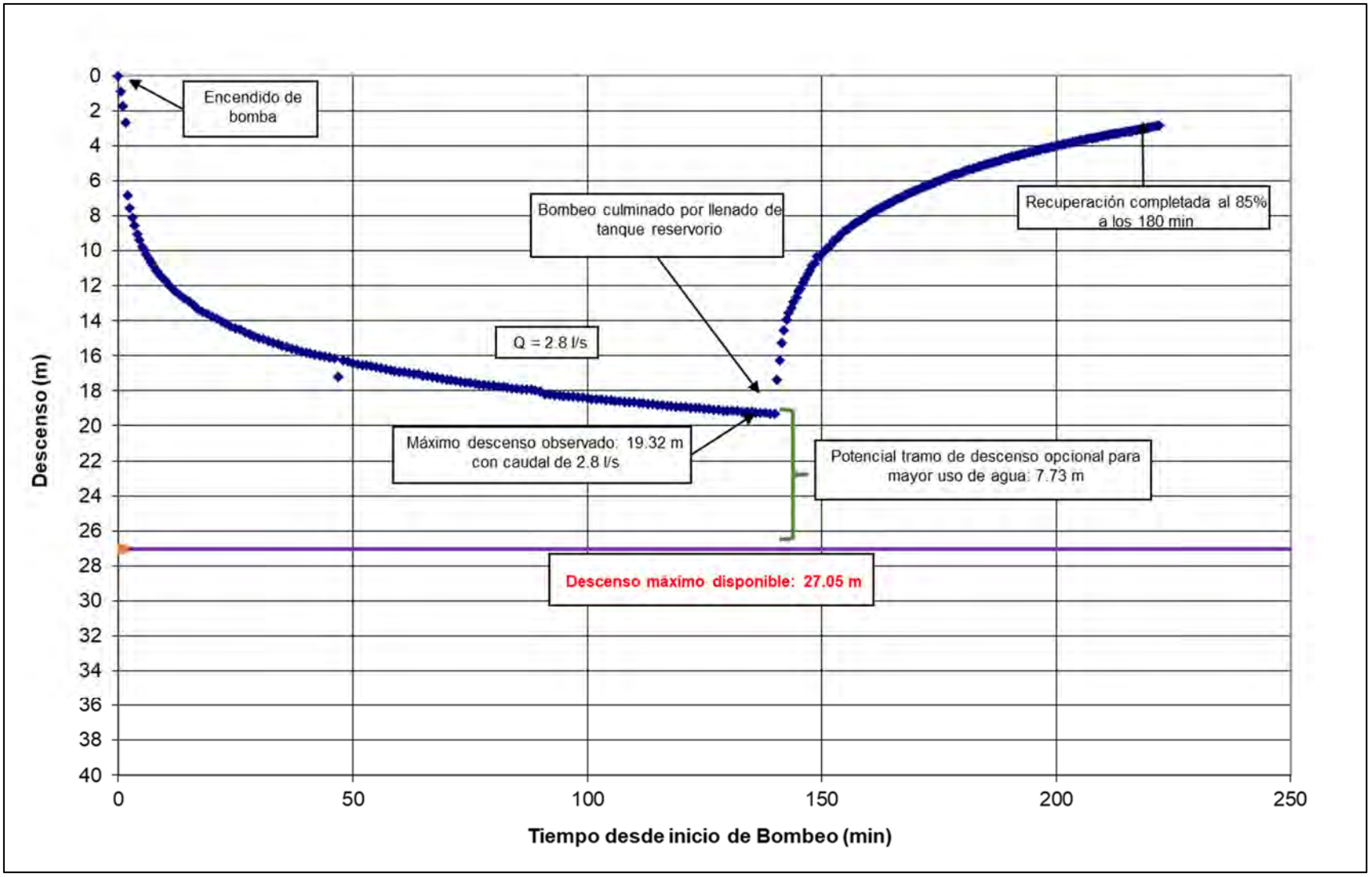


Gráfico 9-9: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-QUE-053

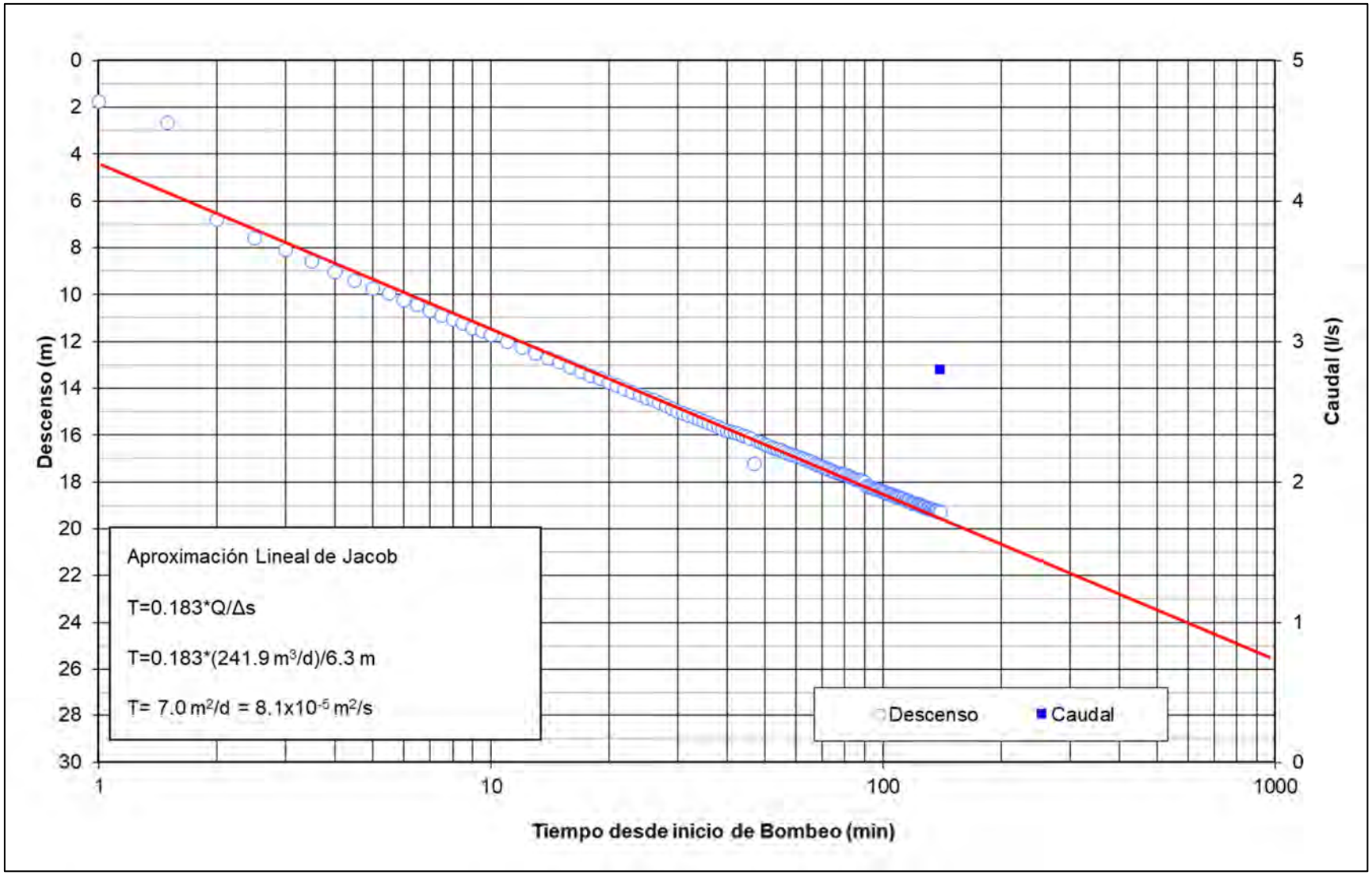
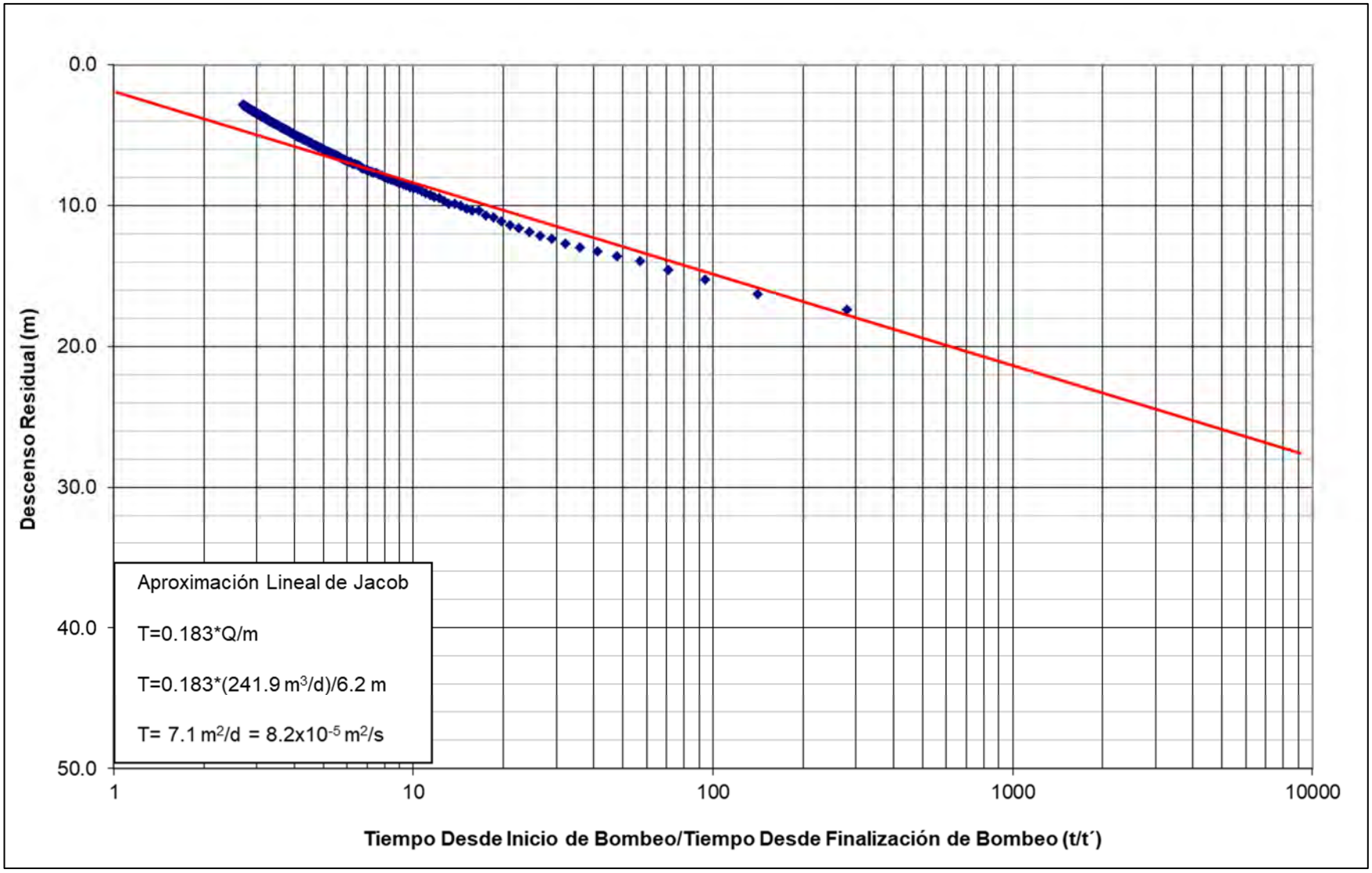
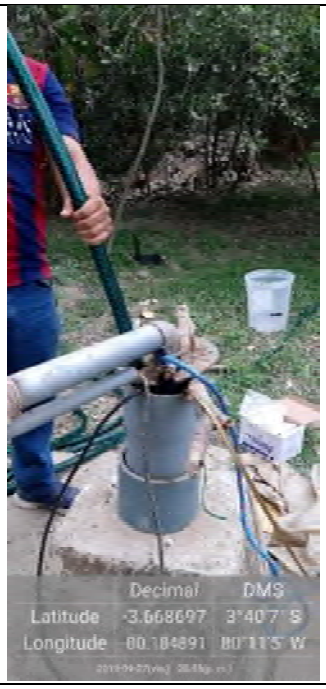


Gráfico 9-10: Prueba de Recuperación en Pozo H1-QUE-053



En la Foto 9-3 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-3: Pozo Quebrada Seca - H1-QUE-053

<table>
<tr><td>
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo – Quebrada Seca</td><td>Vista de Pozo de Bombeo – Quebrada Seca</td></tr>
<tr><td>
</td><td> </td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo – Quebrada Seca</td><td>Medición manual de niveles dinámicos en pozo de Bombeo H1-QUE-053</td></tr>
</table>

9.4.4 Pozo de Bombeo - Chacras (H2-CHA-170)

La prueba de bombeo fue realizada en el pozo tubular de agua potable de la localidad de Chacras, Parroquia de Chacras. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 588794 m / N 9607698 m y 28 msnm, con código de inventario H2-CHA-170.

9.4.4.1 Pozo de Bombeo

- Diámetro de pozo: 10”
- Nivel estático: 8.38 mbpr
- Profundidad del pozo: 126 mbpr
- Profundidad de la bomba: 66 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 4”
- Caudal de explotación: 5.2 l/s
- Potencia de la bomba: 4 HP
- Tipo/Marca de la bomba: Sumergible / Franklin Electric
- *Stick up*: 0.50 m

9.4.4.2 Detalles de la Prueba de Bombeo

Posterior a la medición del nivel dinámico en el pozo de bombeo H2-CHA-170, se instaló una manguera de PVC de 1.5” como medida de protección del dispositivo de medición automática *levelogger*, para lo cual se realizaron maniobras con la autorización de la Pdta. GAD Parroquia de Palmales – Tatiana Mora, y el operador del pozo de bombeo.

La lectura de la prueba de bombeo inició el 28 de setiembre del 2019 a las 19:00 horas, y culminó a las 14:30 del 29 de setiembre, prolongándose por un período total de 1170 minutos (19 horas y media), que incluyó la prueba de recuperación (véase Gráfico 9-11).

El horario de apagado y encendido de la bomba fue coordinado con el operador del equipo, en función a los requerimientos poblacionales del sector; por lo que el apagado de la bomba se realizó a las 20:00 horas del 28 hasta las 6:30 horas del 29 de setiembre.

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible, con un caudal de 5.2 l/s, calculado con un recipiente calibrado (balde).

En base a esta prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de 4.8 x 10^{-4} m^2/s (prueba de bombeo) y 7.3 x 10^{-4} m^2/s (prueba de recuperación), tal como se muestra en los Gráficos 9-12 y 9-13.

.

Gráfico 9-11: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-170 - Descenso Lineal

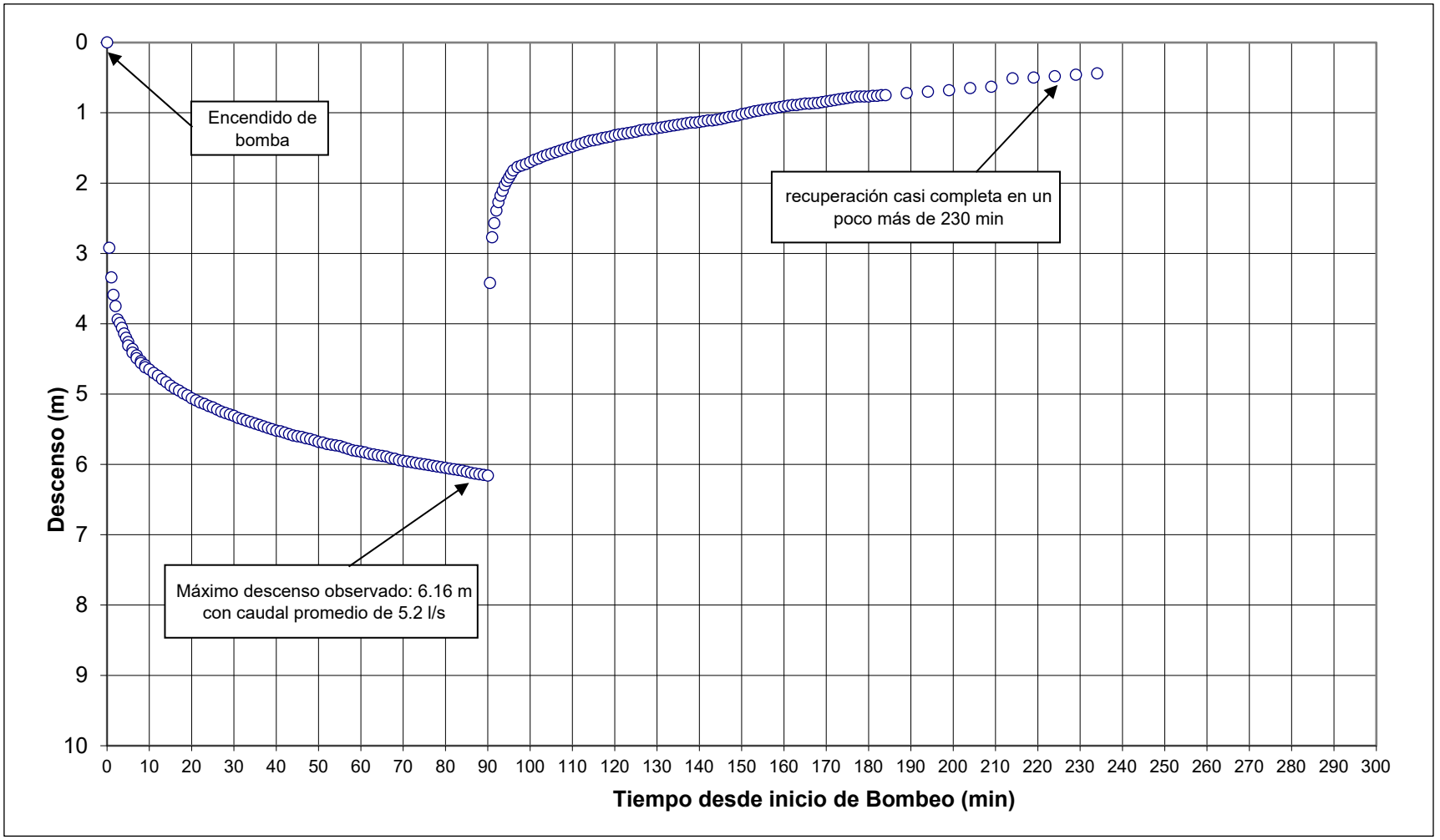


Gráfico 9-12: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-CHA-170

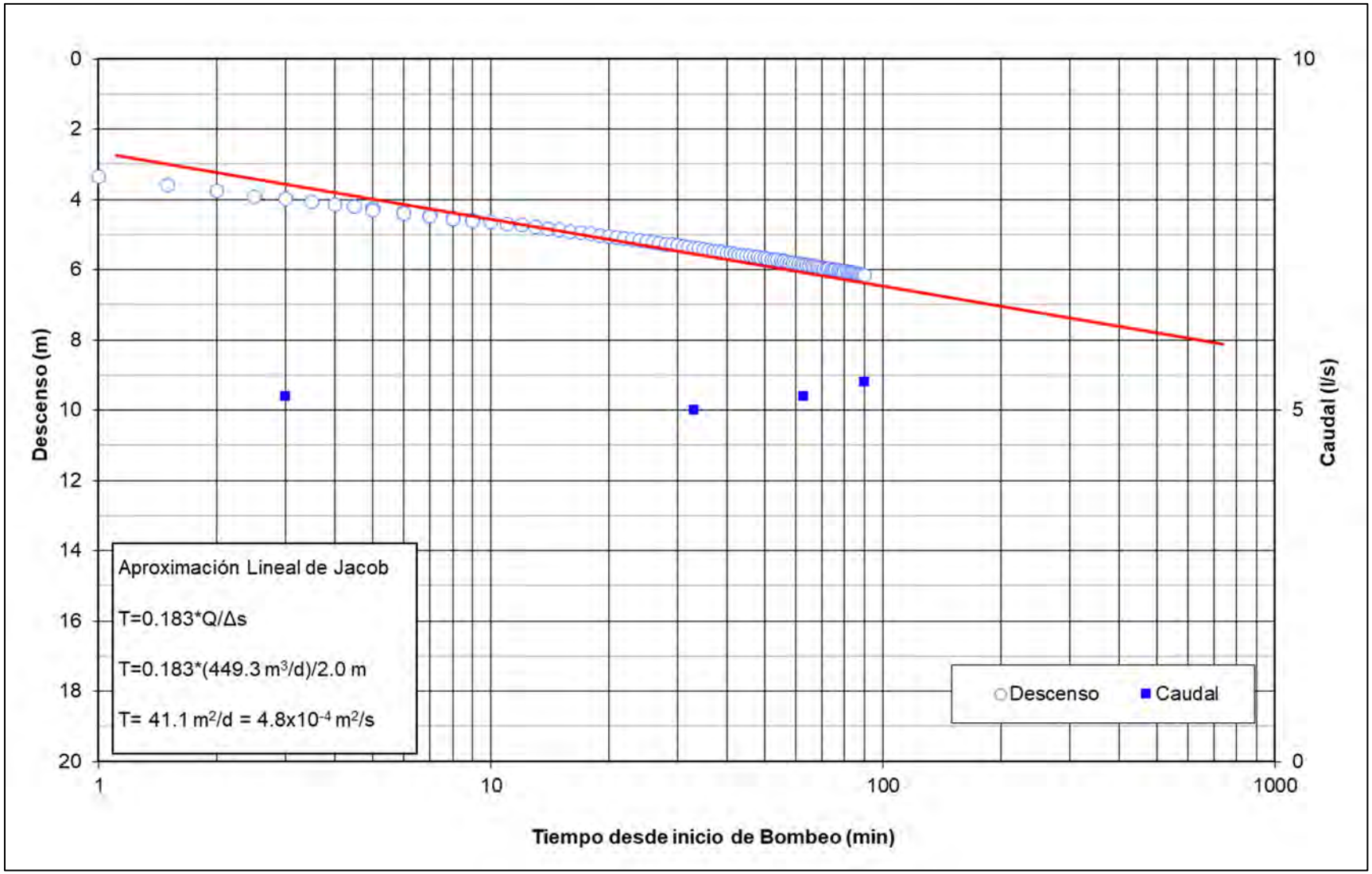
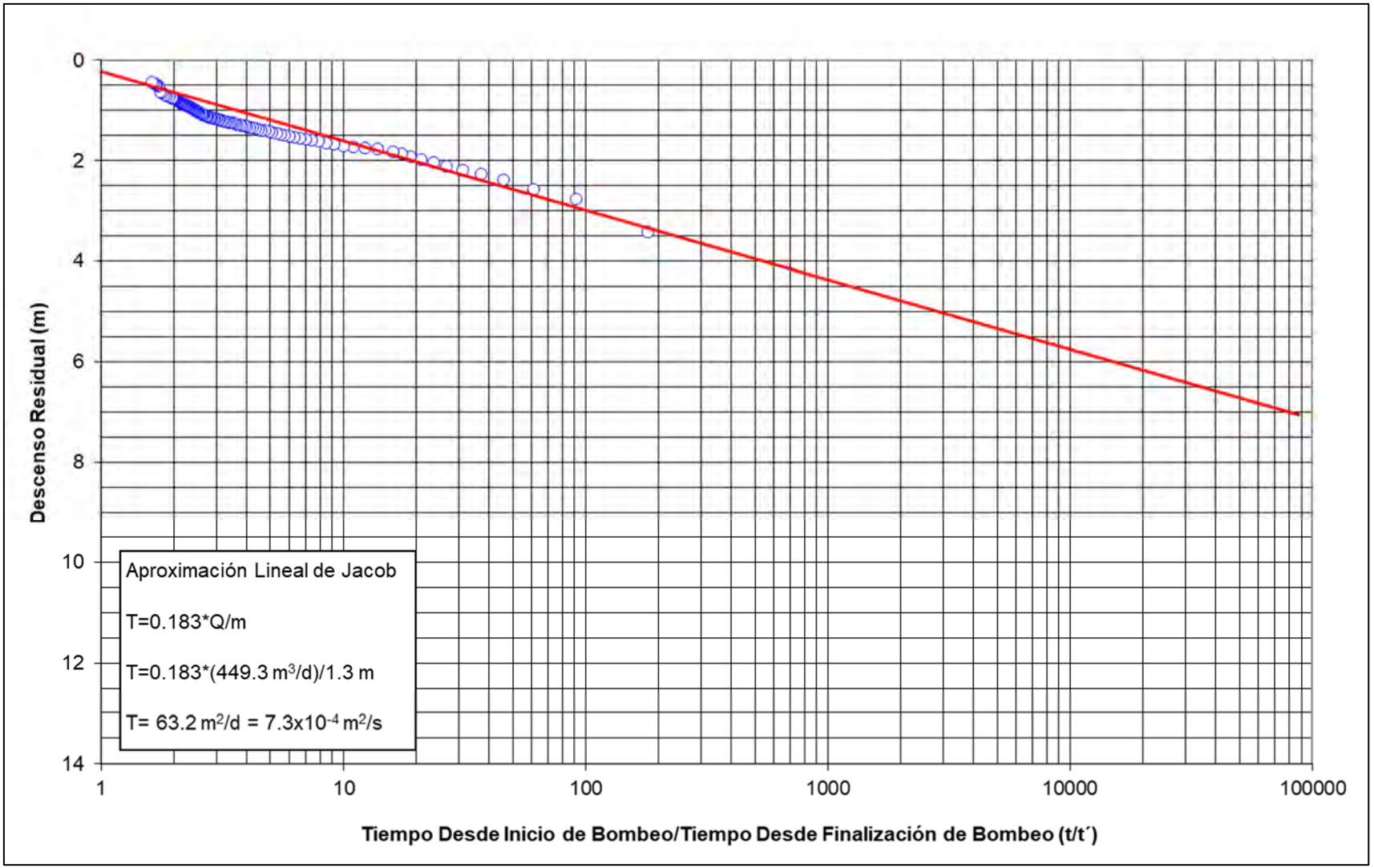


Gráfico 9-13: Prueba de Recuperación en Pozo H1-CHA-170



En la Foto 9-4 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-4: Pozo Chacras H2-CHA-170

Vista de Pozo de Bombeo – Chacras H2-CHA-170	Vista de cobertura metálica cubriendo acceso de Pozo de Bombeo – Chacras
Vista de maniobras para apertura de cobertura metálica de Pozo H2-CHA-170	Ingreso de sonda eléctrica en pozo de Bombeo H2-CHA-170

9.4.5 Pozo de Bombeo – Huaquillas (H2-HUA-250)

La prueba de bombeo fue realizada en el pozo tubular de agua potable PH N°5 de la localidad de Huaquillas, administrado por la Empresa Municipal Regional de Agua Potable Arenillas, Huaquillas – EMRAPAH Huaquillas. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 585111 m / N 9615003 m y 15 msnm, con código de inventario H2-HUA-250.

A continuación, se exponen las características técnicas del pozo de bombeo.

9.4.5.1 Características del Pozo de Bombeo

- Diámetro de pozo: 10”
- Nivel dinámico: 19.82 mbpr
- Profundidad del pozo: 183.60 mbpr
- Profundidad de la bomba: 54 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 4”
- Caudal de explotación: 22 l/s
- Potencia de la bomba: 30 HP
- Tipo / Marca de la bomba: Sumergible / Pedrollo

9.4.5.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Posterior a la medición del nivel estático en el pozo de bombeo, se instaló una manguera de PVC de 1.5” como medida de protección del dispositivo de medición automática *datalogger* y de la sonda eléctrica de medición manual.

La prueba de bombeo inició el 02 de octubre a las 11:00 horas y finalizó a las 16:00 del mismo día, prolongándose por un período total de 300 minutos (5 horas), que incluyó la prueba de recuperación.

El horario de bombeo fue definido por el operador del equipo en función a los requerimientos poblacionales, siendo apagada entre las 11:05 a 14:00 horas, registrándose la recuperación del nivel dinámico en este periodo de tiempo.

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible, realizándose el monitoreo continuo del mismo mediante el cálculo con un recipiente calibrado (balde), siendo de 22 l/s.

El nivel estático medido fue de 16.10 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible se encontraba a una profundidad de 54.60 m.

Teniendo en cuenta que, durante la prueba de bombeo a un caudal de 22 l/s, el máximo descenso observado fue de 3.72 m, este pozo aún tiene una capacidad de descenso adicional de 32.78 m (véase Gráfico 9-14).

En base a la prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de $4.6x10^{-3}$ m^2/s (prueba de bombeo) y $1.7x10^{-3}$ m^2/s (prueba de recuperación), mostrados en el Gráfico 9-14 y Gráfico 9-15.

Gráfico 9-14: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo Huaquillas H2-HUA-250 – Descenso Lineal

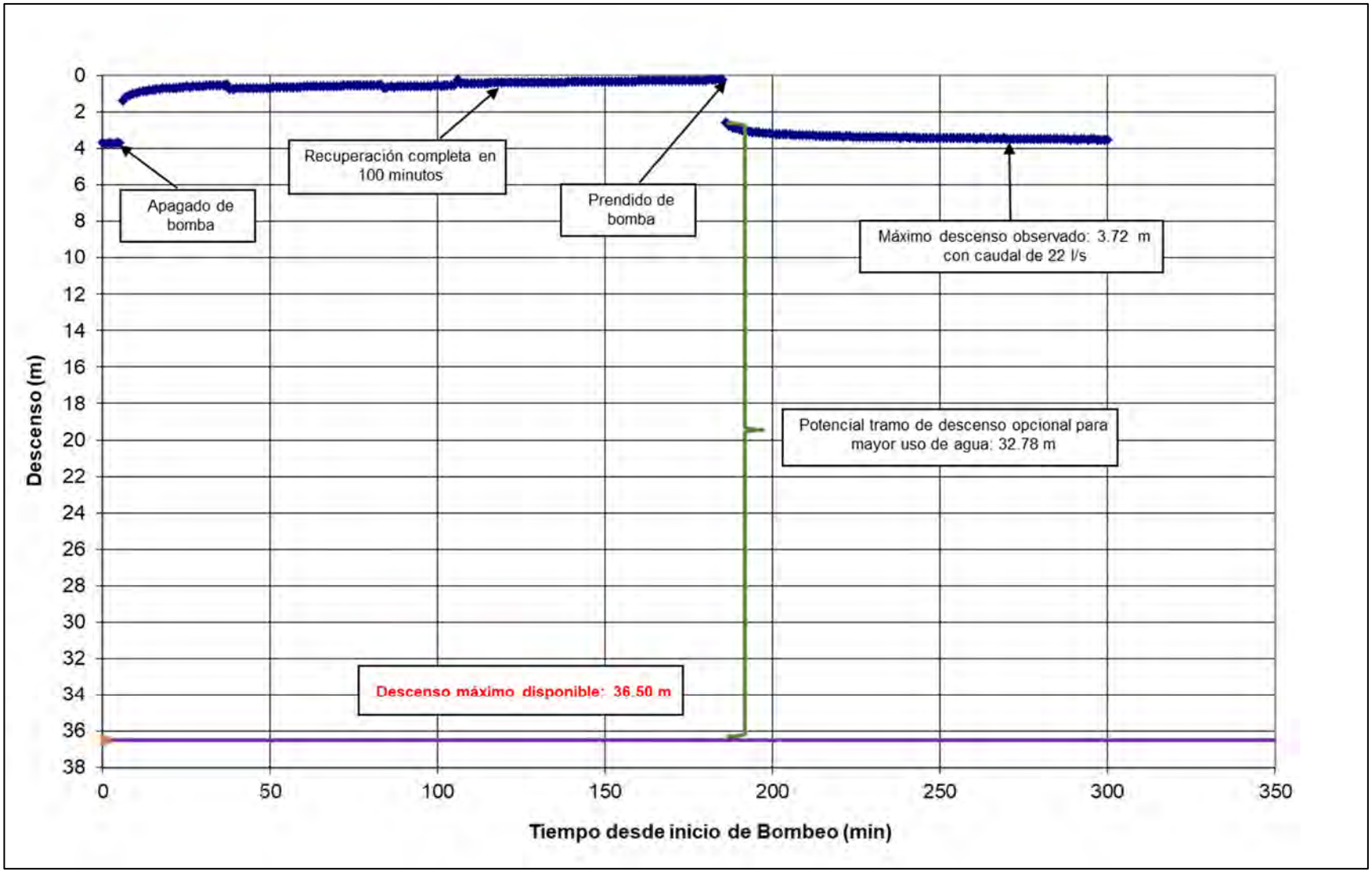


Gráfico 9-15: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo Huaquillas H2-HUA-250

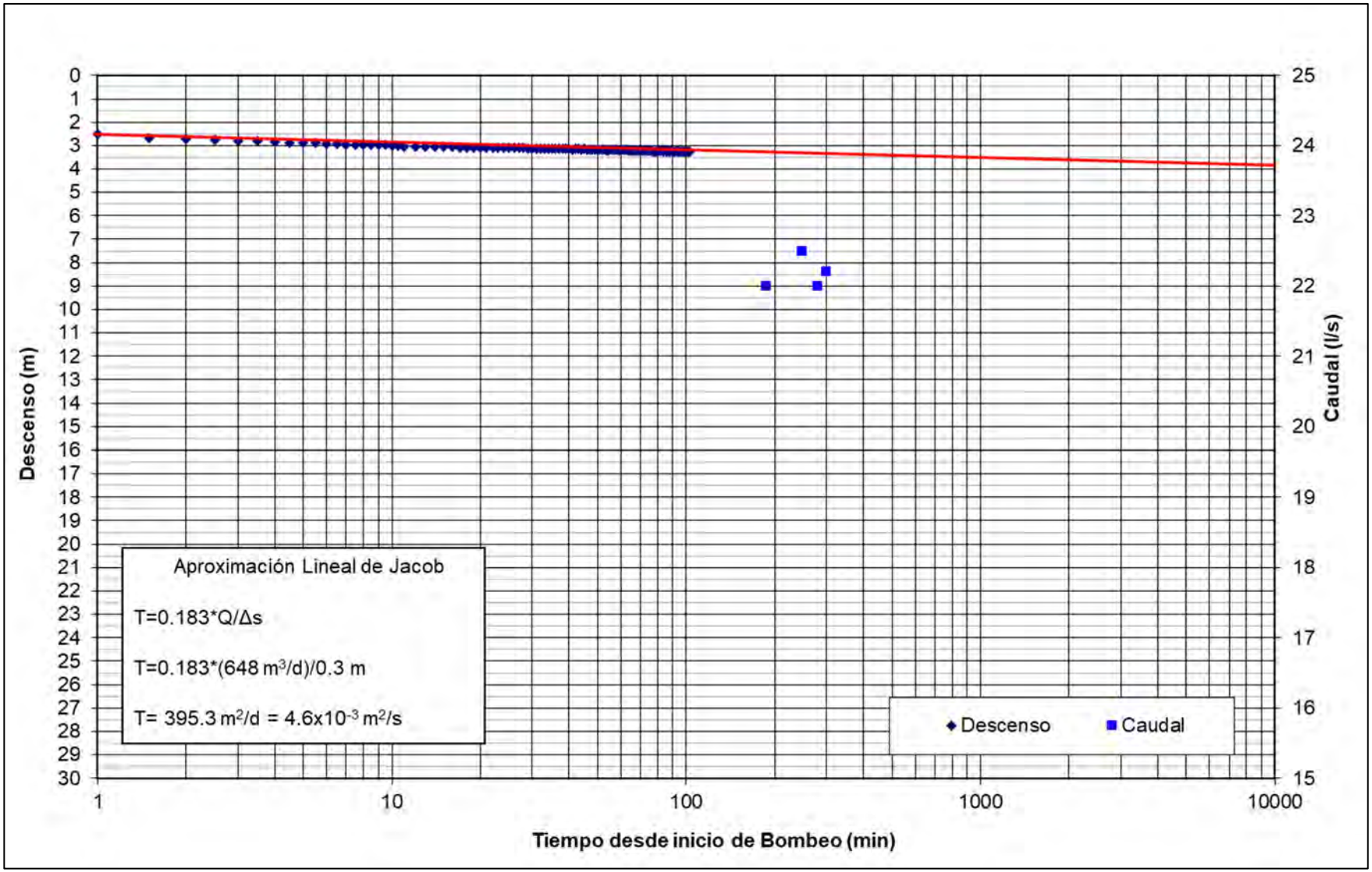
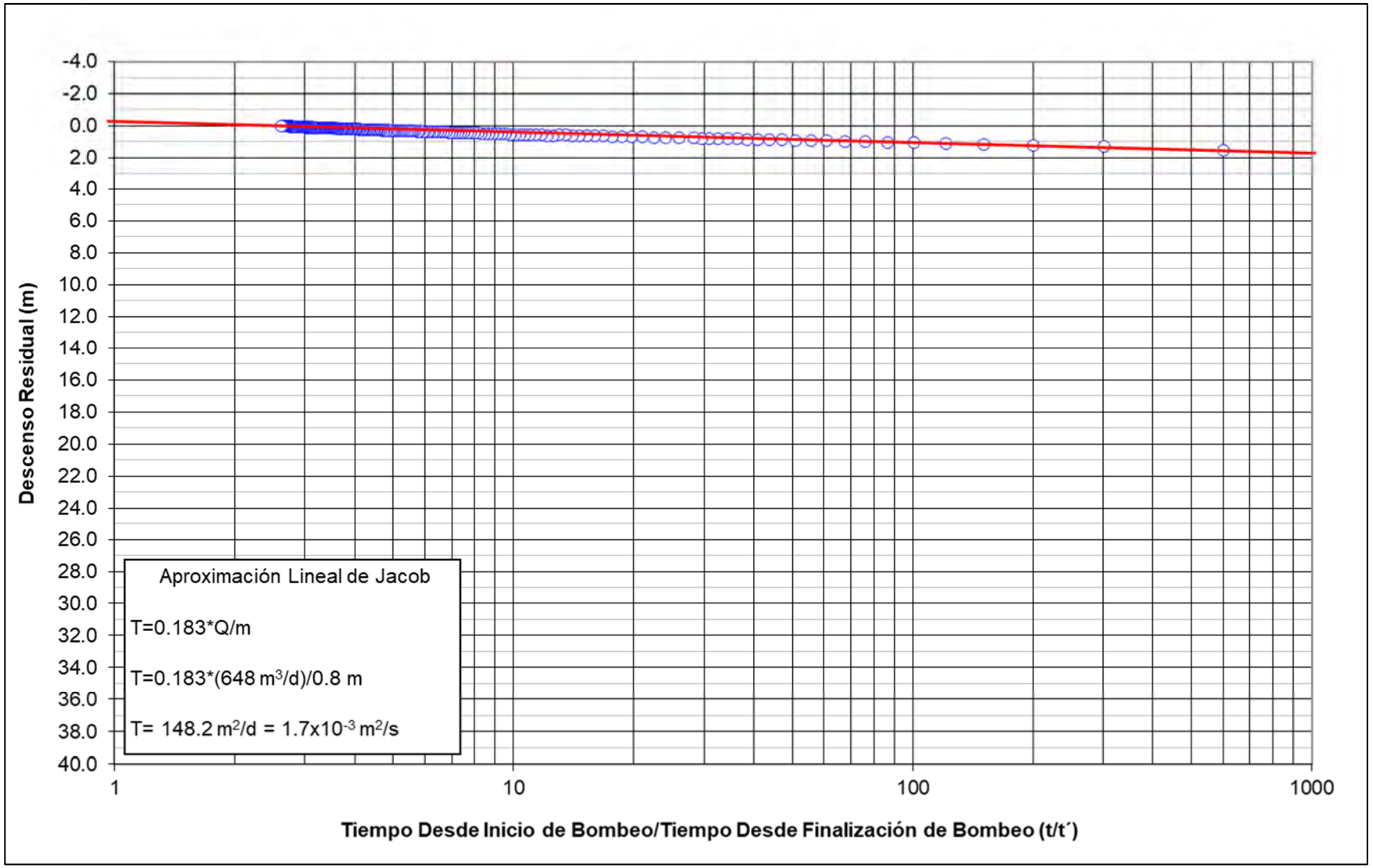
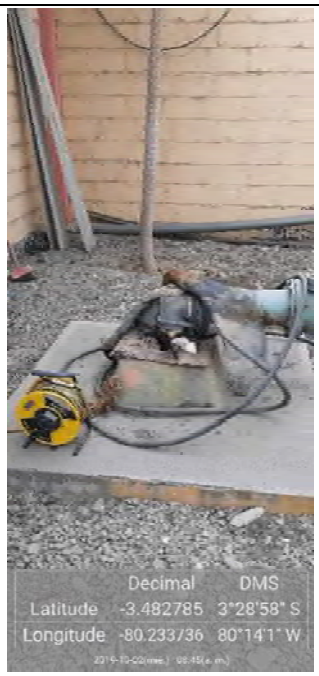
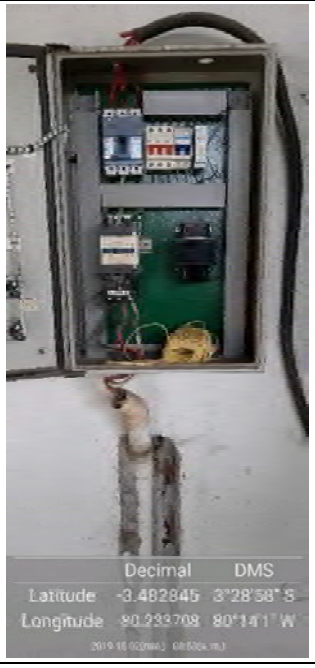


Gráfico 9-16: Prueba de Recuperación en Pozo H2-HUA-250



En la Foto 9-5 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-5: Pozo Huaquillas - H2-HUA-250

<table>
<tr><td> 
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo – Huaquillas</td><td>Vista de Pozo de Bombeo – Huaquillas</td></tr>
<tr><td>
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo – Huaquillas</td><td>Vista de Pozo de Bombeo – Huaquillas</td></tr>
</table>

9.4.6 Pozo de Bombeo – Papayal (H1-PPY-325)

La prueba de bombeo fue realizada en el pozo tubular de uso agrícola ubicado en la localidad de Papayal, sector El Pasayo. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 581795 m / N 9607016 m y 35 msnm, con código de inventario H1-PPY-325.

La boca del pozo de bombeo permite el ingreso de la tubería con el dispositivo *datalogger*, sin mayores complicaciones.

A continuación, se exponen las características técnicas del pozo de bombeo.

9.4.6.1 Características del Pozo de Bombeo (H1-PPY-325)

- Diámetro de pozo: 8”
- Nivel estático: 30.70 mbpr
- Profundidad del pozo: 80.20 mbpr
- Profundidad de la bomba: 45 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 2”
- Caudal de explotación: 7.5 l/s
- Potencia de la bomba: 25 HP
- Tipo de bomba: Sumergible / Pedrollo
- *Stick* up: 0.20 m

9.4.6.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Inicialmente, se realizó la medición del nivel estático en el pozo de bombeo, para posteriormente proceder con la instalación de un *datalogger* hasta una profundidad de 40 m, el cual fue programado para registrar las variaciones de nivel de agua cada minuto.

La prueba de bombeo se realizó el 30 de setiembre del 2019, con un caudal de 7.5 l/s, con la finalidad de determinar las características hidrodinámicas del pozo, y ésta se prolongó por un período de 1110 minutos (18 horas y media), finalizando el 01 de octubre a las 12:00 horas.

Durante la prueba, la bomba fue encendida a las 19:44 horas del 30 de setiembre, permaneciendo prendida hasta las 02:18 horas del día siguiente, permitiendo registrar la rápida estabilización del nivel dinámico.

Posteriormente, se apagó la bomba a partir de las 02:19 horas del 01 de octubre hasta culminar la prueba, permitiendo registrar la recuperación del nivel por un periodo de aproximado de 600 minutos (10 horas), (véase Gráfico 9-17).

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible. Este pozo no cuenta con un caudalímetro, por lo que el mismo se calculó utilizando un recipiente calibrado (balde), obteniéndose un caudal de 7.5 l/s. Se recomienda su instalación para próximas pruebas de bombeo.

El nivel estático inicial fue de 30.70 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible se encontraba a una profundidad de 45.20 m. Teniendo en cuenta que durante la prueba de bombeo, con un caudal de bombeo de 7.5 l/s, el máximo descenso observado fue de 2.23 m, este pozo tiene aún un tramo disponible de descenso adicional de 10.27 m (véase Gráfico 9-17).

En base a esta prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de 6.9 x 10^{-3} m^2/s (prueba de bombeo) y 1.7 x 10^{-3} m^2/s (prueba de recuperación), tal como se muestran en los Gráficos 9-18 y 9-19.

Gráfico 9-17: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-PPY-325 - Descenso Lineal

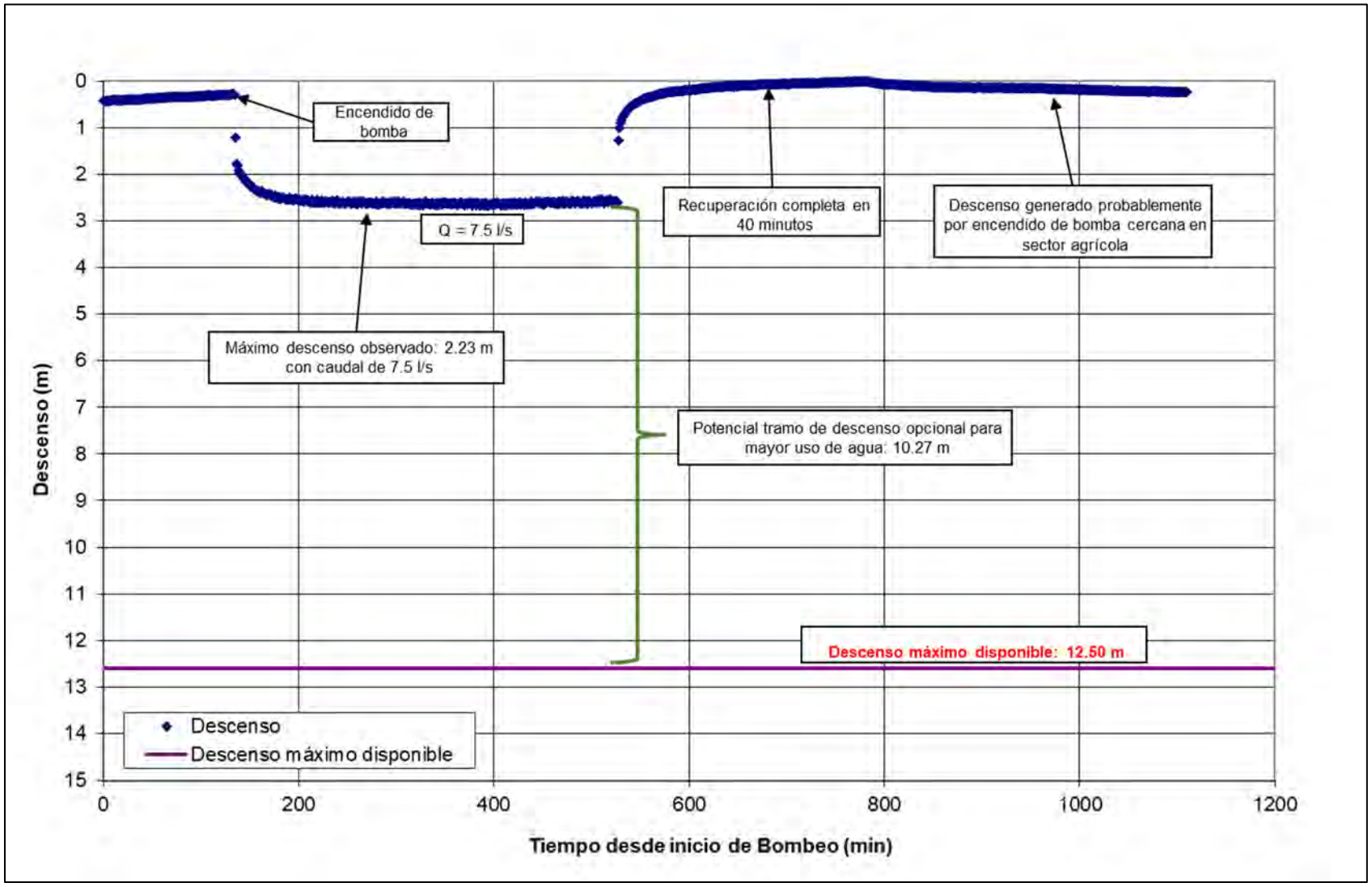


Gráfico 9-18: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-PPY-325

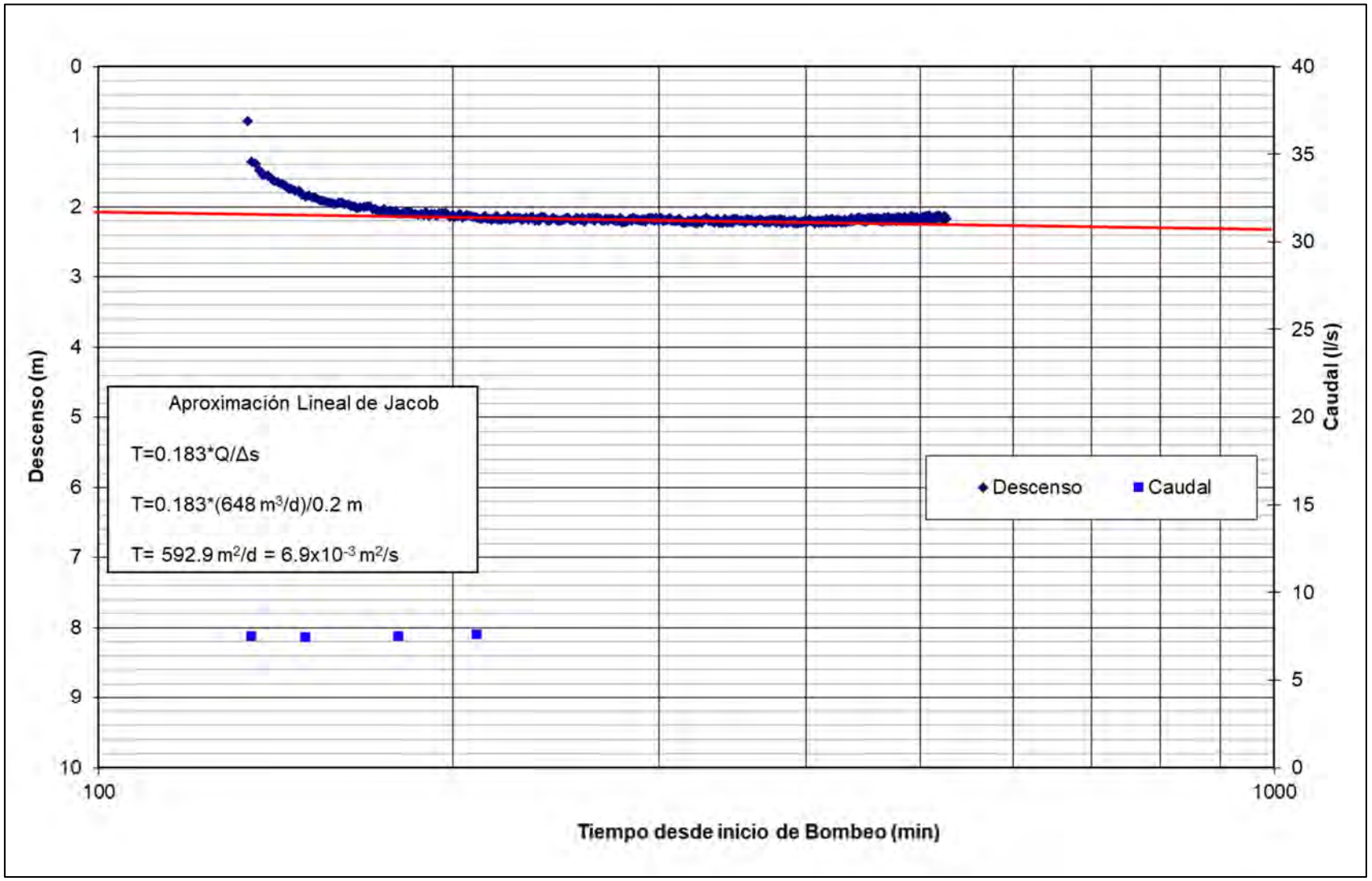
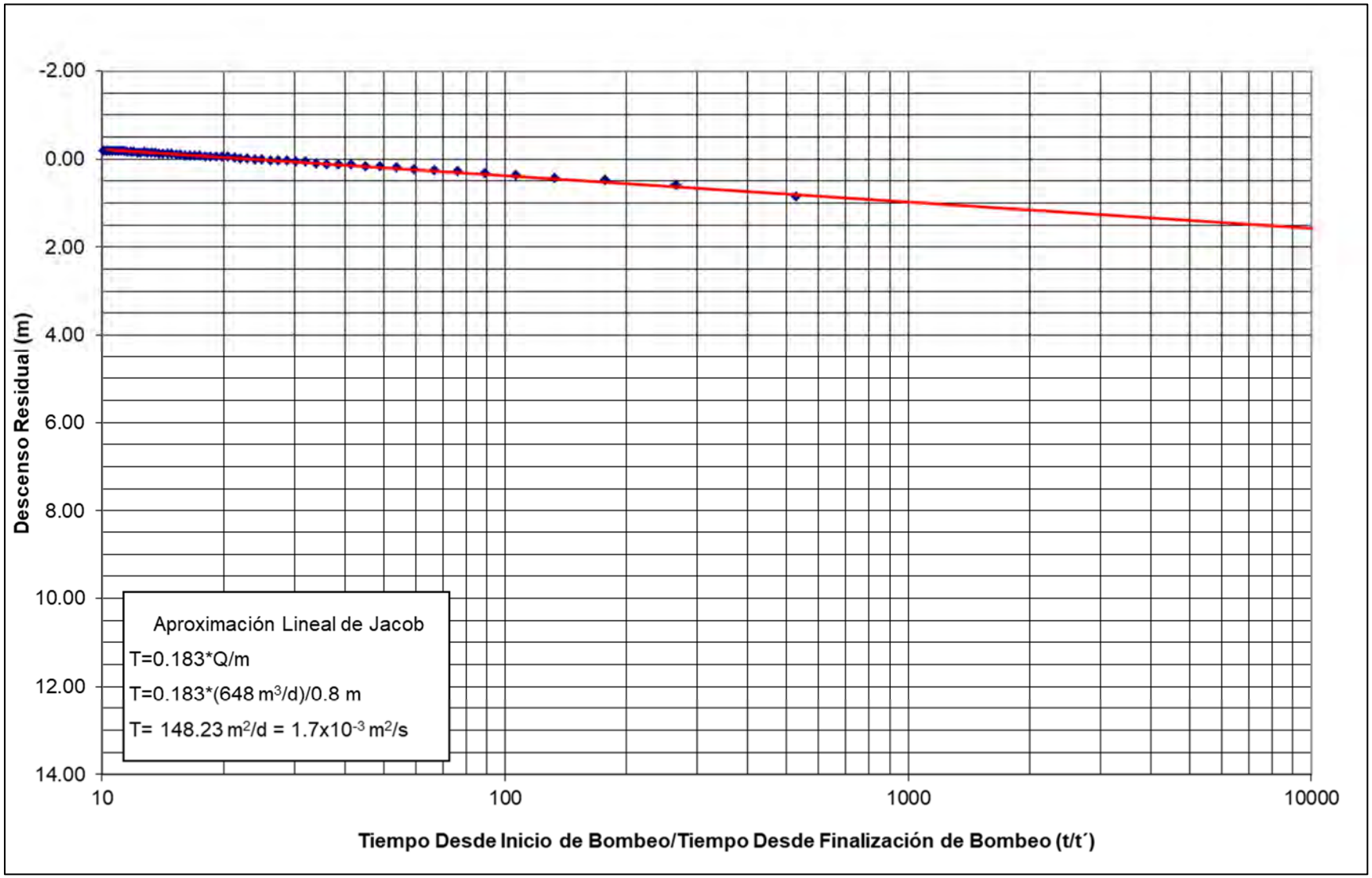


Gráfico 9-19: Prueba de Recuperación en Pozo H1-PPY-325



En la Foto 9-6 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-6: Pozo Papayal - H1-PPY-325

Vista de Pozo de Bombeo – Papayal H1-PPY-325	Vista más cercana de Pozo de Bombeo – Papayal H1-PPY-325
Vista de ingreso de dispositivo en pozo de Bombeo - Papayal	Vista de filtrado de muestra para análisis de calidad de agua - Papayal

9.4.7 Pozo de Bombeo - Zarumilla (H1-ZAR-327)

La prueba de bombeo fue realizada en el pozo tubular de agua potable N° 4-8 de la localidad de Zarumilla, administrado por el Organismo Técnico de la Administración de los Servicios de

Saneamiento - OTASS. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 580208 m / N 9612465 m y 11 msnm, con código de inventario H1-ZAR-327.

A continuación, se exponen las características técnicas del pozo de bombeo.

9.4.7.1 Características del Pozo de Bombeo

- Diámetro de pozo: 10”
- Nivel estático: 19 mbpr
- Profundidad del pozo: 120 mbpr
- Profundidad de la bomba: 45 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 6”
- Caudal de explotación: 39 l/s
- Potencia de la bomba: 75 HP
- Marca de la bomba: Franklin Electric
- *Stick up*:0.23 m

9.4.7.2 Detalles de la Prueba de Bombeo

Posterior a la medición del nivel estático en el pozo de bombeo, se instaló una manguera de PVC de 1.5” como medida de protección del dispositivo de medición automática *levelogger*, hasta una profundidad de 40 m.

La prueba de bombeo se inició a las 10:00 horas del 01 de octubre del 2019 y finalizó a las 7:15 del día siguiente, prolongándose por un período total de 1 275 minutos (un poco más de 21horas), que incluyó la prueba de recuperación (véase Gráfico 9-20).

El horario de bombeo fue definido por la autorización del personal encargado (administrador) del OTASS, en función a los requerimientos poblacionales, siendo apagada entre las 10:30 y 13:00 horas del 01 de octubre.

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible. Este pozo cuenta con un caudalímetro digital instalado, permitiendo el monitoreo continuo del mismo, siendo de 39 l/s.

El nivel estático inicial fue de 19 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible se encontraba a una profundidad de 45.23 m. Teniendo en cuenta que durante la prueba de bombeo, con un caudal de bombeo de 39 l/s, el máximo descenso observado fue de 19.60 m, este pozo tiene aún un tramo disponible de descenso adicional de 4.63 m (Gráfico 9-20).

En base a esta prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de $7.1x10^{-3}$ m^2/s (prueba de bombeo) y $4.7x10^{-3}$ m^2/s (prueba de recuperación), tal como se muestra en los Gráficos 9-21 y 9-22.

Gráfico 9-20: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-ZAR-327 – Descenso Lineal

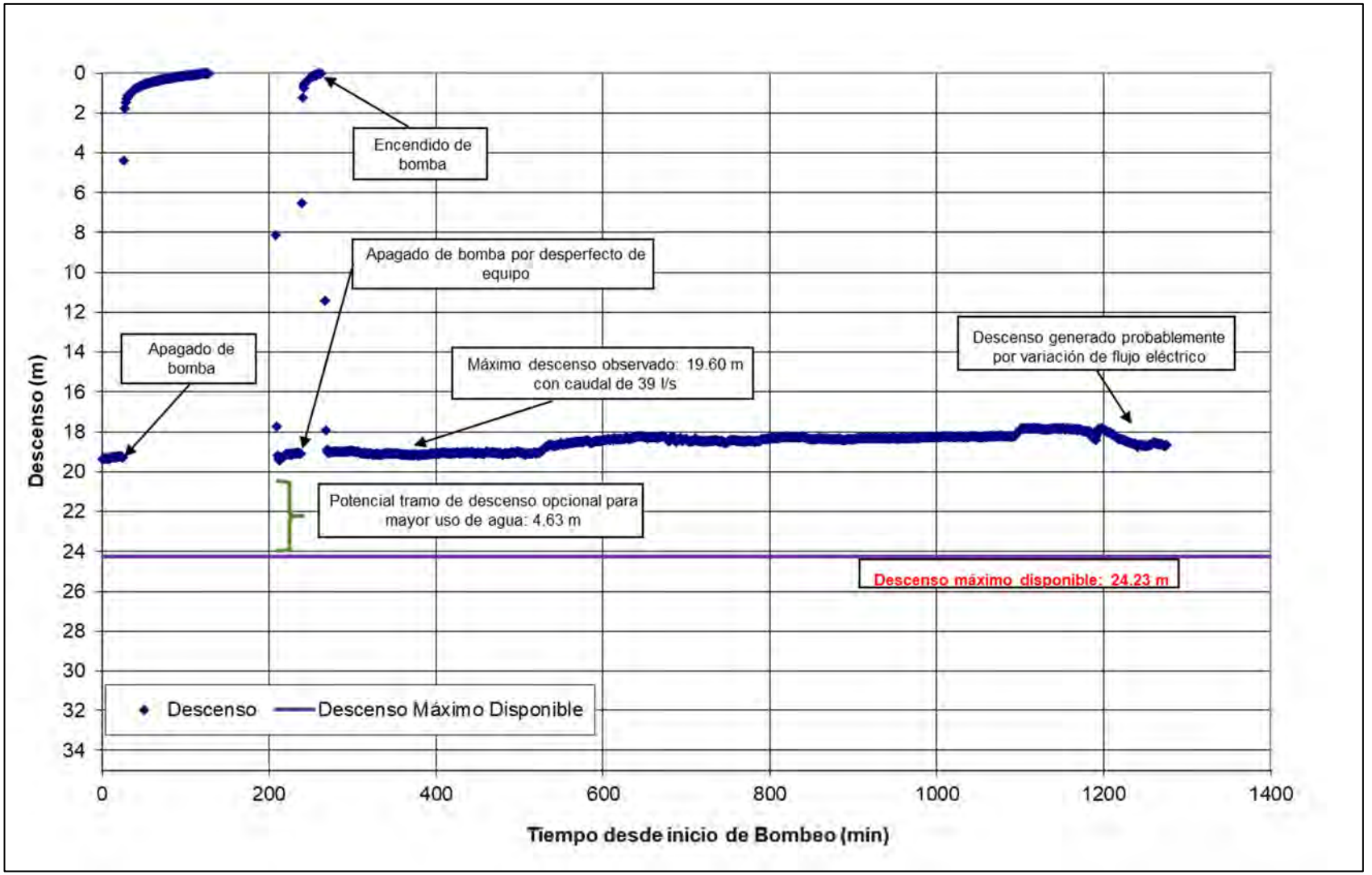


Gráfico 9-21: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H1-ZAR-327

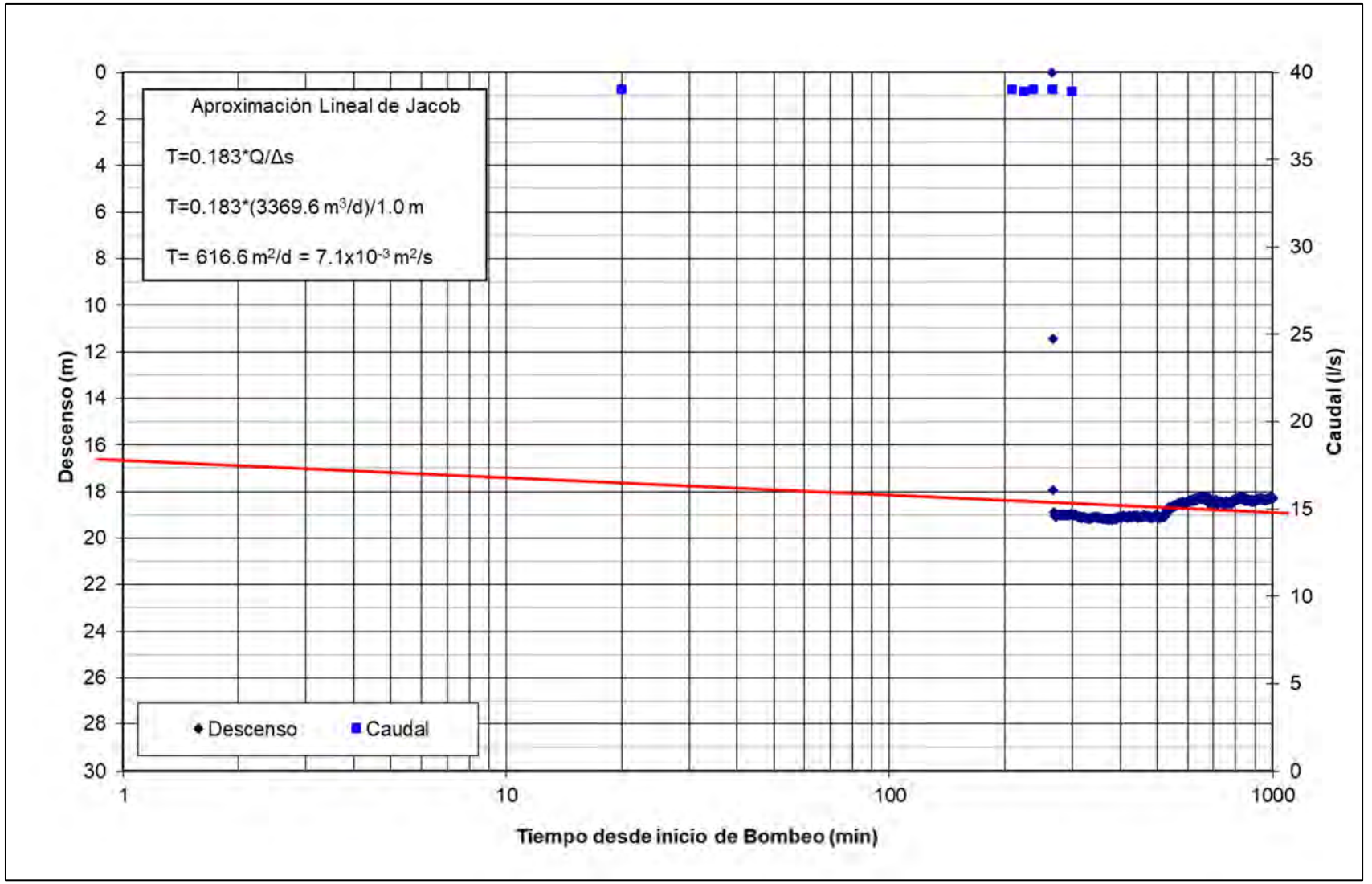
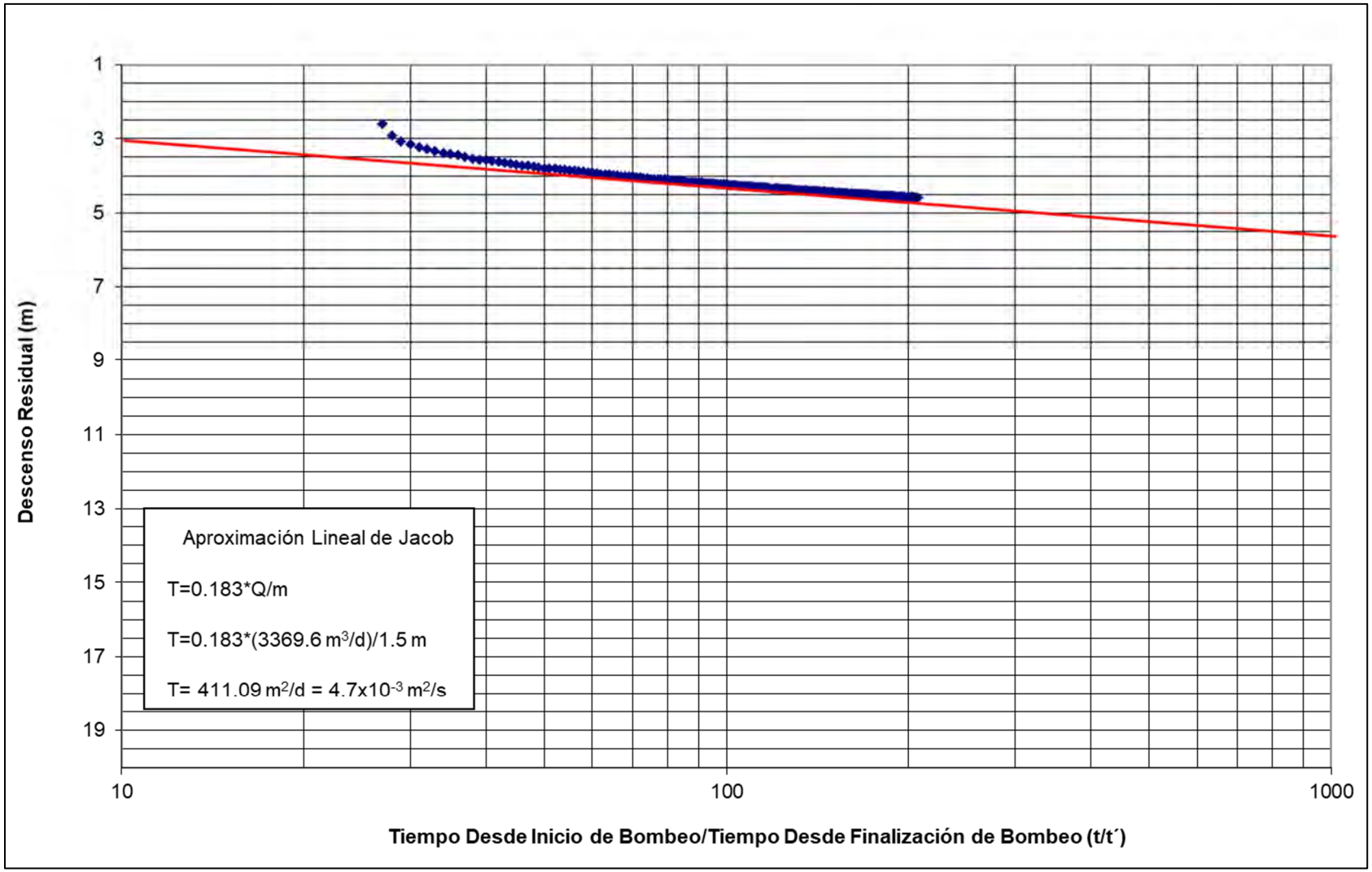


Gráfico 9-22: Prueba de Recuperación en Pozo H1-ZAR-327



En la Foto 9-7 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-7: Pozo Zarumilla - H1-ZAR-327

Vista de Pozo de Bombeo N°4-8 Zarumilla H1-ZAR-327	Vista más cercana de Pozo de Bombeo N°4-8 Zarumilla H1-ZAR-327
Programación de *Levelogger* en Pozo de Bombeo H1-ZAR-327	Caudalímetro digital de Pozo de Bombeo H1-ZAR-327

9.4.8 Pozo de Bombeo – Tutumo (H3-MAT-014)

La prueba de bombeo fue ejecutada en el pozo tubular de agua potable el cual abastece a las localidades de Tutumo y Nuevo Progreso, a través de un tanque elevado. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 582470 m / N 9591446 m y 95 msnm, con código de inventario H3-MAT-014.

La boca del pozo de bombeo permite el ingreso de la tubería con el dispositivo *levelogger*; sin embargo, las uniones entre los tubos de la bomba (cada 3 m de longitud), no permitieron el ingreso de la tubería a una profundidad mayor a 6 m; por lo cual se procedió a realizar las mediciones únicamente en el pozo de observación de coordenadas UTM (WGS 84, zona 17s): E 582483 m / N 9591427 m y 95 msnm, ubicado a una distancia aproximada de 12 m, con código de inventario H3-MAT-016. A continuación, se exponen las características técnicas del pozo de bombeo y del pozo de observación.

9.4.8.1 Características del Pozo de Bombeo (H3-MAT-014)

- Diámetro de pozo: 10”
- Nivel estático: 2.16 mbpr
- Profundidad del pozo: 65.15 mbpr
- Profundidad de la bomba: 42 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 4”
- Caudal de explotación: 18.5 l/s
- Potencia de la bomba: 75 HP
- Tipo de bomba: Sumergible / Franklin Electric
- *Stick up*: 1.43 m

9.4.8.2 Características del Pozo de Observación (H3-MAT-016)

- Diámetro de pozo: 8”
- Nivel estático: 1.29 mbpr
- Profundidad del pozo: 65.55 mbpr
- Diámetro de bomba sumergible: sin equipo
- Profundidad de la bomba: sin equipo
- Caudal de explotación: -
- *Stick up*: 0.55 m

9.4.8.3 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Inicialmente, se realizó a la medición del nivel estático en el pozo de bombeo y de observación; posteriormente se procedió con la instalación de un *levelogger* en el pozo de observación H3-MAT-016 ubicado a una distancia de 12 m del pozo de bombeo, el cual registró las medidas de nivel de agua de manera automática y continua cada minuto. Adicionalmente, se realizó la medición manual con una sonda eléctrica.

Luego de instalado el dispositivo, se procedió a realizar la prueba de bombeo, la cual se inició el 29 de setiembre a las 10:30 horas, y finalizó el 30 de setiembre a las 08:00 horas, prolongándose por un período de 1290 minutos (21 horas y media) (véase Gráfico 9-23),

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible. Al no contar el pozo con un caudalímetro, se realizó el cálculo del caudal utilizando un recipiente (balde) calibrado, obteniéndose un caudal 18.5 l/s.

El nivel estático inicial del pozo de observación fue 1.29 m bajo la boca del pozo y el fondo de la perforación tiene una profundidad total de 65 m. Durante la prueba de bombeo, el máximo descenso registrado en el pozo de observación fue de 1.66 m.

En base a las lecturas obtenidas en el pozo de observación, se obtuvo una transmisividad de 3.4 x 10^{-2} m^2/s, tal como se muestra en el Gráfico 9-23.

Gráfico 9-23: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-014 – Pozo de Observación Pozo H3-MAT-016 – Descenso Lineal

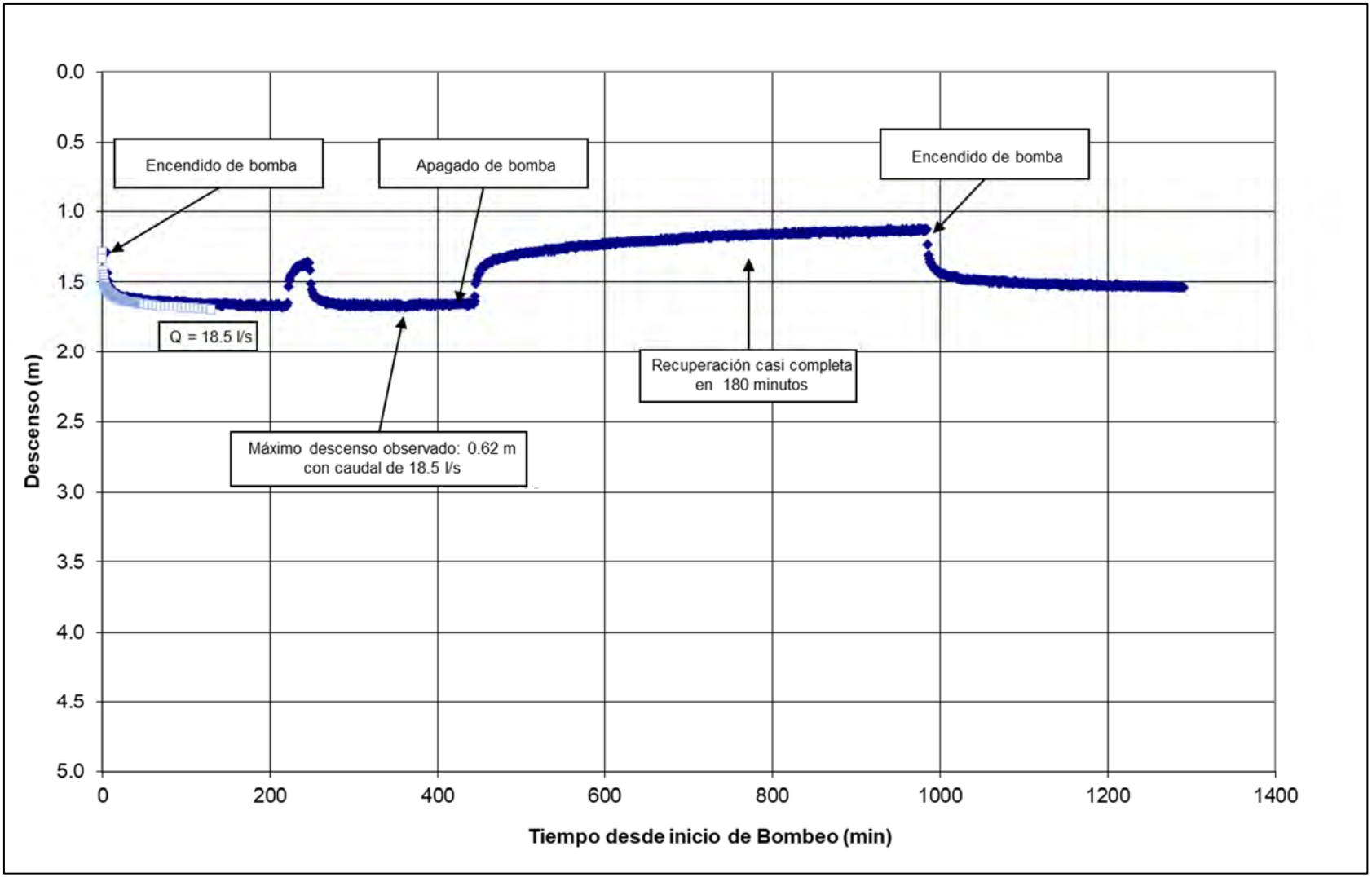
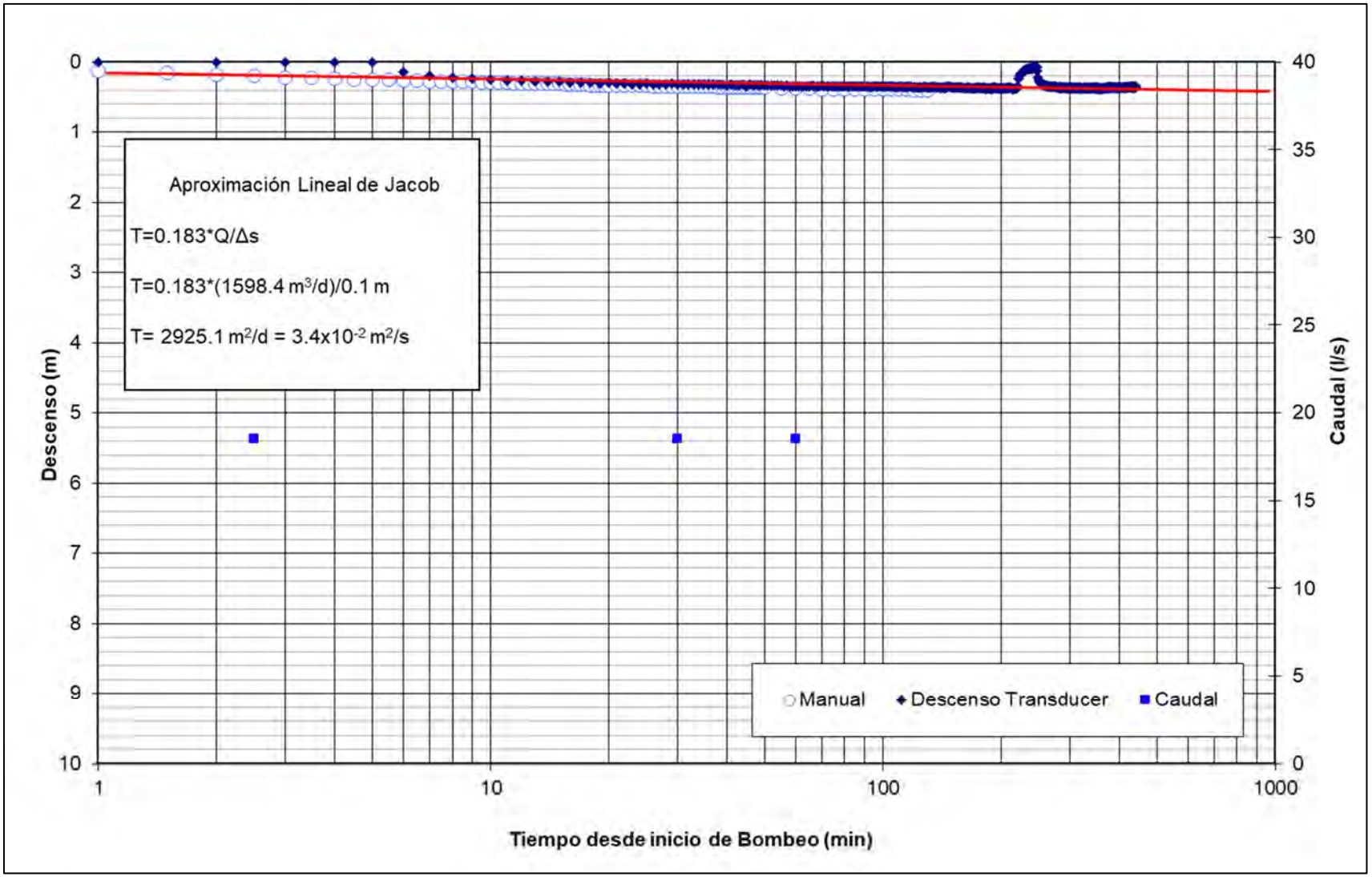


Gráfico 9-24: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-014 – Pozo de Observación H3-MAT-016



En la Foto 9-8 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-8: Pozo Tutumo - H3-MAT-014 y H3-MAT-016

<table>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo - Tutumo
H3-MAT-014</td><td>Ingreso de boca de Pozo de Bombeo
H3-MAT-014</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Observación de Tutumo
H3-MAT-016</td><td>Vista de Medición de Nivel en Pozo de Observación de Tutumo H3-MAT-016</td></tr>
</table>

9.4.9 Pozo de Bombeo – Isla Noblecilla (H3-MAT-096)

La prueba de bombeo fue ejecutada en el pozo tubular de abastecimiento de agua potable de la localidad de Isla Noblecilla, cuyas coordenadas de ubicación UTM (WGS 84, zona 17s): son E 587089 m / N 9591440 m y 62 msnm, con código de inventario H3-MAT-096.

A continuación, se exponen las características técnicas del pozo de bombeo .

9.4.9.1 Características del Pozo de Bombeo

- Diámetro de pozo: 8”
- Nivel estático: 2.97 mbpr
- Profundidad del pozo: 40.24 mbpr
- Profundidad de la bomba: 20 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 2 ”
- Caudal de explotación:3.28 l/s
- Potencia de la bomba: No se cuenta con información
- Tipo/marca de bomba: Sumergible / Pedrollo
- *Stick up*: 0.15 m

9.4.9.2 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Inicialmente, se realizó la medición del nivel estático y registro de datos constructivos del pozo de bombeo. Posteriormente se procedió con la instalación de una tubería de PVC de 1.5” de diámetro, hasta una profundidad de 15 m, con una sección ranurada a partir de los 7.00 m de profundidad; para la instalación de un levelogger, el cual fue programado para registrar las variaciones de nivel de agua de manera automática y continua cada minuto; y a su vez, se realizó la medición manual con una sonda eléctrica.

Luego de instalado el datalogger, se procedió a realizar la prueba de bombeo, la cual inició el 26 de setiembre a las 16:38 horas y finalizó el 27 de setiembre a las 09:30 horas; prolongándose por un período de 1020 minutos (17 horas).

El periodo de bombeo fue de 70 minutos, debido al llenado del reservorio (tanque elevado) existente de 13.8 $m^{3.}$ Durante este periodo se observó el descenso y la recuperación del pozo.

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible. Al no contar con un caudalímetro instalado en el pozo de bombeo, se realizó el cálculo del caudal utilizando un recipiente calibrado (balde).

El nivel estático inicial fue de 2.97 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible se encontraba a una profundidad de 20.15 m. Teniendo en cuenta que durante la prueba de bombeo, con un caudal de bombeo de 3.28 l/s, el máximo descenso observado fue de 3.28 m, este pozo tiene aún un tramo disponible de descenso adicional de 14.87 m (véase Gráfico 9-25).

En base a esta prueba se obtuvo una transmisividad de $3.0x10^{-3}$ m^2/s (prueba de bombeo) y $6.0x10^{-3}$ m^2/s (prueba de recuperación), tal como se muestra en los Gráficos 9-26 y 9-27.

Gráfico 9-25: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-096 – Descenso Lineal

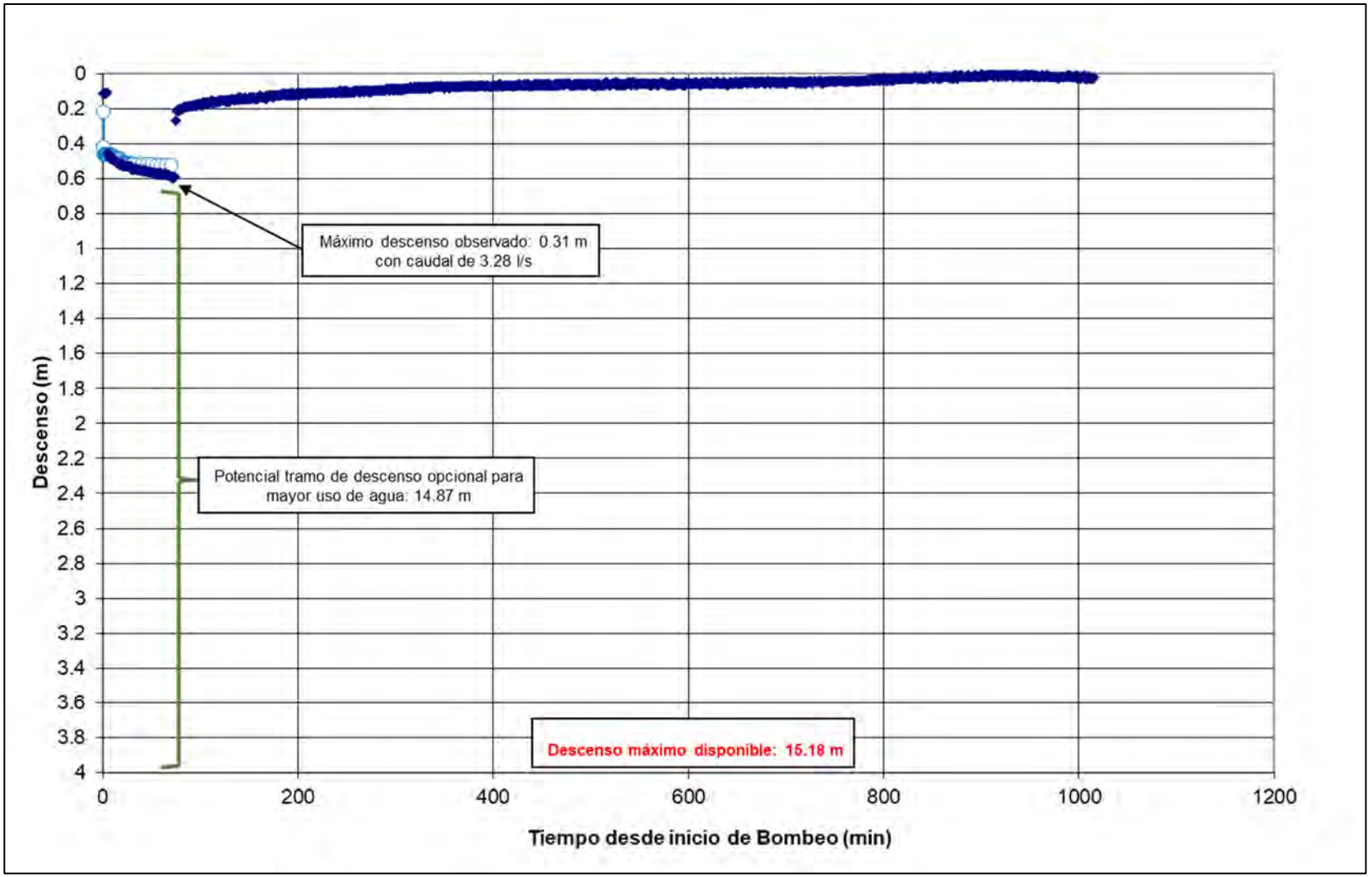


Gráfico 9-26: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-MAT-096

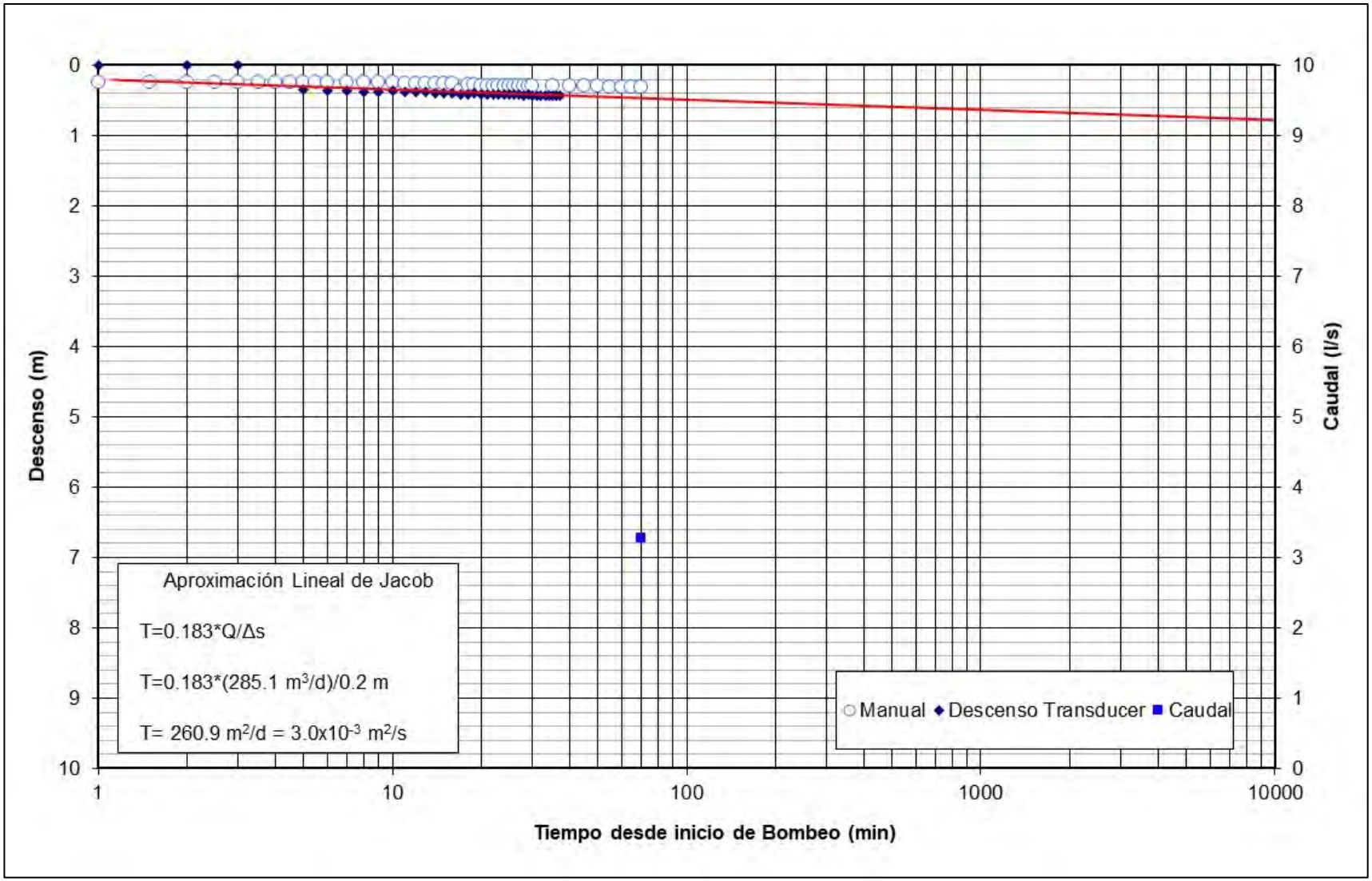
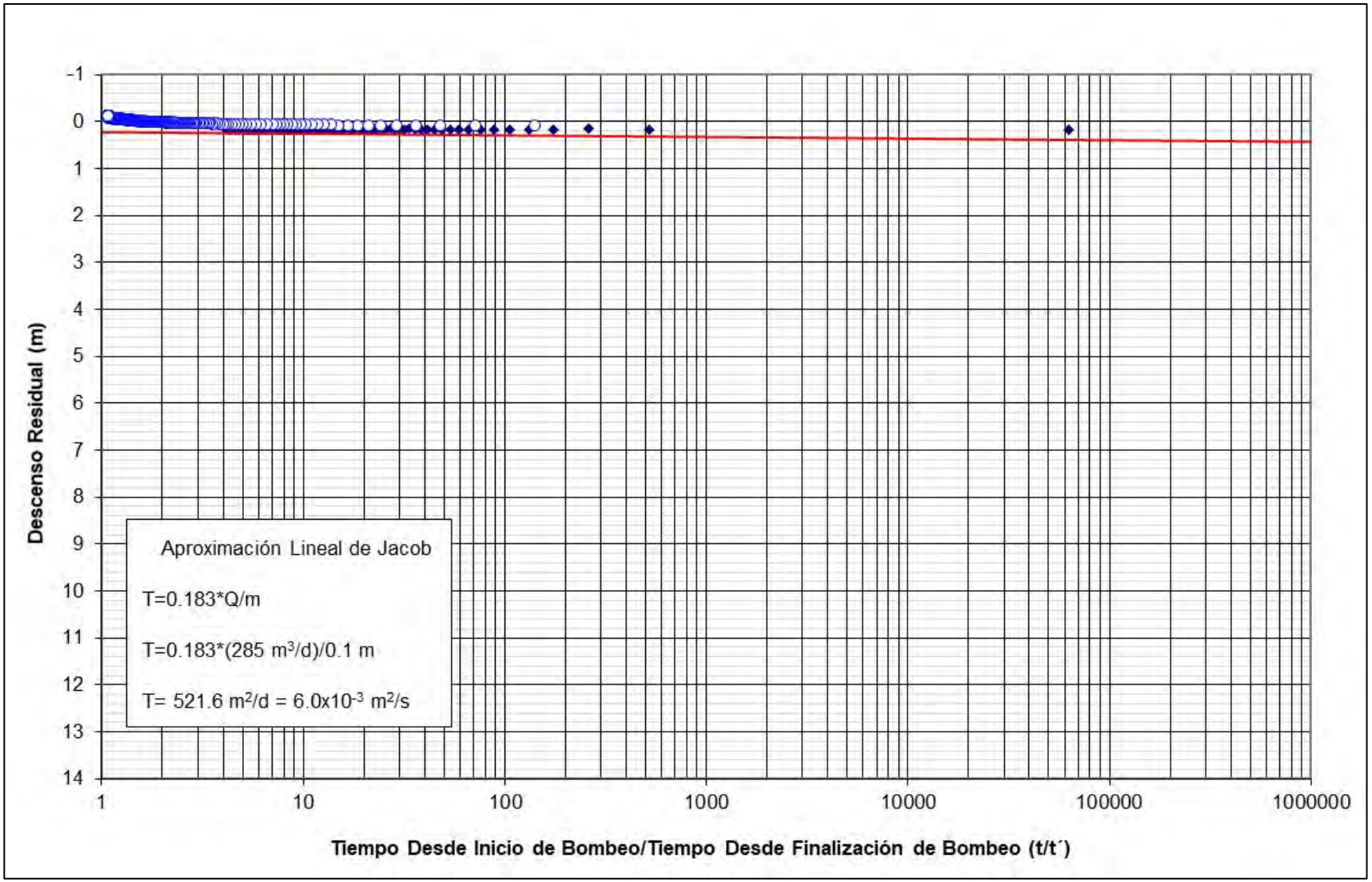


Gráfico 9-27: Prueba de Recuperación en Pozo H3-MAT-096



En la Foto 9-9 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-9: Pozo Isla Noblecilla - H3-MAT-096

<table>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de Bombeo - Isla Noblecilla
H3-MAT-096</td><td>Ingreso de levelogger en pozo de Bombeo
H3-MAT-096</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Vista de Pozo de ingreso de sonda en pozo de Bombeo – Isla Noblecilla</td><td>Tablero de control de bomba eléctrica
H3-MAT-096</td></tr>
</table>

9.4.10 Pozo de Bombeo – Lechugal (H3-PPY-040)

La prueba de bombeo fue ejecutada en el pozo tubular de abastecimiento de agua potable de Lechugal, cuyas coordenadas de ubicación UTM (WGS 84, zona 17s): son E 588982 m / N 9600274 m y 38 msnm, con código de inventario H3-PPY-040. Adicionalmente, se contó con el

pozo tubular de observación habilitado, cuyas coordenadas de ubicación UTM WGS 84 son E 588972 m / N 9600269 m y 41 msnm, con código de inventario H3-PPY-041; el cual se encuentra a una distancia aproximada de 10 m del pozo tubular. Las mediciones fueron realizadas en ambos pozos.

A continuación, se exponen las características técnicas del pozo de bombeo y del pozo de observación.

9.4.10.1 Características del Pozo de Bombeo (H3-PPY-040)

- Diámetro de pozo: 8”
- Nivel estático: 3.59 mbpr
- Profundidad del pozo: 40.24 mbpr
- Profundidad de la bomba: 20 m bajo superficie
- Diámetro de bomba sumergible: 3 ”
- Caudal de explotación:13.4 l/s
- Potencia de la bomba: No se cuenta con información
- Tipo/marca de bomba: Sumergible / No se cuenta con información
- *Stick up*: 0.24 m

9.4.10.2 Características del Pozo de Observación (H3-PPY-041)

- Diámetro de pozo: 8”
- Nivel estático: 3.625 mbpr
- Profundidad del pozo: 25.25 mbpr
- Profundidad de la bomba: sin equipo
- Diámetro de bomba sumergible: sin equipo
- Caudal de explotación: no se utiliza en la actualidad
- *Stick up*: 0.25 m

9.4.10.3 Detalles de la Prueba de Bombeo a Caudal Constante

Luego de haber realizado la medición de niveles estáticos y registro de datos constructivos, tanto del pozo de bombeo como del pozo de observación, se procedió con la instalación de una manguera de PVC de 1.5” de diámetro en el pozo de observación H3-PPY-041, hasta una profundidad de 20 m; para la instalación de un *levelogger*, el cual fue programado para registrar las variaciones de nivel de agua de manera automática y continua cada minuto; y a su vez, se realizó la medición manual con una sonda eléctrica en los pozos de bombeo y observación, de manera paralela.

Una vez instalado el dispositivo de medición, se procedió a realizar la prueba de bombeo, iniciando el 26 de setiembre a las 10:46 horas y finalizando a las 12:36; prolongándose por un período de 110 minutos (cerca de 2 horas), que incluyó la prueba de recuperación (véase Gráfico 9-28).

El periodo de bombeo fue de 31 minutos, debido al llenado del reservorio (tanque elevado) existente de 25 m^3. Durante este periodo se observó el descenso y recuperación del nivel del agua en el ambos pozos (Gráfico 9-28).

El caudal de bombeo fue establecido por la capacidad de la bomba sumergible, sin embargo, este pozo no cuenta con un caudalímetro, por lo cual se calculó el caudal utilizando un recipiente calibrado (balde), obteniéndose 13.4 l/s.

El nivel estático inicial en el pozo de observación fue de 3.62 m bajo la boca del pozo; mientras que del pozo de bombeo fue de 3.59 m bajo la boca del pozo y el filtro de la bomba sumergible se encontraba a una profundidad de 20 m.

Durante la prueba de bombeo, con un caudal de bombeo de 13.4 l/s, el máximo descenso observado en el pozo de bombeo fue de 3.07 m, lo que indica que este pozo aún tiene un tramo disponible de descenso adicional de 7.75 m.

En base a esta prueba de bombeo se obtuvo una transmisividad de $1.3x10^{-2}$ m^2/s (prueba de bombeo) y $1.6x10^{-2}$ m^2/s (prueba de recuperación), tal como se puede apreciar en los Gráficos 9-29 y 9-30. Con los datos obtenidos del pozo de observación se obtuvo una transmisividad de $2.5x10^{-2}$ m^2/s (véase Gráfico 9-31)

Gráfico 9-28: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-PPY-040 – Descenso Lineal

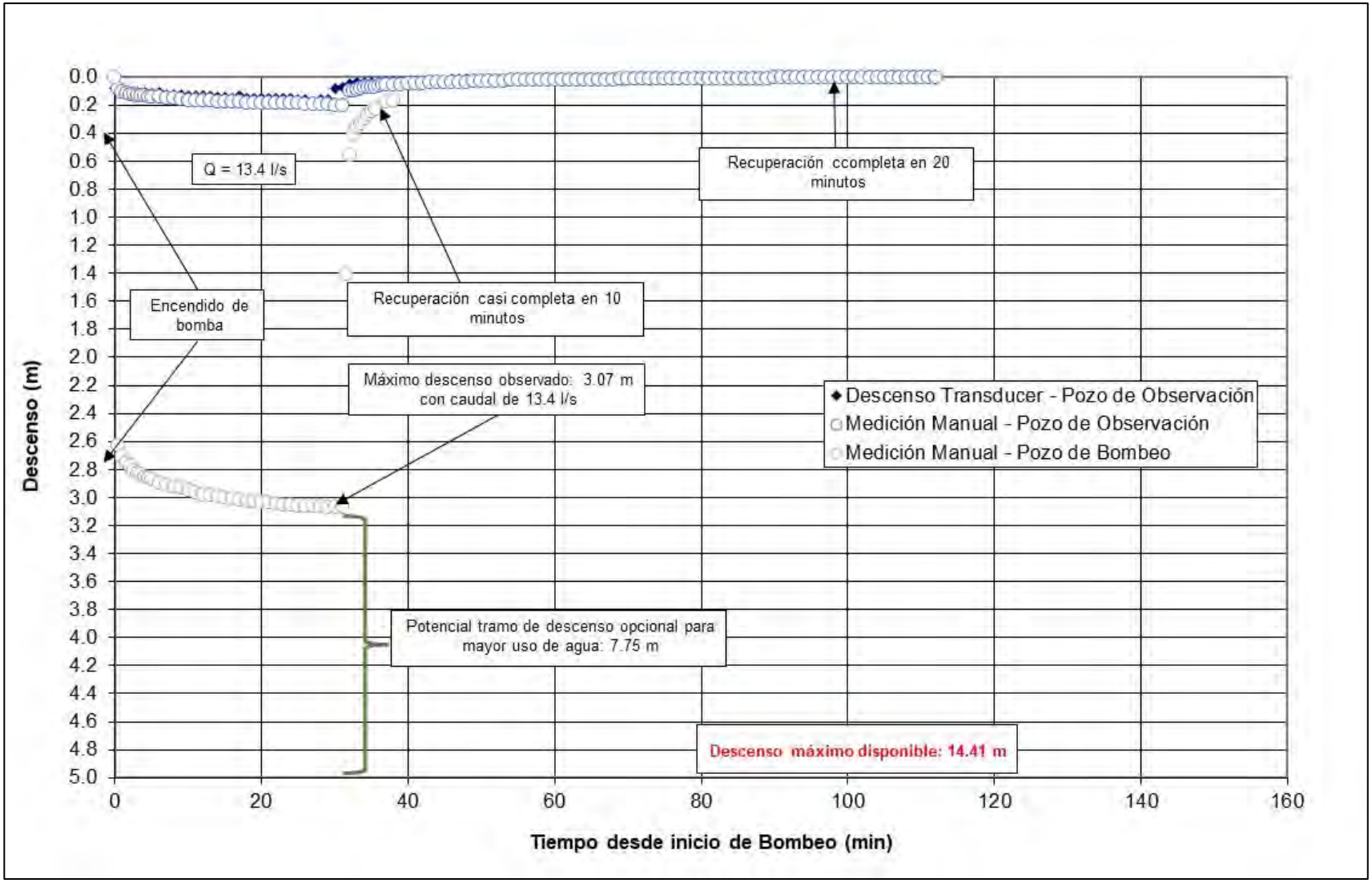


Gráfico 9-29: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-PPY-040

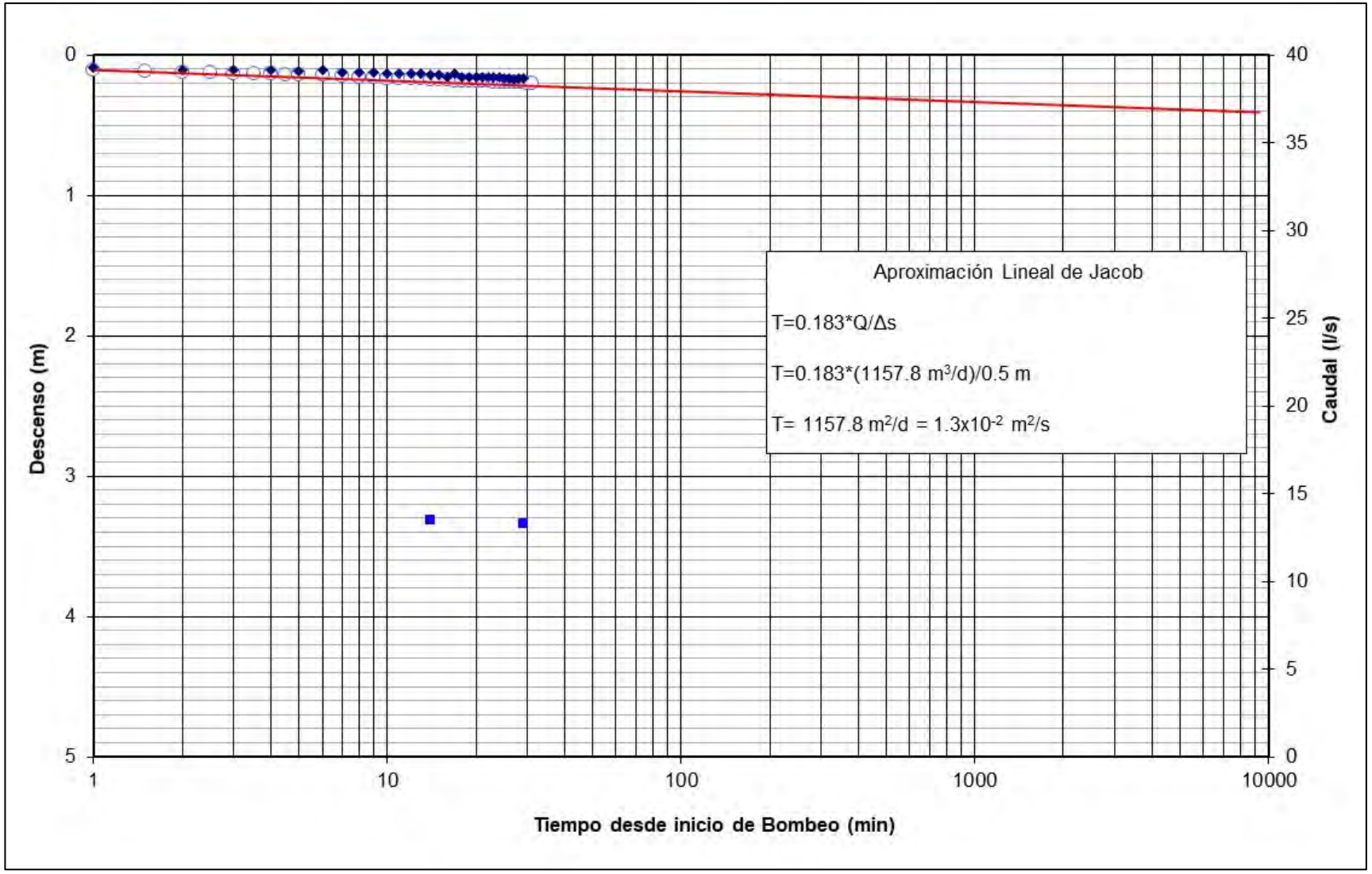


Gráfico 9-30: Prueba de Recuperación en Pozo H3-PPY-040

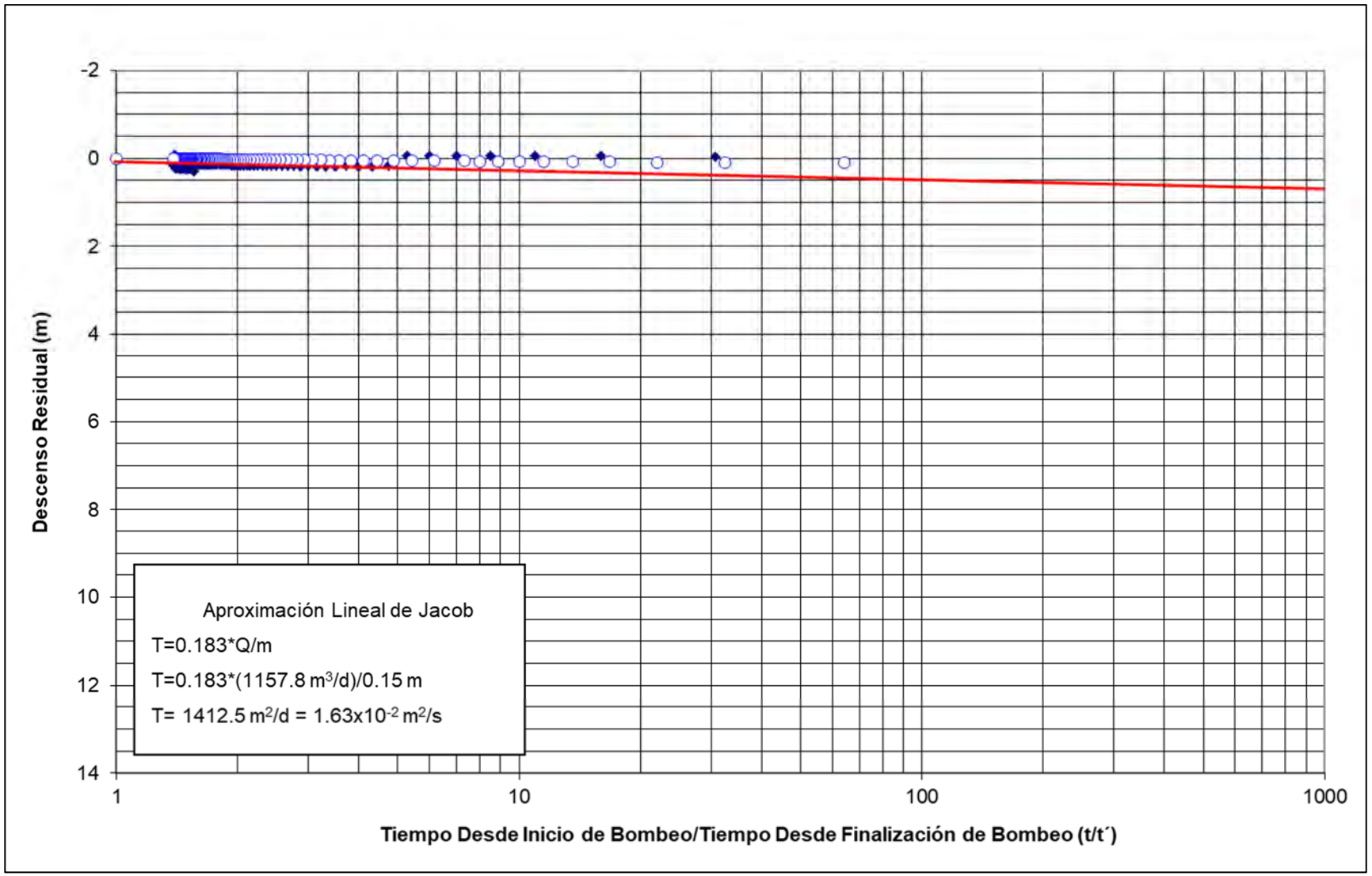
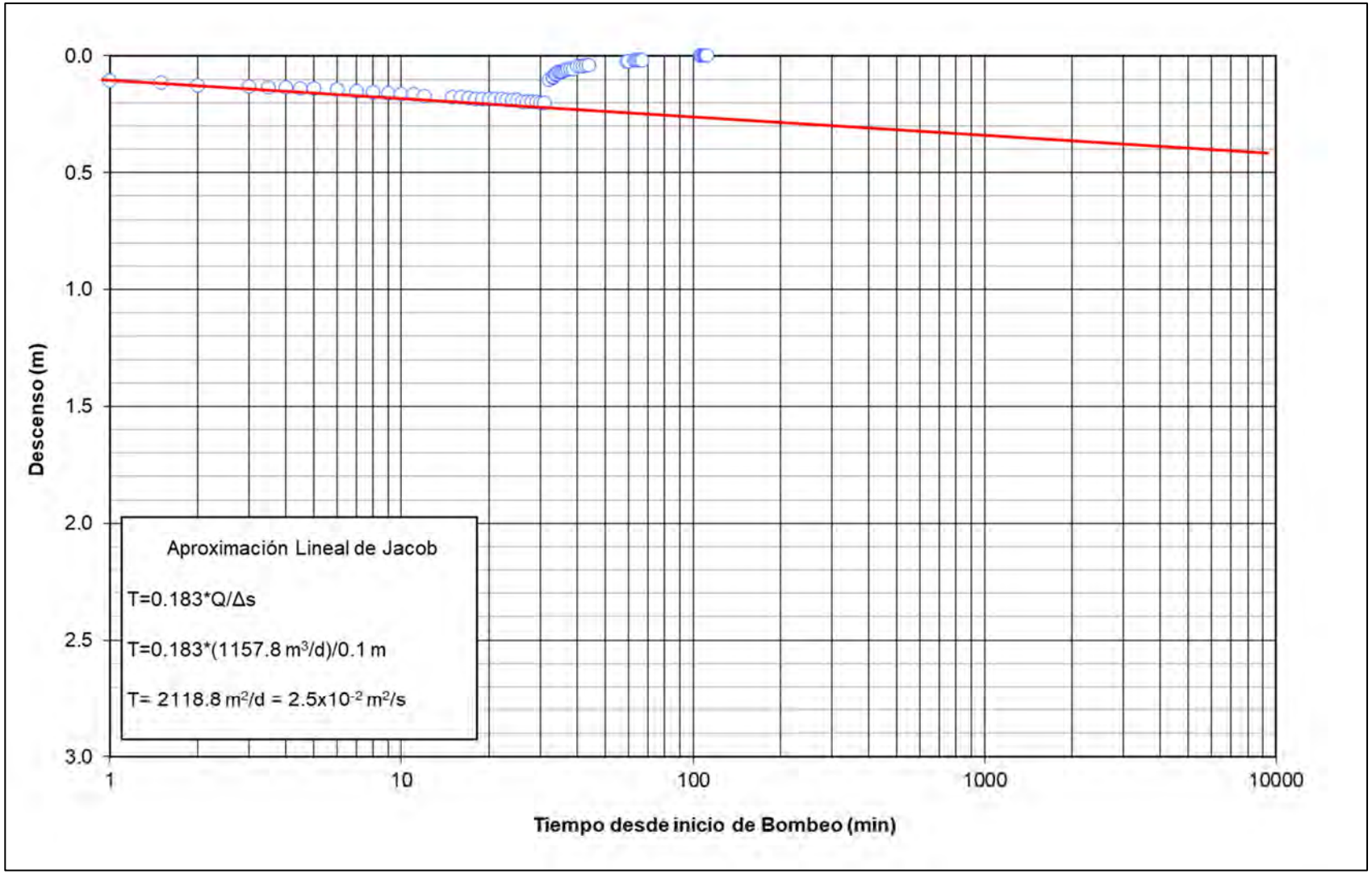


Gráfico 9-31: Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo H3-PPY-040 - Pozo de Observación H3-PPY-041



En la Foto 9-10 se presentan unas vistas de las actividades ejecutadas durante la prueba de bombeo.

Foto 9-10: Pozo Lechugal - H3-PPY-040 y H3-PPY-041

Vista de Pozo de Bombeo - Lechugal H3-PPY-040	Vista de Pozo de Bombeo - Lechugal H3-PPY-040
Vista de Pozo de Observación - Lechugal H3-PPY-041	Vista de Pozo de Observación - Lechugal H3-PPY-041

En base a los resultados de transmisividad (T) obtenidos de las pruebas de bombeo, tanto de las pruebas de descarga constante como de recuperación, y considerando los espesores de los potenciales acuíferos en base a la profundidad de los pozos de bombeo, se calcularon las conductividades hidráulicas (permeabilidad - K).

Para este efecto, en vista que no se obtuvo información sobre el diseño de los pozos ni los detalles de instalación, se tomó en consideración como espesor del acuífero el tramo interpretado en las secciones geológicas, tal como se puede apreciar en la Tabla 9-2.

Este cálculo de la conductividad hidráulica es bastante conceptual y restringido, pero en vista de la ausencia de mayores informaciones, sobre todo de datos litológicos de los pozos, se ha considerado como válido para la interpretación hidrogeológica de la Cuenca Zarumilla.

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas, se ha obtenido conductividades hidráulicas en el rango de $1.28x10^{-3}$ a $2.72x10^{-6}$ m/s, que corresponden a la Unidad Hidrogeológica de un ***Acuífero***[1].

Como se puede apreciar en la Tabla 9-2, hay pozos que tienen mayores profundidades al espesor considerado para el cálculo de la conductividad hidráulica, esto es debido a que las bombas sumergibles no están instaladas en el fondo del pozo y, de manera conservadora, se ha tomado un menor tramo.

Por otro lado, en base a la limitada información de pozos de observación durante las pruebas de bombeo, solo dos (02) pozos en total, uno (01) en territorio ecuatoriano (HI-PAL-012 en Palmales) y otro en territorio peruano (H3-PPY-041 en Lechugal), se calcularon, de manera referencial, los coeficientes de almacenamiento (S), presentados en la Tabla 9-2.

En la cercanía del pozo de bombeo H3-MAT-014, existe un pozo de observación (H3-MAT-016, Tutumo); sin embargo, debido a que no se tuvo acceso de mediciones de descenso en el mismo pozo de prueba (H3-MAT-014), no fue posible obtener el valor de S.

En base a las distancias de los pozos de observación desde los pozos de bombeo, a 10 m en ambos casos (Tabla 9-2), el coeficiente de almacenamiento obtenido fue de 0.52 en el pozo ecuatoriano y 0.12 para el pozo peruano. Ambos valores indican que se tratan de acuíferos libres. Para un mejor cálculo de este parámetro se recomienda realizar futuras pruebas de bombeo con sus respectivos pozos de observación habilitados.

[1] Acuífero: $<10^{-1}$ – 10^{-6} m/s; Acuitardo: 10^{-6} – 10^{-8} m/s; Acuicludo: 10^{-8} – 10^{-10} m/s; Acuífugo: 10^{-10} - $>10^{-12}$ m/s.

Tabla 9-2: Cálculo de Conductividad Hidráulica (K)

N°	Pozo de Bombeo	Pozo de Observación	Profundidad del Pozo (m)	Prueba de Bombeo T (m^2/s)	Prueba de Recuperación T (m^2/s)	Promedio T (m^2/s)	Espesor del Acuífero (m)	Conductividad Hidráulica (K - m/s)	Distancia desde Pozo de Bombeo (m)	S ($S=2.25*T*t/r_0^2$)
Sector Ecuatoriano										
1	H1-CHA-168	-	83.25	5.3E-04	7.9E-04	6.6E-04	60	1.1E-05		
2	H1-PAL-011	-	60.5	3.7E-02	3.7E-01	2.0E-01	50	4.1E-03		
		H1-PAL-012	40.17	1.7E-02		1.7E-02	30	5.7E-04	10	0.52
3	H1-QUE-053	-	45	8.1E-05	8.2E-05	8.2E-05	30	2.7E-06		
4	H2-CHA-170	-	126	4.8E-04	7.3E-04	6.1E-04	100	6.1E-06		
5	H2-HUA-250	-	183.6	4.6E-03	1.7E-03	3.2E-03	160	2.0E-05		
Sector Peruano										
6	H1-PPY-325	-	80.2	6.9E-03	1.7E-03	4.3E-03	70	6.1E-05		
7	H1-ZAR-327	-	120	7.1E-03	4.7E-03	5.9E-03	100	5.9E-05		
8	H3-MAT-014	-	65.15				50			
		H3-MAT-016	65.55		3.4E-02	3.4E-02	50	6.8E-04	12	
9	H3-MAT-096	-	40.24	3.0E-03	6.0E-03	4.5E-03	35	1.3E-04		
10	H3-PPY-040	-	40.24	1.3E-02	1.6E-02	1.5E-02	30	4.8E-04		
		H3-PPY-041	25.25	2.5E-02		2.5E-02	30	8.3E-04	10	0.12

10 HIDROGEOQUÍMICA

10.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

10.1.1 Puntos de Muestreo

En base a la revisión de los pozos existentes y considerando sus características y equipamiento, así como la revisión de los resultados hidrogeoquímicos existentes, se definieron diez (10) puntos de muestreo de calidad de agua subterránea (véase Figura 10-1) distribuidos para que sean lo más representativos posible y complementen óptimamente la limitada información hidrogeoquímica existente en el acuífero transfronterizo.

En la Tabla 10-1 se presentan los detalles de la ubicación de los puntos de muestreo y fecha en que se recolectó la muestra, y en la Figura 10-1 se muestra su distribución en el área de estudio.

Tabla 10-1: Puntos de Muestreo Hidrogeoquímico

N°	Código de Campo del Pozo/Captación	Código Final de Inventario	Código de Muestra (Laboratorio)	Fecha de Muestreo	Coordenadas UTM (WGS 84, zona 17 s)	
					Este (m)	Norte (m)
Sector Ecuatoriano						
1	H1-PAL-011	ECU-25	P.B.-Palmales	02-oct-19	599364	9594005
2	H1-CHA-168	ECU-505	P.B.-Balsalito	28-set-19	587255	9604130
3	H1-QUE-053	ECU-251	P.B.-Q. Seca	27-set-19	590437	9594901
4	H2-CHA-170	ECU-420	P.B.-Chacras	29-set-19	588794	9607698
5	H2-HUA-250	ECU-515	AA. PP-Huaquillas	02-oct-19	585111	9615003
Sector Peruano						
6	H3-MAT-014	PER-772	P.B.-Tutumo	29-set-19	582470	9591446
7	H3-MAT-096	PER-214	P.B.-Noblecilla	27-set-19	587089	9591440
8	H3-PPY-040	PER-66	P.B.-Lechugal	30-set-19	588982	9600274
9	H1-PPY-325	PER-803	P.B.-Papayal	01-oct-19	581795	9607016
10	H1-ZAR-327	PER-844	AA. PP.-Zarumilla	01-oct-19	580208	9612465

Figura 10-1: Muestreo Hidrogeoquímico Ejecutado

10.1.2 Procedimientos de Muestreo

La toma de muestras se realizó cumpliendo con las mejores prácticas, estándares y protocolos de monitoreo de agua vigentes en Perú y Ecuador, e internacionales. A continuación, se listan los criterios y consideraciones generales que se tuvieron en cuenta para la ejecución del muestreo, a fin de asegurar la mayor representatividad y precisión de los resultados, así como su adecuada interpretación:

- Detallada descripción del punto de muestreo y su entorno,
- Correcto etiquetado de las muestras,
- Uso de los recipientes provistos por el laboratorio,
- Purgado del agua del pozo o piezómetro antes de la toma de muestra,
- Estabilización de los parámetros fisicoquímicos antes de proceder al muestreo,
- Limpieza del equipo con agua destilada o desionizada,
- Llenado al máximo los recipientes y rápido cerrado de los mismos,
- Uso de equipo adecuado,
- Conservación en frío de las muestras hasta su recepción en el laboratorio,
- Preservación de muestras según indicaciones del laboratorio y parámetro a analizar, y
- Envío de muestras con cadena de custodia y contenedor con sello de seguridad.

En el Anexo VI-A se presentan las fichas de muestreo con la información del personal que recogió la muestra y los parámetros de campo registrados. Los procedimientos del muestreo de calidad de agua ejecutado se describen a continuación.

10.1.2.1 Medición del Nivel de Agua

En cada uno de los puntos de muestreo se midió el nivel del agua en el pozo. El nivel de agua se midió usando una sonda eléctrica, los que se registraron en la libreta de campo.

10.1.2.2 Purgado del Pozo

Los puntos de muestreo fueron definidos en los mismos pozos donde se efectuaron las pruebas de bombeo, lo que facilitó el purgado requerido para la recolección de la muestra de agua. En cada pozo se aseguró la evacuación de un mínimo de tres veces el volumen del agua almacenado en el pozo y se verificó, como indicativo de que el agua era representativa, la estabilidad de parámetros de pH, conductividad eléctrica y temperatura.

10.1.2.3 Medición de Parámetros de Campo

En cada uno de los puntos de muestreo se midieron los siguientes parámetros de campo:

- Temperatura del agua (ºC),
- Temperatura del ambiente (ºC),
- pH (unidades estándar),
- Conductividad eléctrica (CE) (µS/cm), y

- Sólidos totales disueltos (STD) (mg/L).

Cuando se observó que los parámetros de campo se estabilizaron se registraron los valores medidos en la ficha de muestreo (ver Anexo VI-A) y en la libreta de campo. El equipo de medición fue debidamente calibrado y, según fue necesario, se calibró en campo, cuando se identificó variaciones marcadas de los valores medidos entre pozos.

10.1.2.4 Recolección de Muestras

En cada uno de los puntos de muestreo se colectaron muestras de agua para la medición en campo y el análisis de laboratorio de los parámetros listados en la Tabla 10-2.

Tabla 10-2: Parámetros Analizados

Parámetro	Tipo
Nivel de agua	Medición *in situ*
pH	
Conductividad eléctrica (CE)	
Sólidos Totales Disueltos (STD)	
Temperatura (°C)	
Oxígeno disuelto (OD)	Laboratorio
Potencial Redox (Eh)	
Metales totales y disueltos por ICP - MS (aluminio, cobre, plata, níquel, plomo, hierro, zinc, cadmio, boro, molibdeno, manganeso, litio, fósforo, sílice, calcio, magnesio, sodio, potasio)	
Sólidos Totales Disueltos (STD)	
Residuo seco a 550° (sólidos fijos)	
Sólidos Totales Suspendidos (STS)	
Amonio	
Nitratos	
Nitritos	
Cianuro Total	
Sulfatos	
Sulfuro	
Cloruros	
Fluoruros	
Carbonatos	
Bicarbonatos	
Fosfatos	
Bromato	
Bromuros	
Acidez	
Alcalinidad Total	
Coliformes fecales	
Coliformes totales	

Todos los materiales de muestreo (frascos, preservantes, agua destilada, documentación de muestreo) fueron provistos por el laboratorio a cargo de los análisis.

La toma de muestras se ejecutó cumpliendo estrictamente los criterios y consideraciones de muestreo indicadas por el laboratorio (ver Tabla 10-3). El personal a cargo de la toma de muestras usó guantes y fue el único que manipuló los materiales de muestreo y las muestras recolectadas.

El agua muestreada fue extraída del pozo justo antes de la finalización de la prueba de bombeo; es decir minutos antes de apagar la bomba, y fue vertida directamente a los frascos y envases provistos por el laboratorio mediante el uso de un envase. Antes de la toma de muestra, cuando correspondía, se enjuagaron 3 veces las botellas con la misma agua de muestra (ver Tabla 10-3).

La Tabla 10-3 presenta el detalle del tipo de frasco, volumen de muestra y condiciones de muestreo y de preservación/conservación que se consideraron durante la toma de muestras.

Los datos de la toma de muestra y preservación/conservación fueron registrados en la ficha de muestreo, etiqueta y cadena de custodia, según correspondía. Las fichas de muestreo con los detalles de muestreo y parámetros medidos en campo se presentan en el Anexo VI-A, y las cadenas de custodia para el manejo y transporte de las muestras se presenta en el Anexo VI-B.

10.1.2.5 Descontaminación de Equipos

Todo el material de muestreo y equipo de medición fue limpiado tras su uso. La descontaminación se realizó mediante el enjuague con agua destilada provista por el laboratorio.

10.1.2.6 Preservación y Manejo de Muestras

Las muestras fueron preservadas con las sustancias provistas por el laboratorio, inmediatamente después de recolectadas, según sus indicaciones (ver Tabla 10-3), y almacenadas en los contenedores (*coolers*) destinados para ese fin. Se realizó el cambio de guantes por cada tipo de preservante usado.

Las muestras fueron debidamente etiquetadas incluyendo toda la información pertinente (código de muestra, punto de muestreo, fecha y hora de muestreo, preservantes añadidos, parámetros a analizar y responsable del muestreo). Una vez completada la etiqueta, esta fue cubierta con cinta adhesiva para asegurar que no se borren los datos durante el transporte de las muestras hacia el laboratorio.

Una vez llenos los contenedores, éstos fueron provistos de paquetes de hielo (*icepacks*) para mantener la cadena de frio (aprox. 5ºC) y cerrados con cinta de embalaje y sello de seguridad para su envío al laboratorio.

Cada contenedor de muestras fue enviado con su cadena de custodia (ver Anexo VI-B), en el cual fue registrado el detalle de las muestras, análisis requeridos y las condiciones de preservación y conservación de las muestras entre otra información relevante.

Tabla 10-3: Condiciones y Criterios de Muestreo

Determinación	Envase	Volumen de Muestra (mL)	Condiciones de Muestreo	Conservación y/o Preservación
pH (laboratorio)	P, V	50	Enjuagar el material (03 veces) sin preservar	Analizar lo antes posible, Refrigerar, ≤ 6 °C; sin congelar
Potencial Redox (laboratorio)	P, V	100	Sin preservar	Analizar lo antes posible, Refrigerar, ≤ 6 °C; sin congelar
Temperatura (laboratorio)	P,V	500	Sin preservar	Analizar lo antes posible, Refrigerar, ≤ 6 °C; sin congelar
Oxígeno Disuelto (laboratorio)	P,V	300	Sin preservar	Analizar lo antes posible, Refrigerar, ≤ 6 °C; sin congelar
Conductividad (laboratorio)	P, V	500	Sin preservar	Analizar lo antes posible, Refrigerar, ≤ 6 °C; sin congelar
Alcalinidad Total	P, V	250	Enjuagar 03 veces. Llenar completamente el envase	Refrigerar, ≤ 6 °C; sin congelar
Carbonatos				
Bicarbonatos				
Residuo Seco a 550° (sólidos fijos)*	P, V	1000	-	Refrigerar , < 6°C, sin congelar
Sólidos Totales Disueltos	P, V	1000	-	Refrigerar , < 6°C, sin congelar
Sólidos Totales Suspendidos				
Cianuro Total	P (A),V (A)	1000	Material enjuagar 03 veces. Ver Part. 4500-CN^- B para interferencias. Muestrear adicionalmente 1000 mL más por cada lote de muestra.	Si la muestra presenta pH mayor a 8.3, preservar la muestra con Ca(OH)2 hasta pH 12-12.5, caso contrario preservar la muestra con la adición de perlas de NaOH o solución NaOH 6N hasta pH 12 - 12.5, refrigerar en oscuridad ≤ 6 °C, sin congelar. Si hay sulfuros y/o agentes oxidantes (ver Nota N° 1)
Sulfuros (S=)	V(T)	100	Tomar la muestra en un recipiente. Verter sobre el frasco que deberá contener el Acetato de Zinc é Hidróxido de Sodio. Dejar sedimentar el precipitado en un tiempo de 30 min, para realizar la verificación del pH. La verificación del pH>9 se deberá realizar con papel indicador en una alícuota de la muestra.	Añadir 4 gotas de ZnAc 2N para 100 mL; añadir NaOH (6N) hasta pH>9, Refrigerar a 4 °C
Fosfatos	V (C) (A)	250	No enjuagar el material	Refrigerar ≤6°C , sin congelar
Bromato*	P(A), V(A)	250	No preservar	Refrigerar a 4°C

Determinación		Envase	Volumen de Muestra (mL)	Condiciones de Muestreo	Conservación y/o Preservación
Escaneo de Aniones (Aniones Inorgánicos)	Bromuro Br^-	P(A), V(A)	250	No preservar	Refrigerar a 4°C
	Cloruro Cl^-				
	Fluoruro F^-				
	N-NO_2^-				
	NO_2^-				
	N-NO_3^-				
	NO_3^-				
	Sulfato $SO_4^=$				
	P-PO_4^{3-}				
	P-HPO_4^{2-}				
	PO_4^{3-}				
Acidez		P, V	100	Material enjuagar 03 veces. Llenar completamente el envase	Refrigerar, ≤ 6 °C; sin congelar
Coliformes Fecales (Termotolerantes)		P (E), V (E)	250	No se debe enjuagar el frasco. Dejar un espacio aproximadamente 2.5 cm para facilitar la homogenización.	Si la concentración de Cloro residual libre es ≤ 5mg/L emplear el frasco que contenga Tiosulfato de Sodio al 3% (0.8 ml / L de muestra). Si la concentración es > 5 mg/L y 15 mgL emplear el frasco que contenga Tiosulfato de Sodio al 10% (0.8 mL / L de muestra). Adicionar 1 ml/L de EDTA de una concentración de 50mg/L. Refrigerar, < 10°C sin congelar y en oscuridad.
Coliformes Totales		P (E), V (E)	250	No se debe enjuagar el frasco. Dejar un espacio aproximadamente 2.5 cm para facilitar la homogenización.	Si la concentración de Cloro residual libre es ≤ 5mg/L emplear el frasco que contenga Tiosulfato de Sodio al 3% (0.8 mL / L de muestra). Si la concentración es > 5 mg/L y 15 mgL emplear el frasco que contenga Tiosulfato de Sodio al 10% (0.8 mL / L de muestra). Adicionar 1 ml/L de EDTA de una concentración de 50mg/L. Refrigerar, < 10°C sin congelar y en oscuridad.

Determinación	Envase	Volumen de Muestra (mL)	Condiciones de Muestreo	Conservación y/o Preservación
Metales Totales	P, V	500	Enjuagar 03 veces.	Añadir HNO_3 (1:1) hasta pH<2
Metales Disueltos	P, V	500	Enjuagar 03 veces. Filtrar en membrana 0,45 µm inmediatamente y luego preservar; caso contrario trasladar la muestra dentro de las 24 horas al laboratorio sin preservar y en cadena de frio.	Añadir HNO3 (1:1) hasta pH<2

Fuente: DCI-MA-04 REV 47 Condiciones para Muestreo y Preservación, Agosto, 2019, CERTIMIN S.A

Nota:

(*) Se medirán en campo y laboratorio. Cuando los parámetros de campo son analizados en laboratorio, independientemente del tiempo, los resultados se reportan como fuera del alcance de la acreditación.

(**) No acreditado

Nota 1.- Durante la toma de muestra se detecta la presencia de sulfuro utilizando la prueba de papel acetato de plomo. Se sumerge una tira de prueba de papel acetato de plomo en solución buffer de ácido acético pH 4; se agrega a la tira una gota de la muestra, si se oscurece indica presencia de sulfuro. Si en caso existe sulfuros se agrega a la muestra unas gotas de solución de acetato de plomo para precipitarlo, filtrar la muestra. Repetir la prueba hasta verificar que se ha eliminado todo el interferente. Durante la toma de muestra se detecta la presencia de agentes oxidantes utilizando la prueba de papel de almidón de KI. Se sumerge una tira de prueba de papel de almidón de KI en solución buffer de ácido acético pH 4; se agrega a la tira una gota de la muestra, si se torna azul púrpura indica presencia de agentes oxidantes. Eliminando con 0.1g NaAsO2/L de muestra, hasta que no de reacción con la prueba.

P= envase de plástico (PP, PVC, o equivalente), V= envase de vidrio, V(C) = envase de vidrio lavado con extran y 1:1 HCl, (T)= envase transparente. Para parámetros microbiológicos los recipientes deberán estar esterilizados, (E) = Estéril; Viales tapa sellada con línea de PTFE. (A) = Ambar, (BA) = Boca ancha. Parámetros Orgánicos: Llenar completamente el envase, V(D): lavado con HNO3 1:1

Sin congelar equivale a mantener una temperatura > 0 °C

10.1.3 Metodologías de Análisis

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio CERTIMIN de Perú, con metodologías (ver Tabla 10-4) acreditadas por el ente oficial de calibración del Perú, INACAL.

CERTIMIN cuenta con Certificación ISO 9001 para la preparación y ensayos fisicoquímicos de muestras geoquímicas, metalúrgicas y ambientales, así como la "Acreditación NTP-ISO/IEC 17025 (www.inacal.gob.pe)" y "Certificación de Evaluación de Proveedores, ISO 14001, OHSAS 18001. Membresías ASTM y SNOASC". La acreditación de INACAL de las metodológicas de ensayo se puede verificar en el *link*: https://aplicaciones.inacal.gob.pe/crtacre/#.

Tabla 10-4: Métodos y Límites de Detección

Determinación/Parámetro	Método		Límite de Detección
pH*	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part 4500-H+ B. pH Value. Electrometric Method		-
Temperatura*	SMEWW APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part-2550 B. Temperature. Laboratory and Field Methods		-
Oxígeno disuelto*	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part-4500-O G. Oxygen (Dissolved). Membrane Electrode Method.		0.1 mg/L
Sólidos Totales Disueltos*	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017 Part 2540 C. Total Dissolved Solids Dried at 180QC		5 mg/L
Potencial Redox	SMEWW -APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part-2580 A, B. Oxidation - Reduction Potential (ORP)		-
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part 2510 B. Conductivity. Laboratory Method		-
Residuo seco a 550° (sólidos fijos)**	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part- 2540 E. Fixed and Volatile Solids Ignited at 550°C		5 mg/L
Sólidos Totales Suspendidos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 22nd Ed 2012 Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105QC		5 mg/L
Alcalinidad Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part 2320 B. Alkalinity. Titration Method.		1 mg CaCO3/L
Cianuro Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017 Part 4500 CN- C, F. Cyanide. Total Cyanide after Distillation /Cyanide-Ion Selective Electrode Method		0.005 mg/L
Amonio**	SMEWW 22nd Ed. 2012.Part-4500-NH3 D Pág 4-113. APHA AWWA-WEF Ammonia-Selective Electrode Method. Adaptado		0.04 mg/L
Sulfuros (S=)	SMEWW APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part 4500-S2- C. D. Sample Pretreatment to Remove Interfering Substances or to Concentrate the Sulfide / Sulfide. Methylene Blue Method		0.002 mg/L
Carbonatos	SMEWW APHA -AWWA- WEF 23rd Ed. 2017. Part-2320 B. Titration Method		1 mg CO2-3/L
Bicarbonatos	SMEWW APHA -AWWA- WEF 23rd Ed. 2017. Part-2320 B. Titration Method		1.5 mg HCO-3/L
Fosfatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed. 2017. Part 4500-P E. Phosphorus. Ascorbic Acid Method		0.010 mgP/L
Bromato**	EPA 300.0 Rev.2.1		
Escaneo de Aniones (Aniones Inorgánicos)	Bromuro Br^-	EPA METHOD 300.1 Rev1.0. 1997. Determination of Inorganic Anions in Drinking Water by ion Chromatography	0.03 mg/L
	Cloruro Cl^-		0.02 mg/L
	Fluoruro F^-		0.005 mg/L
	N-NO_2^-		0.01 mg/L
	NO_2^-		0.03 mg/L
	N-NO_3^-		0.01 mg/L
	NO_3^-		0.06 mg/L
	Sulfato $SO_4^=$		0.02 mg/L
Acidez	SMEWW -APHA-AWWA- WEF 23rd Ed. 2017. Part-2310-B. Acidity. Titration Method.		1 mg CaCO3/L

Determinación/Parámetro	Método		Límite de Detección
Coliformes Fecales (Termotolerantes)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed.2017. Part 9221 E-1. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedure. Thermotolerant coliform test (EC medium)		1.8 NMP/100mL
Coliformes Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Ed.2017. Part 9221 B. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique		1.8 NMP/100mL
Metales Totales y Metales Disueltos	Aluminio	EPA Method 200.7 Revision 4.4. 1994. Determination of metals and trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry	0.02 mg/L
	Cobre		0.003 mg/L
	Plata		0.002 mg/L
	Níquel		0.002 mg/L
	Plomo		0.01 mg/L
	Hierro		0.01 mg/L
	Zinc		0.005 mg/L
	Cadmio		0.001 mg/L
	Boro		0.003 mg/L
	Molibdeno		0.004 mg/L
	Manganeso		0.001 mg/L
	Litio		0.004 mg/L
	Fósforo		0.06 mg/L
	Sílice		0.02 mg/L
	Calcio		0.05 mg/L
	Magnesio		0.02 mg/L
	Sodio		0.01 mg/L
	Potasio		0.01 mg/L

10.2 EVALUACIÓN DE LA RED HIDROGEOQUÍMICA DE MONITOREO

Sólo el sector peruano del área de estudio cuenta con una red de control hidrogeoquímico actual (vigente), la cual está compuesta por 103 pozos distribuidos en todos los distritos que abarca el área de estudio (Papayal, Matapalo, Aguas Verdes y Zarumilla). De acuerdo con la revisión de información existente, no se cuenta con una red de muestreo hidrogeoquímico para el sector ecuatoriano.

La validez de la red fue evaluada considerando los datos del muestreo ejecutado por la ALA Tumbes en junio 2019 y, cuando fue posible su identificación, los datos recogidos en el Inventario 2019 (setiembre-octubre 2019) respecto al estado y profundidad de los pozos y otras observaciones relevantes respecto a su accesibilidad, seguridad, entre otros.

La evaluación de la red de control hidrogeoquímico actual del sector peruano indica:

- Algunos pozos se encuentran en estado No Utilizable (enterrados, inundados, bloqueados),
- Algunos pozos se encuentran secos,
- Significativo porcentaje de los pozos cuentan con una profundidad menor a 5 m, es decir son muy someros, por lo cual podrían no estar representando propiamente a las aguas subterráneas sino agua de infiltración de los ríos y quebradas o una mezcla de ambas, y

- Varios pozos se ubican muy cercanos unos de otros y con profundidades similares (someros generalmente, menores a 10 m de profundidad total) por lo cual representan la misma agua y no ofrecen una útil información.

10.3 TRATAMIENTO DE DATOS

Se evaluó la calidad de los datos de campo y laboratorio mediante el balance iónico, y la comparación de la suma de iones con la conductividad eléctrica (µS/cm) y los sólidos disueltos (mgTDS/L), tal como se detalla a continuación. Además, se compararon metales disueltos y totales, de las muestras duplicadas y un blanco de agua desionizada con concentraciones menores al límite de detección (< LD). Los resultados de estos procedimientos se presentan en el ítem 10.8.

10.3.1 Balance Iónico

Para evaluar la confiabilidad y calidad de los análisis químicos, se calculó el balance iónico de cada muestra mediante los:

- Cationes principales Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, y
- Aniones principales HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, F^-, NO_3^-, a través de la siguiente fórmula estándar:

$$\text{Error del balance iónico} = \frac{\sum \textbf{cationes} - \sum \textbf{aniones}}{\sum \textbf{cationes} + \sum \textbf{aniones}} \left(\frac{meq}{meq}\right) * 100\ \% \qquad (1)$$

con:

$$c_{eq}[meq/L] = \frac{m[mg]}{V[L] * M[g/mol]} * carga\ del\ ión \qquad (2)$$

Los resultados muestran un signo positivo cuando predominan los cationes y negativo cuando predominan aniones. Los análisis químicos se consideran aceptables con un error del balance iónico (IBE) de ±10%, para análisis de aguas dulces. También se puede calcular el error aceptable en función a la conductividad eléctrica, es decir, aceptando mayores errores en aguas poco mineralizadas:

$$IBE\ aceptable\ (\%) = \pm 507 * EC(\mu S/cm)^{-0.5461} \qquad (3)$$

En las aguas de pH neutro (7 - 8) predominan los cationes principales disueltos Ca^{2+}, Mg^{2+} y Na^{+}, así como los aniones principales HCO_3^-, SO_4^{2-} y Cl^-, mientras la solubilidad y consecuentemente la concentración de metaloides y metales pesados es tan baja que no contribuyen significantemente al balance iónico

Los datos son además corroborados por la conductividad eléctrica (EC en µS/cm), registrada en campo, y los sólidos disueltos (mg TDS/ L) del laboratorio, y que, divididos entre 100 y 70, deben aportar resultados similares a la suma de los aniones y cationes (en meq/L):

$$\sum Aniones \approx \sum Cationes\ (meq/L) \approx EC/100\ (\mu S/cm) \approx TDS/70\ (mg/L) \qquad (4)$$

10.3.2 Metales Totales y Disueltos

Los metales disueltos representan la fracción presente en solución o en partículas menores a los 0.45 µm; mientras que los totales a la fracción presente en solución y en partículas suspendidas. En ningún caso, las concentraciones de metales totales deben ser menores a las concentraciones de metales disueltos. De resultar esta relación, los datos deben ser rechazados.

10.3.3 Análisis de Duplicados y Blancos

Las muestras duplicadas tomadas proveen una indicación de la varianza de cada parámetro analizado, causado por errores de muestreo y/o instrumentales. La buena concordancia entre las concentraciones de muestras duplicadas y originales confirma la buena replicabilidad de la metodología de muestreo y la consistencia de análisis del laboratorio.

La calidad de datos es estadísticamente controlada mediante cálculo de la diferencia porcentual relativa (DPR) entre resultados de muestras duplicadas. Los resultados inferiores a los 10 % son considerados aceptables y valores >10 % indican posibles errores durante el análisis de las muestras en laboratorio y/o potenciales fuentes de contaminación de las muestras durante su obtención, preservación, almacenamiento y/o transporte.

La metodología del DPR es recomendada por la Guía Funcional Nacional del Programa de Contratación de Laboratorio para la Revisión de Datos Inorgánicos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2016) y los *Standard Methods for Water and Waste Water* (APHA, 2017).

El cálculo, similar al balance iónico, es el siguiente:

$$\text{DPR} = \frac{MO - MD}{\frac{MO + MD}{2}} * 100\ \%$$

Donde:
DPR: Diferencia Porcentual Relativa (%).
MO: Valor muestra original (o medido en laboratorio).
MD: Valor muestra duplicado (o calculado/medido in situ).

Se aplica el cálculo del DPR solamente a aquellos valores de la muestra duplicada y de la muestra original, que son igual o mayores que cinco veces el límite de detección del método (5×LD), debido a que se magnifican los errores relativos cerca al límite de detección (LD) de elementos traza. Para los análisis de los duplicados enviados al laboratorio, se aplica un criterio de control de 20 % para la DPR. Si se supera el criterio de control, todos los resultados relacionados se resaltan y se consideran como estimados.

Adicionalmente se analizó un blanco de agua desionizada para demostrar que todos los parámetros estén por debajo del LD, presentado como mitad del LD.

10.4 NORMATIVA DE CALIDAD DE AGUA

Actualmente, no se han establecido lineamientos específicos para la calidad aguas subterráneas ni en Perú ni Ecuador; por lo que, de manera referencial se han considerado en la evaluación, la normativa establecida en ambos países para agua superficial. Asimismo, considerando que todos los pozos muestreados son para consumo humano se ha considerado adicionalmente los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable (WHO, 2011).

10.4.1 Normativa Peruana

El Perú cuenta con lineamientos de calidad de agua establecidos mediante los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECAs agua), aprobados por Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (MINAM, 2017). De manera referencial, atendiendo al uso actual del agua de los pozos identificados en el inventario 2019 y su uso potencial, los resultados obtenidos fueron comparados con los lineamientos establecidos por el ECA para agua, categoría 1A1 (agua que puede ser potabilizada con simple desinfección) y categoría 3 D1 (riego de vegetales). La Tabla 10-5 presenta la normativa peruana aplicable a los usos de agua identificados en los pozos muestreados en el sector peruano; así como, su uso potencial.

Tabla 10-5: Normativa Peruana de Calidad de Agua

Parámetro	Unidad	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua[2] - ECA agua	
		Categoría 1 A1: Agua que puede ser potabilizada con desinfección	Categoría 3 D1: Riego vegetales
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3
pH	Unidad de pH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5
Conductividad	µmho/cm	1500	2500
Oxígeno disuelto	mg/L	≥ 6	> 4
CN Total	mg/L	0.07	
HCO3 -	mg HCO3-/L		518
F-	mg/L	1.5	1
Cl-	mg/L	250	500
NO2-	mg/L	3	10
NO3-	mg/L	50	100
SO42-	mg/L	250	1000
PO43	mg/L	0.1	
HPO42-P	mg/L	0.1	
NO2-N	mg/L	1	
NO3-N	mg/L	11	
NH4	mg/L	1.5	
STD	mg/L	1000	
Coliformes Fecales	NMP/100mL	20	1000
Coliformes Totales	NMP/100mL	50	
Metales Totales			
Al(t)	mg/L	0.9	5
As(t)	mg/L	0.01	0.1
Ba(t)	mg/L	0.7	0.7
Be(t)	mg/L	0.012	0.1
Bi(t)	mg/L		
B(t)	mg/L	2.4	1
Cd(t)	mg/L	0.003	0.01
Co(t)	mg/L		0.05
Cr(t)	mg/L	0.05	0.1
Cu(t)	mg/L	2	0.2

Parámetro	Unidad	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua[2] - ECA agua	
		Categoría 1 A1: Agua que puede ser potabilizada con desinfección	Categoría 3 D1: Riego vegetales
Fe(t)	mg/L	0.3	5
Li(t)	mg/L		2.5
Mn(t)	mg/L	0.4	0.2
Mo(t)	mg/L	0.07	
Ni(t)	mg/L	0.07	0.2
P(t)	mg/L	0.1	
Pb(t)	mg/L	0.01	0.05
Sb(t)	mg/L	0.02	
Se(t)	mg/L	0.04	0.02
Zn(t)	mg/L	3	2

Fuente: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (MINAM, 2017).

10.4.2 Normativa Ecuatoriana

El Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) emitido mediante Decreto Legislativo N° 3516-2003,en su Libro VI del Anexo 1 establece lineamientos de calidad ambiental para agua de acuerdo con los usos. Así, de manera referencial, atendiendo al uso actual del agua de los pozos identificados en el inventario 2019 y su uso potencial, los resultados obtenidos fueron comparados con los lineamientos establecidos para aguas para uso doméstico como uso actual, y para uso agrícola como uso potencial. La Tabla 10-6 presenta la normativa ecuatoriana aplicable a los usos de agua identificados en los pozos muestreados en el sector ecuatoriano.

Tabla 10-6: Normativa Ecuatoriana de Calidad de Agua

Parámetro	Unidad	TULSMA[3] Libro VI, Anexo 1	
		Tabla 2: Consumo humano y doméstico y que para su potabilización solo requieren desinfección	Tabla 4: Uso agrícola en riego
pH	Unidad de pH	6.0-9.0	6.0-9.0
Conductividad	µmho/cm		
Oxígeno disuelto	mg/L	>75% del OD sat	
CN Total	mg/L	0.2	
F-	mg/L		1
Cl-	mg/L	250	
NO2-	mg/L	1	0.5
NO3-	mg/L	10	
SO42-	mg/L	250	250
Coliformes Fecales	NMP/100mL	20	1000
Coliformes Totales	NMP/100mL	200	
Metales Totales			
Ag(t)	mg/L	0.05	
Al(t)	mg/L	0.1	5
As(t)	mg/L	0.018	0.1
Ba(t)	mg/L	1	

Parámetro	Unidad	TULSMA[3] Libro VI, Anexo 1	
		Tabla 2: Consumo humano y doméstico y que para su potabilización solo requieren desinfección	Tabla 4: Uso agrícola en riego
Be(t)	mg/L		0.1
B(t)	mg/L		0.75
Cd(t)	mg/L	0.01	0.05
Co(t)	mg/L		0.01
Cu(t)	mg/L	1	0.2
Fe(t)	mg/L	0.3	5
Li(t)	mg/L		2.5
Mn(t)	mg/L		0.2
Mo(t)	mg/L		0.1
Ni(t)	mg/L		0.2
Pb(t)	mg/L	0.05	5
Se(t)	mg/L	0.01	0.02
V(t)	mg/L		0.1
Zn(t)	mg/L	5	2

Fuente: Decreto Legislativo N° 3516-2003, Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente de Ecuador

10.4.3 Lineamientos Internacionales

Considerando que todos los puntos de muestreo fueron establecidos en pozos con fines de agua para consumo humano, los resultados de calidad serán comparados referencialmente con los lineamientos establecidos por la OMS para agua potable (WHO, 2011), los cuales se presentan en la Tabla 10-7.

Tabla 10-7: Lineamientos Internacionales de Calidad de Agua Potable

Parámetro	Unidad	Lineamientos para Agua de Consumo (Drinking Water Guidelines) de la Organización Mundial de la Salud (OMS)
pH	Unidad de pH	6.5 - 9.5
F-	mg/L	1.5
Cl-	mg/L	
NO2-	mg/L	3
NO3-	mg/L	50
SO42-	mg/L	500
NO2-N	mg/L	1
NO3-N	mg/L	11
STS	mg/L	5
STD	mg/L	1000
Coliformes Fecales	NMP/100mL	1.8
Al(t)	mg/L	0.2
As(t)	mg/L	0.01
Ba(t)	mg/L	0.7
B(t)	mg/L	0.5
Cd(t)	mg/L	0.003

Parámetro	Unidad	Lineamientos para Agua de Consumo (Drinking Water Guidelines) de la Organización Mundial de la Salud (OMS)
Cr(t)	mg/L	0.05
Cu(t)	mg/L	2
Fe(t)	mg/L	2
Mn(t)	mg/L	0.4
Mo(t)	mg/L	0.07
Na(t)	mg/L	200
Ni(t)	mg/L	0.07
P(t)	mg/L	0.1
Pb(t)	mg/L	0.01
Sb(t)	mg/L	0.02
Se(t)	mg/L	0.01
Zn(t)	mg/L	3

Fuente: Guidelines for Drinking - Water Quality 4th ed. (WHO, 2011)

10.5 RESULTADOS

10.5.1 Calidad del Agua Subterránea

Los resultados obtenidos fueron comparados con los lineamientos establecidos en la normativa peruana y ecuatoriana para aguas de consumo humano y riego de vegetales, detallados en el ítem 10.4, atendiendo al uso actual de los pozos muestreados y su uso potencial, respectivamente.

10.5.1.1 Parámetros de Campo

Los resultados de los parámetros medidos en campo fueron comparados con los lineamientos establecidos por el ECA para agua, categoría 1A1 (agua que puede ser potabilizada con simple desinfección) y categoría 3 D1 (riego de vegetales) de Perú y por los lineamientos de agua de Ecuador, atendiendo al uso actual de los pozos muestreados y su uso potencial, respectivamente, tal como se muestra en la Tabla 10-8.

Los resultados muestran valores que no cumplen el lineamiento establecido por los ECAs de agua para consumo humano (categoría 1 A1) del Perú, lo cual constituye su uso actual, superándolo en 4 de las 10 muestras analizadas para conductividad. En cuanto a los ECAs de agua para riego de vegetales (categoría 3 D1), los resultados indican que ninguna de las 10 muestras presenta un valor de conductividad por encima del lineamiento establecido.

En ningún caso se superó el rango de pH (6 – 9 u.e.), único parámetro fisicoquímico medido en campo regulado por la normativa ecuatoriana para aguas de consumo humano y doméstico (Tabla 2) ni agrícola (Tabla 4) del Libro VI del Anexo 1 del TULSMA.

Tabla 10-8: Parámetros de Campo de Calidad del Agua Subterránea

Parámetro	Unidad	Normativa Peruana		Normativa Ecuatoriana		Lineamientos para Agua de Consumo (Drinking Water Guidelines) de la Organización Mundial de la Salud (OMS)[3]	Puntos de Muestreo									
		Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua[1]		TULSMA[2] Libro VI Anexo 1			P.B.-Tutumo (H3-MAT-014) (PER-772)	P.B.-Noblecilla (H3-MAT-096) (PER-214)	P.B.-Palmales (H1-PAL-011) (ECU-25)	P.B.-Q. Seca (H1-QUE-053) (ECU-251)	P.B.-Lechugal (H3-PPY-040) (PER-66)	P.B.-Balsalito (H1-CHA-168) (ECU-505)	P.B.-Chacras (H2-CHA-170) (ECU-420)	P.B.-Papayal (H1-PPY-325) (PER-803)	AA.PP-Zarumilla (H1-ZAR-327) (PER-844)	AA.PP-Huaquillas (H2-HUA-250) (ECU-515)
		Categoría 1 A1: Agua que puede ser potabilizada con desinfección	Categoría 3 D1: Riego vegetales	Tabla 2: Consumo humano y doméstico y que para su potabilización solo requieren desinfección	Tabla 4: Uso agrícola en riego		29/09/2019 11:08:00	27/09/2019 11:15:00	2/10/2019 15:00:00	27/09/2019 17:50:00	30/09/2019 09:00:00	28/09/2019 13:30:00	29/09/2019 17:00:00	1/10/2019 12:50:00	1/10/2019 09:50:00	2/10/2019 15:00:00
Temperatura del Agua	(Cº)	Δ 3	Δ 3				18.8	29.0	27.7	26.0	26.5	28.4	28.0	26.0	27.2	29.5
pH	Unidades de pH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.0-9.0	6.0-9.0	6.5 - 9.5	6.5	7.14	7.05	7.62	7.15	7.14	7.06	7.18	7.06	7.70
C.E. (µs/cm)	µmho/cm	1500	2500				586.0	900.0	1092.0	1578.0	678.0	782.0	1765.0	1668.0	1992.0	1186.0
STD (mg/L)	mg/L	1000					295.0	405.0	556.0	795.0	345.0	390.0	865.0	830.0	990.0	595.0

Fuente:
(1) Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (MINAM, 2017)
(2) Decreto Legislativo N° 3516-2003, Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente de Ecuador
(3) Guidelines for Drinking - Water Quality 4th ed. (WHO, 2011)
Fichas de Campo (véase Anexo VI-A)
Nota:
No cumple con el lineamiento establecido por el ECA para agua Categoría 1 A1 de la normativa peruana

10.5.1.2 Parámetros Químicos del Agua Subterránea

La 10-9 presenta los resultados químicos completos de calidad del agua y su evaluación referencial con la normativa peruana y ecuatoriana. Los informes de ensayo del laboratorio completos se presentan en el Anexo VI-C.

Los resultados (véase Tabla 10-9) muestran valores que superan los lineamientos establecidos por los ECAs agua para consumo humano (categoría 1 A1) del Perú, lo cual constituye su uso actual, para cloruros (P.B. Chacras, P.B. Qda. Seca, AA.PP-Zarumilla y P.B Papayal), sólidos totales disueltos (AA.PP-Zarumilla), y fósforo y todos sus compuestos analizados en una cantidad entre 2 y 4 de las 10 muestras analizadas (P. B Tutumo, P.B. Qda. Seca, P.B. Noblecilla y P.B Lechugal). En cuanto a los parámetros microbiológicos, el conteo de los coliformes fecales superó en 3 de las 10 muestras analizadas el lineamiento establecido (P.B Lechugal, P.B. Balsalito y P.B Papayal); así mismo, el lineamiento de coliformes totales fue también excedido en una de las 10 muestras analizadas (P.B Papayal). Finalmente, en cuanto a los metales totales se presentaron concentraciones de boro (P.B. Qda. Seca) y manganeso (P.B. Balsalito) que superan el lineamiento en una de las 10 muestras analizadas.

En cuanto a los ECAs aguas para riego de vegetales (categoría 3 D1), los resultados indican que solo 1 de las 10 muestras analizadas presenta concentraciones por encima de los lineamientos establecidos para cloruros (AA.PP-Zarumilla). En cuanto a los parámetros microbiológicos, el conteo de los coliformes fecales superó el lineamiento en 2 de las 10 muestras analizadas (P.B Papayal y AA.PP-Zarumilla), y el de coliformes totales en 1 muestra (P.B Papayal). En cuanto a los metales totales, se observaron concentraciones que superan el lineamiento para esta categoría de uso de agua establecido para el boro (P.B. Q. Seca) y manganeso (P.B Balsalito).

Comparando los resultados con los lineamientos de calidad de agua ecuatorianos, ninguna de las muestras excede los lineamientos aplicables para aguas de consumo doméstico; a excepción de los cloruros en 4 de las 10 muestras analizadas (P.B. Chacras, P.B. Qda. Seca, AA.PP-Zarumilla y P.B Papayal). Evaluando los parámetros microbiológicos, se observa que para coliformes fecales 3 de las muestra analizadas (P. B. Balsalito, P. B Lechugal y P.B Papayal) superaron el lineamiento establecido para este parámetro de calidad; así también, el lineamiento para coliformes totales fue excedido en una muestra (P.B Papayal). Ninguna muestra analizado superó el lineamiento ecuatoriano para aguas para consumo doméstico.

En cuanto al lineamiento establecido por la normativa ecuatoriana para aguas para riego, solo alguna (una) de las 10 muestras analizadas presenta concentración por encima de los lineamientos establecidos para el manganeso (P.B Balsalito), boro (P.B. Q. Seca) y coliformes fecales (P.B Papayal).

Al comparar los resultados obtenidos en las 10 muestras analizadas, se observa que 3 de estas (P.B Lechugal, P.B. Balsalito y P.B Papayal) superan el lineamiento de la OMS para coliformes fecales (1.8 NMP/100 ml), más restrictivo que los de la normativa peruana y ecuatoriana. Se superó en 4 de 10 muestras el lineamiento del fósforo (P.B Tutumo, P.B. Noblecilla, P.B. Lechugal y P.B Balsalito) y en una de las 10 muestras el lineamiento para boro (P.B. Qda. Seca). Las concentraciones de sodio total superaron en 6 de 10 muestras (P.B Palmales, P.B. Qda. Seca, P.B. Chacras, P.B Papayal, AA.PP Zarumilla y AA.PP Huaquillas), parámetro solo regulado por la OMS basado en el sabor, y no en aspectos de salud.

Tabla 10-9: Parámetros Químicos de Calidad del Agua Subterránea

Parámetro	Unidad	LD*	Normativa Peruana		Normativa Ecuatoriana		Lineamientos para Agua de Consumo (Drinking Water Guidelines) de la Organización Mundial de la Salud (OMS)[3]	Puntos de Muestreo									
			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua[1]		TULSMA[2] Libro VI Anexo 1			P.B.-Tutumo (H3-MAT-014) (PER-772)	P.B.-Noblecilla (H3-MAT-096) (PER-214)	P.B.-Palmales (H1-PAL-011) (ECU-25)	P.B.-Q. Seca (H1-QUE-053) (ECU-251)	P.B.-Lechugal (H3-PPY-040) (PER-66)	P.B.-Balsalito (H1-CHA-168) (ECU-505)	P.B.-Chacras (H2-CHA-170) (ECU-420)	P.B.-Papayal (H1-PPY-325) (PER-803)	AA.PP-Zarumilla (H1-ZAR-327) (PER-844)	AA.PP-Huaquillas (H2-HUA-250) (ECU-515)
			Categoría 1 A1: Agua que puede ser potabilizada con desinfección	Categoría 3 D1: Riego vegetales	Tabla 2: Consumo humano y doméstico y que para su potabilización solo requieren desinfección	Tabla 4: Uso agrícola en riego		29/09/2019 11:08:00	27/09/2019 11:15:00	2/10/2019 15:00:00	27/09/2019 17:50:00	30/09/2019 09:00:00	28/09/2019 13:30:00	29/09/2019 17:00:00	1/10/2019 12:50:00	1/10/2019 09:50:00	2/10/2019 15:00:00
Parámetros Fisicoquímicos e Inorgánicos																	
Temperatura	°C		Δ 3	Δ 3				19.4	19.4	19.6	19.6	19.2	19.2	19.4	19.4	19.2	19.2
pH	Unid de pH		6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.0-9.0	6.0-9.0	6.5 - 9.5	7	7.1	8	7.8	7.7	7.2	7.7	7.7	7.7	8
C.E. (µs/cm)	µmho/cm		1500	2500				588	584	1143	1522	617	547	1639	1505.0	2604	1147
Oxígeno disuelto	mg/L	0.1	≥ 6	> 4	>75% del OD sat			7.8	7.4	7.3	6.5	7.8	5.9	5.6	5.1	4.4	5.8
CN Total	mg/L	0.01	0.07		0.2			0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.043	0.005	0.005
Alcalinidad Total	mg CaCO3/L	1						113.8	135.6	179.7	196.5	86.1	90.9	137.5	170.4	136.7	180.5
HCO3 -	mg HCO3-/L	1.5		518				139	165	219	240	105	111	168	208	167	220
CO3 =	mg CO3=/L	1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Acidez Total	mg CaCO3/L	1						58	51	84	49	35	50	67	48	83	36
Br-	mg/L	0.03						0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
F-	mg/L	0.01	1.5	1		1	1.5	0.473	0.617	0.252	0.421	0.199	0.195	0.114	0.254	0.138	0.285
Cl-	mg/L	0.02	250	500	250			61.66	48.59	180.59	269.28	85.69	60.25	368.02	*260.43*	*735.84*	186.47
NO2-	mg/L	0.03	3	10	1	0.5	3	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
NO3-	mg/L	0.06	50	100	10		50	0.8	5.96	0.46	1.32	0.2	0.16	1.17	1.01	0.33	0.54
SO42-	mg/L	0.02	250	1000	250	250	500	66.33	59.51	77.33	127.89	75.32	75.92	109.74	166.47	63.12	81.38
PO43	mg/L	0.16	0.1					0.16	0.17	0.16	1.09	0.33	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
HPO42-P	mg/L	0.05	0.1					0.05	0.06	0.05	0.36	0.11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NO2-N	mg/L	0.01	1				1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
NO3-N	mg/L	0.01	11				11	0.18	1.35	0.1	0.3	0.05	0.04	0.26	0.23	0.07	0.12
PO43-P	mg/L	0.05	0.1					0.05	0.06	0.05	0.36	0.11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NH4	mg/L	0.04	1.5					0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Bromato	mg/L	0.01						0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
STS	mg/L	5					5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
STD	mg/L	5	1000				1000	398	383	721	878	399	359	991	937	2062	701
S=	mg/L	0						0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Solidos Fijos	mg/L	5						358	343	665	817	359	314	946	887	1482	650
Potencial Redox	mv							254.8	274.4	345.9	197.5	289.1	212.9	205.7	303.5	309.6	151.3
Parámetros Microbiológicos																	
Coliformes Fecales	NMP/100mL	1.8	20	1000	20	1000	1.8	0.55	1.1	0.55	0.55	*46*	*46*	0.55	***16000***	0.55	0.55
Coliformes Totales	NMP/100mL	1.8	50		200			46	2.2	3.6	46	46	46	3.6	*35000*	0.55	0.55
Metales Totales																	
Ag(t)	mg/L	0			0.05			0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Al(t)	mg/L	0.02	0.9	5	0.1	5	0.2	0.03	0.03	0.02	0.06	0.03	0.03	0.01	0.04	0.02	0.03
As(t)	mg/L	0.01	0.01	0.1	0.018	0.1	0.01	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Ba(t)	mg/L	0	0.7	0.7	1		0.7	0.051	0.023	0.054	0.037	0.044	0.095	0.087	0.048	0.287	0.055
Be(t)	mg/L	0	0.012	0.1		0.1		0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Bi(t)	mg/L	0.02						0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
B(t)	mg/L	0	2.4	1		0.75	0.5	0.175	0.214	0.301	**1.673**	0.175	0.129	0.23	0.419	0.15	0.301
Ca(t)	mg/L	0.05						31.62	39.11	7.84	9.58	39.97	32.08	28.72	46.71	161.7	8.04

Parámetro	Unidad	LD*	Normativa Peruana		Normativa Ecuatoriana		Lineamientos para Agua de Consumo (Drinking Water Guidelines) de la Organización Mundial de la Salud (OMS)[3]	Puntos de Muestreo									
			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua[1]		TULSMA[2] Libro VI Anexo 1			P.B.-Tutumo (H3-MAT-014) (PER-772)	P.B.-Noblecilla (H3-MAT-096) (PER-214)	P.B.-Palmales (H1-PAL-011) (ECU-25)	P.B.-Q. Seca (H1-QUE-053) (ECU-251)	P.B.-Lechugal (H3-PPY-040) (PER-66)	P.B.-Balsalito (H1-CHA-168) (ECU-505)	P.B.-Chacras (H2-CHA-170) (ECU-420)	P.B.-Papayal (H1-PPY-325) (PER-803)	AA.PP-Zarumilla (H1-ZAR-327) (PER-844)	AA.PP-Huaquillas (H2-HUA-250) (ECU-515)
			Categoría 1 A1: Agua que puede ser potabilizada con desinfección	Categoría 3 D1: Riego vegetales	Tabla 2: Consumo humano y doméstico y que para su potabilización solo requieren desinfección	Tabla 4: Uso agrícola en riego		29/09/2019 11:08:00	27/09/2019 11:15:00	2/10/2019 15:00:00	27/09/2019 17:50:00	30/09/2019 09:00:00	28/09/2019 13:30:00	29/09/2019 17:00:00	1/10/2019 12:50:00	1/10/2019 09:50:00	2/10/2019 15:00:00
Cd(t)	mg/L	0	0.003	0.01	0.01	0.05	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ce(t)	mg/L	0.02						0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Co(t)	mg/L	0		0.05		0.01		0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Cr(t)	mg/L	0	0.05	0.1			0.05	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Cu(t)	mg/L	0	2	0.2	1	0.2	2	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Fe(t)	mg/L	0.01	0.3	5	0.3	5	2	0.17	0.03	0.01	0.06	0.1	0.19	0.14	0.02	0.08	0.02
K(t)	mg/L	0.01						3.04	3.61	5.6	6.58	4.13	3.76	5.83	13.31	11.07	5.72
Li(t)	mg/L	0		2.5		2.5		0.002	0.002	0.004	0.004	0.002	0.004	0.004	0.002	0.002	0.004
Mg(t)	mg/L	0.02						17.31	21.91	3.63	3.87	15.86	18.04	12.41	26.75	74.09	3.71
Mn(t)	mg/L	0	0.4	0.2		0.2	0.4	0.054	0.002	0.011	0.161	0.112	**0.24**	0.047	0.004	0.033	0.012
Mo(t)	mg/L	0	0.07			0.1	0.07	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Na(t)	mg/L	0.01					200	82.41	68.12	**267.16**	**354.12**	81.16	67.04	**342.98**	**277.44**	**314.71**	**271.52**
Ni(t)	mg/L	0	0.07	0.2		0.2	0.07	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
P(t)	mg/L	0.06	0.1				0.1	0.19	0.14	0.03	0.6	0.25	0.12	0.03	0.03	0.03	0.06
Pb(t)	mg/L	0.01	0.01	0.05	0.05	5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sb(t)	mg/L	0.01	0.02				0.02	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Se(t)	mg/L	0.02	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SiO2(t)	mg/L	0.02						45.67	34.19	25.27	96.8	31.58	33.19	20.44	58.55	40.01	25.57
Sn(t)	mg/L	0.01						0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Sr(t)	mg/L	0						0.2425	0.2475	0.097	0.1143	0.3758	0.273	0.5184	0.4043	1.1914	0.1002
Ti(t)	mg/L	0.01						0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Tl(t)	mg/L	0.05						0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
V(t)	mg/L	0				0.1		0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Zn(t)	mg/L	0.01	3	2	5	2	3	0.012	0.006	0.017	0.007	0.018	0.014	0.037	0.0025	0.021	0.016
Metales Disueltos																	
Ag(d)	mg/L	0						0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Al(d)	mg/L	0.02						0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03
As(d)	mg/L	0.01						0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Ba(d)	mg/L	0						0.048	0.022	0.051	0.035	0.043	0.088	0.085	0.047	0.27	0.051
Be(d)	mg/L	0						0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Bi(d)	mg/L	0.02						0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
B(d)	mg/L	0						0.174	0.209	0.288	1.64	0.172	0.127	0.227	0.416	0.145	0.288
Ca(d)	mg/L	0.05						30.99	38.33	7.7	9.39	39.17	31.83	28.31	45.78	155.71	7.68
Cd(d)	mg/L	0						0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ce(d)	mg/L	0.02						0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Co(d)	mg/L	0						0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Cr(d)	mg/L	0						0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Cu(d)	mg/L	0						0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Fe(d)	mg/L	0.01						0.17	0.02	0.01	0.03	0.01	0.005	0.08	0.02	0.01	0.01
K(d)	mg/L	0.01						2.98	3.54	5.35	6.45	4.1	3.68	5.66	13.04	10.69	5.46
Li(d)	mg/L	0						0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Mg(d)	mg/L	0.02						17.18	21.48	3.57	3.79	15.73	17.88	12.16	26.63	72.58	3.63
Mn(d)	mg/L	0						0.053	0.002	0.011	0.079	0.095	0.042	0.046	0.003	0.032	0.011
Mo(d)	mg/L	0						0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004

Parámetro	Unidad	LD*	Normativa Peruana		Normativa Ecuatoriana		Lineamientos para Agua de Consumo (Drinking Water Guidelines) de la Organización Mundial de la Salud (OMS)[3]	Puntos de Muestreo									
			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua[1]		TULSMA[2] Libro VI Anexo 1			P.B.-Tutumo (H3-MAT-014) (PER-772)	P.B.-Noblecilla (H3-MAT-096) (PER-214)	P.B.-Palmales (H1-PAL-011) (ECU-25)	P.B.-Q. Seca (H1-QUE-053) (ECU-251)	P.B.-Lechugal (H3-PPY-040) (PER-66)	P.B.-Balsalito (H1-CHA-168) (ECU-505)	P.B.-Chacras (H2-CHA-170) (ECU-420)	P.B.-Papayal (H1-PPY-325) (PER-803)	AA.PP-Zarumilla (H1-ZAR-327) (PER-844)	AA.PP-Huaquillas (H2-HUA-250) (ECU-515)
			Categoría 1 A1: Agua que puede ser potabilizada con desinfección	Categoría 3 D1: Riego vegetales	Tabla 2: Consumo humano y doméstico y que para su potabilización solo requieren desinfección	Tabla 4: Uso agrícola en riego		29/09/2019 11:08:00	27/09/2019 11:15:00	2/10/2019 15:00:00	27/09/2019 17:50:00	30/09/2019 09:00:00	28/09/2019 13:30:00	29/09/2019 17:00:00	1/10/2019 12:50:00	1/10/2019 09:50:00	2/10/2019 15:00:00
Na(d)	mg/L	0.01						81.24	66.76	265.98	347.04	80.23	65.97	338.9	266.87	308.42	266.57
Ni(d)	mg/L	0						0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
P(d)	mg/L	0.06						0.17	0.14	0.06	0.59	0.23	0.11	0.06	0.06	0.06	0.06
Pb(d)	mg/L	0.01						0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sb(d)	mg/L	0.01						0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Se(d)	mg/L	0.02						0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SiO2(d)	mg/L	0.02						45.31	33.5	24.96	94.87	31.32	32.71	20.15	57.96	39.35	25.12
Sn(d)	mg/L	0.01						0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Sr(d)	mg/L	0						0.2376	0.2425	0.0942	0.112	0.3683	0.27	0.5037	0.3962	1.1417	0.0944
Ti(d)	mg/L	0.01						0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Tl(d)	mg/L	0.05						0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
V(d)	mg/L	0						0.003	0.003	0.003	0.005	0.003	0.003	0.003	0.009	0.004	0.003
Zn(d)	mg/L	0.01						0.011	0.006	0.011	0.007	0.016	0.011	0.036	0.0025	0.02	0.016

Fuente:

Informe de Ensayo OCT1066.R19 y OCT1090.R19 (CERTIMIN, 2019).

(1) Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (MINAM, 2017).

(2) Decreto Legislativo N° 3516-2003, Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente de Ecuador.

(3) Guidelines for Drinking - Water Quality 4th ed. (WHO, 2011) .

Nota:

(*) LD: Límite de detección

123	Valor en plomo indica que se presentó por debajo del límite de detección del laboratorio (LD). Se incluye el 100% del LD
	No cumple con el lineamiento establecido por el ECA para agua Categoría 1 A1 de la normativa peruana
0.123	No cumple con el lineamiento establecido por el ECA para agua Categoría 3 D1 de la normativa peruana, ni con el lineamiento establecido por el Libro VI Tabla 4 de la normativa ecuatoriana
0.123	No cumple con el lineamiento establecido por el ECA para agua Categoría 1 A1 de la normativa peruana, ni con el lineamiento establecido por el Libro VI Tabla 2 de la normativa ecuatoriana
123	No cumple con los lineamientos establecidos por el ECA para agua Categoría 1 A1 y Categoría 3 D1 de la normativa peruana, ni con el lineamiento establecido por el Libro VI Tabla 2 de la normativa ecuatoriana
	No cumple con el lineamiento establecido por la OMS

10.6 PRINCIPALES ANIONES Y CATIONES

En las aguas subterráneas de los pozos muestreados en el acuífero transfronterizo Zarumilla predominan generalmente el Na^+ y Cl^-, excepto en las aguas subterráneas bicarbonatadas de recarga reciente en el sureste del área de estudio (muestras de los pozos P.B.-Tutumo y P.B.-Noblecilla), donde los coluviales y aluviales (con arcillas, limos, arenas), y las rocas ígneas intrusivas y metamórficas meteorizadas, no aportan las cantidades de Cl^- como los evaporitas intercalados en los depósitos marinos en la parte más baja de la cuenca.

Predomina el Na^+ como principal catión en todas las aguas subterráneas y el Cl^- como principal anión en 8 de los 10 pozos analizados (véase Gráfico 10-1). En estudios del proyecto binacional Puyango-Tumbes (2003) se asignaba el predominio de Cl^- y Na^+ mayormente a pozos profundos con más de 50 m en la zona saturada. Aun así, no se trata de aguas subterráneas viejas saladas con avanzada evolución hacia la composición química del mar (secuencia Chebotarev), donde suelen predominar el Cl^- y el Na^+ en similares concentraciones. El Cl^-, el SO_4^{2-} y parte del Na^+ pueden provenir de intercalaciones evaporíticas en los sedimentos Terciarios y Cuaternarios (depósitos y terrazas marinas) y/o de flujo base parcialmente salada en los ríos y quebradas próximos a los pozos.

Las concentraciones de Na^+ siempre superiores a las de Cl^- indican un generalizado intercambio de cationes en los sedimentos arcillosos de la cuenca baja del Zarumilla:

$$\mathbf{Na_2 - arcillas} + \mathbf{Ca^{2+}/Mg^{2+}} \rightarrow \mathbf{Ca/Mg - arcillas} + \mathbf{2Na^+} \quad \textbf{(I)}$$

La hidroquímica es completamente controlada por los iones mayoritarios. Los metaloides y metales pesados existen solo en concentraciones traza, y representan en total menos de 0.2 eq.% de los cationes, debido a su baja solubilidad a pH y siempre neutro (7-8 u.e.) (véase Gráfico 10-2 y Tabla 10-10). En consecuencia, ninguno de los metales traza excede los límites de potabilidad de la normativa peruana y ecuatoriana en los 10 pozos analizados.

El contacto exclusivo con aluminosilicatos (aluviales y coluviales, y los intrusivos y metamórficos meteorizados) deja las aguas subterráneas mayormente sub-saturadas de Calcita (SI-$CaCO_3$ = 0 a -1.2).

Gráfico 10-1: Diagrama Ternario Piper de las Aguas Subterráneas de los 10 pozos

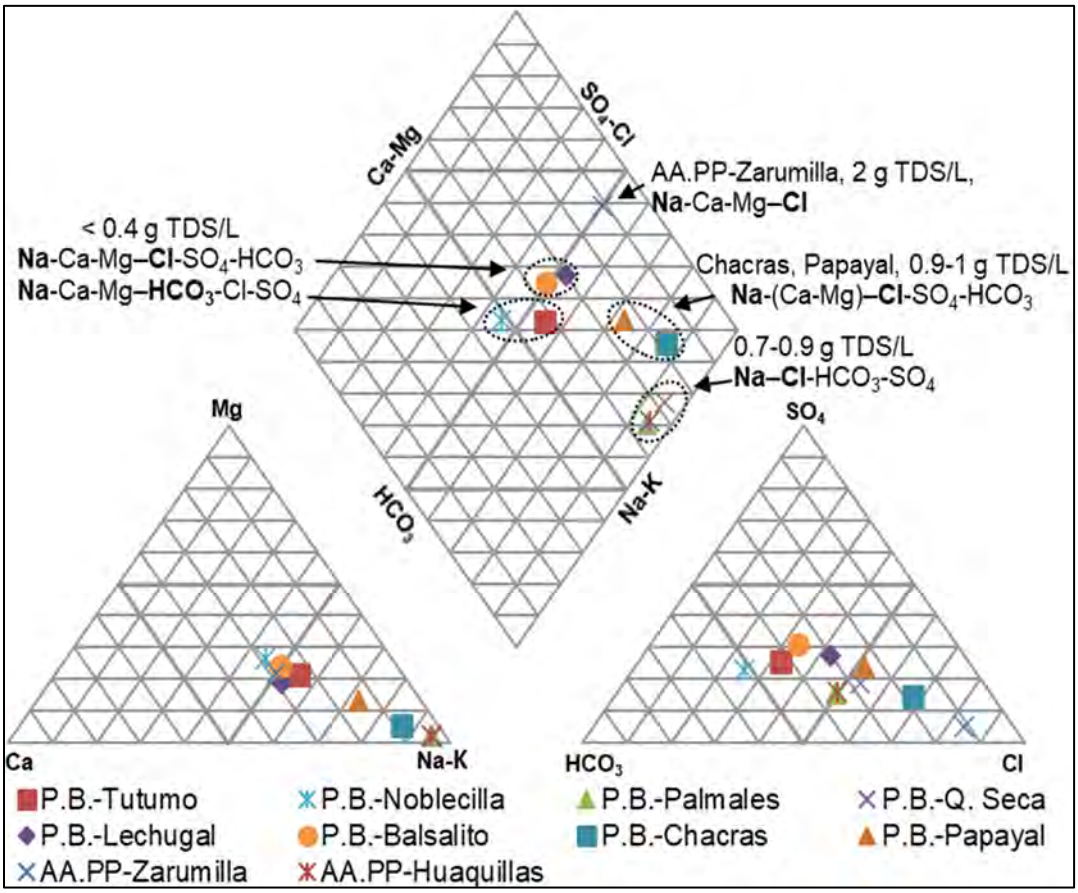


Gráfico 10-2: Concentraciones de NO3- y Metales Traza (meq/L) en las Aguas Subterráneas

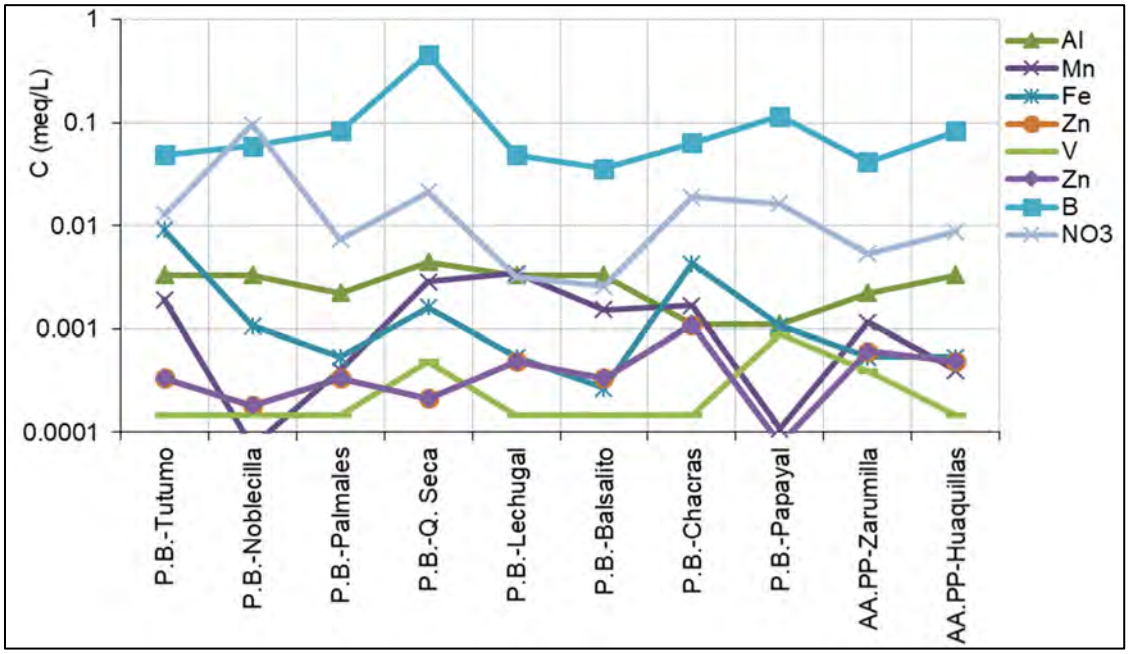


Tabla 10-10: TDS (mg/L), pH, Dureza, Saturación de Calcita y Tipo de Aguas, Basado en eq.% de los Iones

Pozo	HCO_3	SO_4	Cl	NO_3	Ca	Mg	Na	K	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	∑ Metales Traza	TDS	pH	Dureza Total	SI $CaCO_3$	Tipo de Agua
	eq.%														mg/l	u.e.	mg $CaCO_3$/L		> 10 eq.%
P.B.-Tutumo	42	26	32	0.3	23	21	54	1.2	0.1	0.03	0.1	0	0	0.2	398	7.0	149	-1.2	**HCO_3**-Cl-SO_4 - **Na**-Ca-Mg
P.B.-Noblecilla	50	23	25	2	29	26	43	1.4	0	0	0	0	0	0.1	383	7.1	184	-0.9	**HCO_3**-Cl-SO_4 - **Na**-Ca-Mg
P.B.-Palmales	35	16	49	0.1	3.1	2.4	93	1.1	0	0	0	0	0	0	721	8.0	34	-0.7	**Cl**-HCO_3-SO_4 - **Na**
P.B.-Q. Seca	28	19	53	0.2	2.9	1.9	94	1	0	0.02	0	0	0	0.1	878	7.8	39	-0.8	**Cl**-HCO_3-SO_4 - **Na**
P.B.-Lechugal	30	27	42	0.1	29	19	51	1.5	0	0.05	0	0	0	0.1	399	7.7	163	-0.5	**Cl**-SO_4-HCO_3 **- Na** Ca-Mg
P.B.-Balsalito	36	31	33	0.1	26	24	48	1.6	0.1	0.03	0	0	0	0.1	359	7.2	153	-1.1	**Cl**-SO_4-HCO_{3-} **- Na**-Ca-Mg
P.B.-Chacras	18	15	67	0.1	8.2	5.8	85	0.8	0	0.01	0	0	0	0	991	7.7	121	-0.6	**Cl**-SO_4-HCO_3 **- Na**
P.B.-Papayal	24	24	52	0.1	14	13	71	2	0	0	0	0	0	0	937	7.7	224	-0.2	**Cl**-SO_4-HCO_{3-} **- Na**-Ca-Mg
AA.PP-Zarumilla	11	5,3	84	0	28	22	49	1	0	0	0	0	0	0	2062	7.7	688	0.07	**Cl - Na**-Ca-Mg
AA.PP-Huaquillas	34	16	50	0.1	3.1	2.4	93	1.1	0	0	0	0	0	0	701	8.0	34	-0.7	**Cl**-HCO_3-SO_4 - **Na**

Leyenda:

Agua subterránea joven bicarbonatada, < 0.4 g TDS/L

Agua subterránea clorurada, < 0.4 g TDS/L

Agua subterránea clorurada, 0.7-0.9 g TDS/L

Agua clorurada de avanzada mineralización, 0.9-1 g TDS/L

AA.PP-Zarumilla, parcial recarga urbana con $CaCl_2$, 2 g TDS/L

Se descomponen alumino-silicatos primarios, como feldespatos, particularmente plagioclasas, que se transforman muy lentamente a minerales de arcilla como caolinita, montmorillonita, gibbsita (bauxita) (APPELO & POSTMA 2004; 376-378):

$$\underset{\textit{Plagioclasa (Anortita)}}{CaAl_2Si_2O_8} + 2H^+ + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + \underset{\textit{Kaolinita}}{Al_2Si_2O_5(OH)_4} \qquad \textbf{(II)}$$

$$\underset{\textit{Piroxeno (Augita)}}{CaMg_{0.7}Al_{0.6}Si_{1.7}O_6} + 3.4H^+ + 1.1H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 0.7Mg^{2+} + \underset{\textit{Kaolinita}}{0.3Al_2Si_2O_5(OH)_4} + 3H_3SiO_4 \qquad \textbf{(III)}$$

$$\underset{\textit{Albita}}{NaAlSi_3O_8} + H^+ + 7H_2O \rightarrow Na^{2+} + \underset{\textit{Gibbsita (Bauxita)}}{Al(OH)_3} + 3H_3SiO_4 \qquad \textbf{(IV)}$$

Los potenciales redox entre 151-346 mV ORP (≈ 360-550 mV Eh con referencia al electrodo estándar de hidrógeno, SHE) y 4-8 mg O_2/L demuestran aguas subterráneas someras, cerca al nivel freático, con condiciones óxicas todavía poco afectadas por reducción de O_2 y NO_3^- , a pesar de que la vegetación en la superficie aporta abundante carbón orgánico disuelto y en suspensión que facilitan la actividad microbiológica y reducción de los oxidantes O_2 y NO_3^- en la zona saturada. Las concentraciones trazas de Fe, Mn y otros metales pesados y metaloides y la moderada mineralización también confirman que no se bombeó en ningún pozo agua subterránea de profundidad subóxica con condiciones reductoras de Mn (IV) y Fe(III), donde aparecería sobretodo mayor contenido de Fe (II) y metales traza liberados durante la reducción de $Fe(OH)_3$/FeOOH.

10.7 CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La Figura 10-2 presenta los diagramas *stiff* de las aguas subterráneas muestreadas. Como se observa en la Tabla 10-11 se han identificado dos familias de agua.

Tabla 10-11: Tipos de Aguas

Pozo	Familia de Agua	Tipo de agua
		> 10 eq.%
P.B.-Tutumo	Bicarbonatada sódica	**HCO_3**-Cl-SO_4 - **Na**-Ca-Mg
P.B.-Noblecilla	Bicarbonatada sódica	**HCO_3**-Cl-SO_4 - **Na**-Ca-Mg
P.B.-Palmales	Clorurada sódica	**Cl**-HCO_3-SO_4 - **Na**
P.B.-Q. Seca	Clorurada sódica	**Cl**-HCO_3-SO_4 - **Na**
P.B.-Lechugal	Clorurada sódica	**Cl**-SO_4-HCO_3 - **Na** Ca-Mg
P.B.-Balsalito	Clorurada sódica	**Cl**-SO_4-HCO_3- - **Na**-Ca-Mg
P.B.-Chacras	Clorurada sódica	**Cl**-SO_4-HCO_3 - **Na**
P.B.-Papayal	Clorurada sódica	**Cl**-SO_4-HCO_3- - **Na**-Ca-Mg
AA.PP-Zarumilla	Clorurada sódica	**Cl** - **Na**-Ca-Mg
AA.PP-Huaquillas	Clorurada sódica	**Cl**-HCO_3-SO_4 - **Na**

Leyenda:

- *Agua subterránea joven bicarbonatada, < 0.4 g TDS/L*
- *Agua subterránea clorurada, < 0.4 g TDS/L*
- *Agua subterránea clorurada, 0.7-0.9 g TDS/L*
- *Agua clorurada de avanzada mineralización, 0.9-1 g TDS/L*
- *AA.PP-Zarumilla, parcial recarga urbana con $CaCl_2$, 2 g TDS/L*

Figura 10-2: Diagramas *Stiff* de las Aguas Subterráneas

Se diferencia generalmente dos grupos de agua subterránea en los 10 pozos:

- Aguas someras poco mineralizadas (547-617 µS/cm) de tipo **HCO_3**-Cl-SO_4-**Na**-Ca-Mg en **Tutumo** y **Noblecilla** y tipo **Cl**-SO_4-HCO_3-**Na**-Ca-Mg en **Lechugal** y **Balsalito**.
- Agua de equilibrio avanzado con la litología alumino-silicatada que se refleja en la mineralización relativamente mayor (1143-1522 µS/cm) de tipo **Cl**-(SO_4-HCO_3)-**Na**-(Ca-Mg), es decir mayor predominio de Cl^- y Na^+, y un ligero aumento del pH a 7.8-8.0.

Estos tipos de agua, de acuerdo con su mineralización, se describe a continuación.

10.7.1 Aguas Poco Mineralizadas

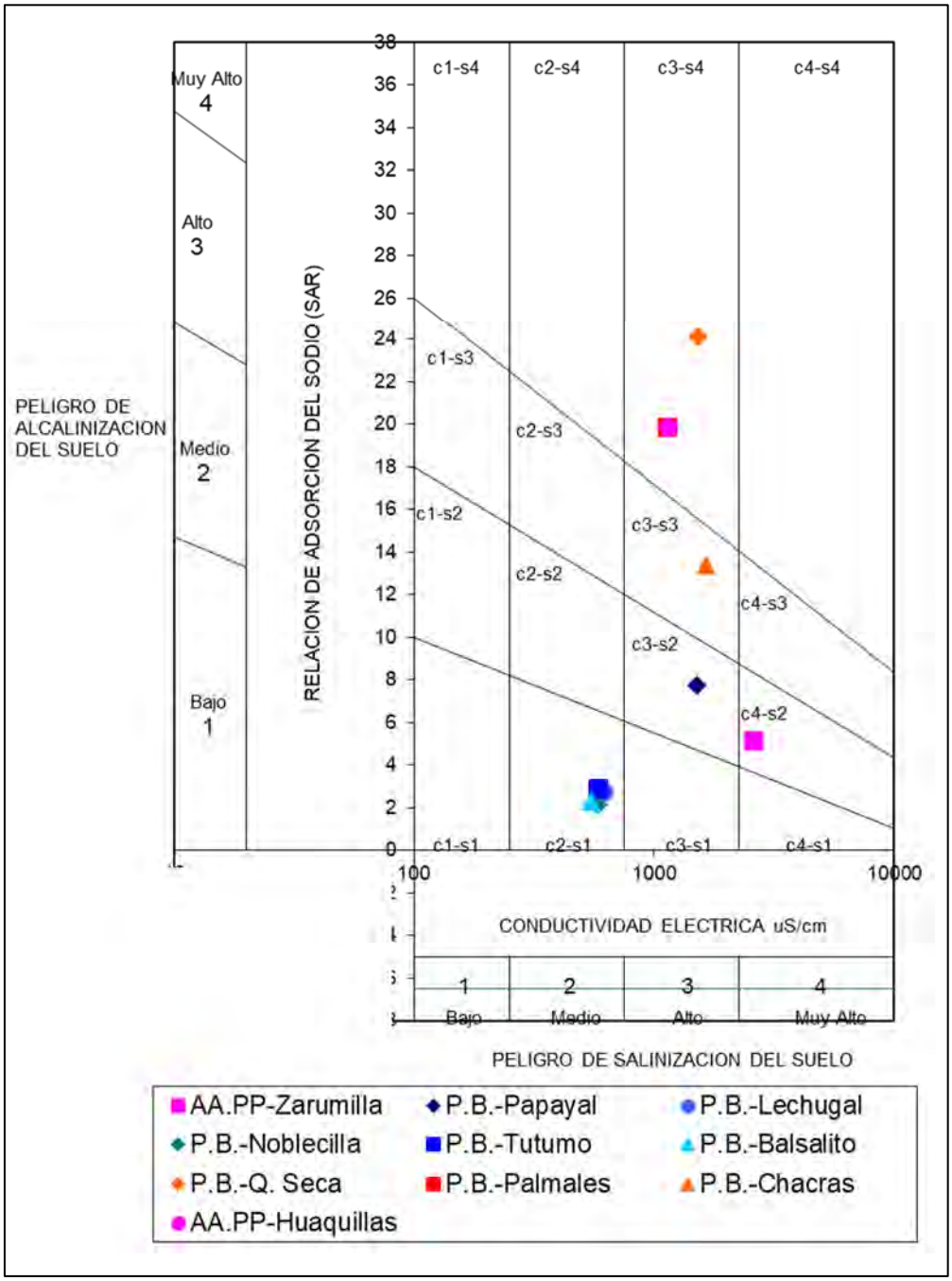
Aguas bicarbonatadas relativamente poco mineralizadas (588 y 584 µS/cm, 398 y 383 mg TDS/L, tipo **HCO_3**-Cl-SO_4- **Na**-Ca-Mg), indican a agua subterránea somera relativamente joven en los pozos de P.B.-Tutumo y P.B.-Noblecilla, donde tal vez ya influye la recarga de los aluviales por los ríos a solo 50 y 150 m de distancia al inicio de la temporada de lluvias en octubre del 2019. El poco equilibrio con la litología alumino-silicatada (feldespatos primarios, arcillas, limos, arenas, etc.) se refleja también en el pH 7.0 - 7.1 u.e., ligeramente menor a los otros pozos.

La firma isotópicamente ligera del agua del pozo P.B.-Tutumo muestra que se trata de filtrado de la Qda. Ilario que alimenta el acuífero durante elevado caudal en época húmeda, por lo cual presenta prácticamente la misma signatura como el arroyo durante estiaje en Nov. 2002 y avenida en Abril 2003. El efecto de altitud (gradiente vertical de 3 ± 0.3 ‰ para $\delta^{18}O$ y 24 ± 2.4 ‰ para $\delta^{2}H$), por origen pocos cientos metros más alto al sur, y el efecto de masa (*rain out*) en época de lluvias, empobrecen los isotopos pesados ^{18}O y ^{2}H en el arroyo. El agua subterránea de recarga local a 92-100 msnm tendría la misma signatura como los pozos Papayal y Zarumilla en la costa.

Igualmente, baja es la mineralización en los pozos Lechugal y Balsalito (muestras P.B.-Lechugal y P.B.-Balsalito) con 617 y 547 µS/cm o 399 y 359 mg TDS/L, donde ya predomina Cl^- en el agua de tipo **Cl**-SO_4-HCO_3-**Na**-Ca-Mg con pH 7.7 y 7.2 u.e., debido a mayor tiempo de residencia del agua en los acuíferos y/o contacto con evaporitas intercalados en depósitos marinos. En Lechugal se mezclan filtrado del rio Zarumilla (poco mineralizado) con agua subterránea clorurada adyacente de recarga local del lado terrestre, como indican los isotopos estables del agua (véase Gráfico 10-19).

La aptitud de las aguas de los pozos P.B. Tutumo, P.B. Noblecilla, P.B. Lechugal y P.B. Balsalito es buena por su baja salinidad y bajo contenido de sodio, clasificado como C2S1, (“medio y bajo peligro de salinización y alcalinización”, véase Gráfico 10-3) según su ratio de adsorción de sodio (SAR, por sus siglas en inglés, Wilcox 1955), es decir no hay peligro significativo de salinización o alcalinización de suelos.

Gráfico 10-3: Clasificación de las Aguas Subterráneas para Riego Basado en el SAR (Wilcox 1955)



10.7.2 Aguas de Avanzada Mineralización

Generalmente, estas son aguas subterráneas de recarga local, donde solo el pozo P.B.-Palmales parece tener un mayor porcentaje de filtrado del rio cercano (véase Gráfico 10-19).

El intercambio de cationes en sedimentos arcillosos avanzó a un enriquecimiento extremo de Na^+ a 93-94 eq.% de los cationes en los pozos de P.B.-Palmales, P.B.-Qda. Seca y AA.PP-Huaquillas. La adsorción simultanea de Ca^{2+} y Mg^{2+} genera aguas subterráneas muy blandas (34-39 mg $CaCO_3$/L) de tipo HCO_3-SO4-**Na**–**Cl**, a pesar de mineralización relativamente avanzada a 1143-1522 µS/cm o 701-878 mg TDS/L. Este avanzado equilibrio con la litología alumino-silicatada se refleja también en un ligero aumento del pH a 7.8-8.0.

El avance del intercambio de cationes y de la salinidad convierte las aguas de los pozos P.B. Palmales, P.B. Qda. Seca y AA.PP Huaquillas en las más críticas para el riego, clasificados como C3S4, i.e. con alto y muy alto peligro de salinización y alcalinización de los suelos (véase Gráfico 10-3).

La salinidad es similar en los pozos Chacras (C3S3) y Papayal (C3S2), e incluso mayor en Zarumilla (C4S2) pero el peligro de alcalinización se reduce, debido a menor contenido de Na^+.

Tres análisis de la Qda. Palmales en el 2013 - 2014 (Secretaría del Agua, Dirección de Gestión de Calidad del Agua - Gobierno de Ecuador, 2016), con concentraciones de Cl^- similares – y las de Na^+ inferiores – al agua subterránea del pozo Palmales (muestra P.B-Palmales), sugiere que el Cl^- proviene de infiltración del río al aluvial, mientras que el Na^+ aumenta luego por intercambio catiónico en el acuífero arcilloso y/o por aporte del agua subterránea terrestre durante exfiltración al río en época seca.

En las muestras P.B.-Chacras y P.B.-Papayal, la mineralización es igualmente avanzada (1639 y 1505 µS/cm o 991 y 937 mg TDS/L), pero el intercambio de Ca^{2+} y Mg^{2+} por Na^+ aún menos avanzado (85 y 72 eq.% Na^+) en las aguas de tipo **Cl**-SO_4-HCO_3-**Na**-(Ca-Mg).

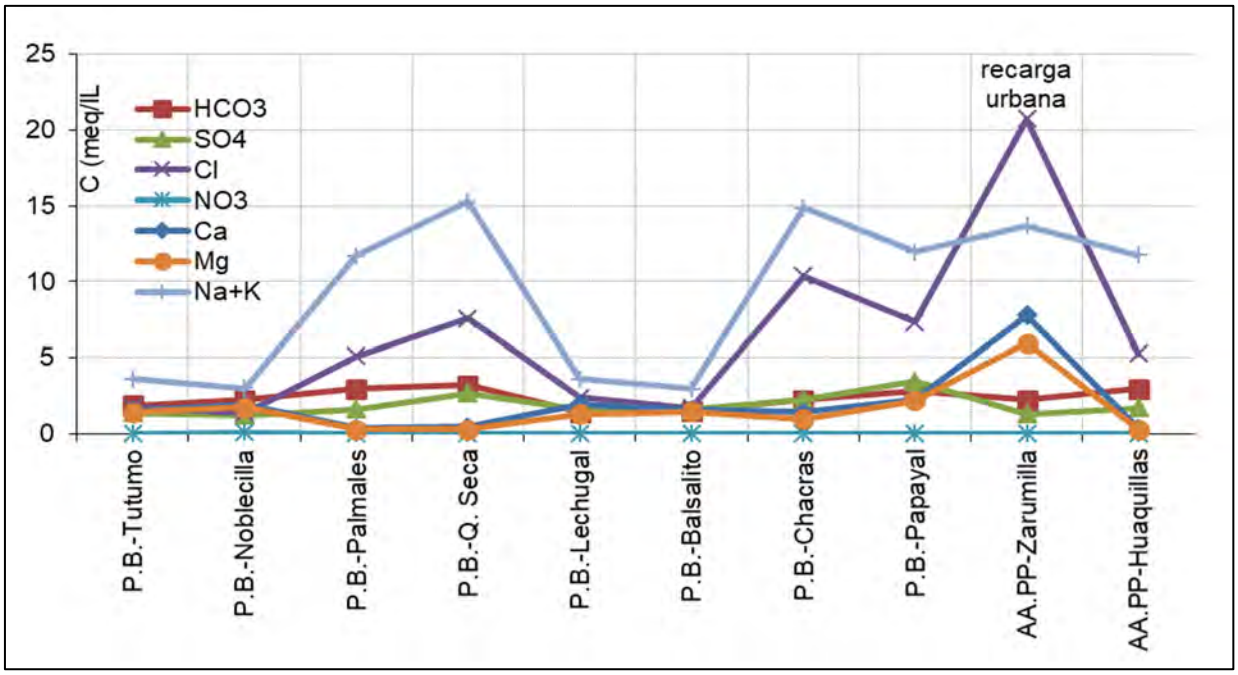
En la muestra P.B.-Palmales y muestra AA.PP-Huaquillas, solo el Na^+ excede con 266 mg/L ligeramente el límite de 200 mg Na^+/L que define la OMS (WHO 2011) como el límite de potabilidad, que solo se basa en el sabor, y no en aspectos de salud. El Na^+ y los otros iones mayoritarios altamente solubles e inertes (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, HCO_3, Cl^- y SO_4^{2-}) no perjudican la salud (mientras no sea agua tan salada como del mar), sus límites son solo valores técnicos, y frecuentemente exceden las normas de “potabilidad” incluso en aguas minerales embotelladas para consumo humano.

El fosfato supera con 0.36 mg P-HPO_4^{2-}/L en la muestra P.B-Qda. Seca y 0.11 mg P-HPO_4^2/L en P.B.-Lechugal en la normativa peruana (0.1 mg P/L). para agua de consumo humano. En ambos puntos proviene tal vez de fertilizantes, aunque no se registra mayores concentraciones de otros nutrientes (NO_3^- y/o K^+), asociados a abono mineral.

El agua del pozo P.B.Papayal tiene una alta contaminación de Coliformes Fecales y Totales, 16000 y 35000 NMP/100 mL, que exceden ampliamente los límites de potabilidad peruano y ecuatoriano (ambos 20 NMP/100mL para coliformes fecales, y 50 y 200 NMP/100mL para coliformes totales, respectivamente), y en caso de los Fecales (Termotolerantes) incluso el supera tanto la normativa peruana y ecuatoriana de aguas para riego de vegetales (1000 NMP/100 mL en ambos casos).

La alta mineralización reflejada en los 2604 µS/cm o 2062 mg TDS/L en el agua subterránea de la muestra AA.PP-Zarumilla,mineralización tipo **Na**-Ca-Mg-**Cl**, es causada por mayores aportes de Cl^-, Ca^{2+} y Mg^{2+}, que es característico para recargas urbanas (véase Gráfico 10-4).

Gráfico 10-4: Diagrama Scholler de las Concentraciones de Iones Principales (meq/L) en las Aguas Subterráneas



Debido a la poca recarga en el clima semi-árido, el agua subterránea fluye relativamente lento y es más afectado por la recarga urbana que se refleja frecuentemente en el aumento de Cl^- y Ca^{2+}, proveniente principalmente de lixiviación de materiales de construcción, particularmente el aditivo $CaCl_2$ (Sika) altamente soluble que se agrega (con ~ 2-4 % del peso) al concreto de todo tipo de construcciones para acelerar el fraguado del cemento. Estas aguas en contacto con casas, carreteras, escombros y otros materiales de construcción contienen característicamente mucho más Cl^- que Na^+, contrario a aguas subterráneas viejas saladas de recarga local.

En el Perú aún no se ha prohibido el uso de Sika como en la mayoría de los países industrializados, porque no es tan problemático en el clima árido de la costa, donde el $CaCl_2$ altamente soluble no causa corrosión tan severa del concreto y del hierro en el interior como en edificios en regiones húmedas.

Aparte de la lixiviación de $CaCl_2$ se equilibró la recarga urbana también con el carbonato del cemento de las casas:

$$\mathbf{CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow CaCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2\,HCO_3^-} \qquad \textbf{(V)}$$

$$\mathbf{CaMg(CO_3)_2 + 2\,H^+ \leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2\,HCO_3} \qquad \textbf{(VI)}$$

Con la disolución del Sika y concreto/cemento aumenta dramáticamente la dureza del agua subterránea a 688 mg $CaCO_3$/L, que excede los 500 mg $CaCO_3$/L del ECA 1, comparado con 34-224 mg $CaCO_3$/L (blanda a dura, Tabla 10-12) en los otros pozos, y se satura de calcita, como indica el índice Langelier de Saturación de Calcita:

$$\textbf{SI}\text{-}CaCO_3 = \lg \frac{[Ca^{2+}]^* [CO_3^{2-}]}{K_S} = \lg [Ca^{2+}] + \lg [HCO_3^-] + \lg K_2 - \lg K_S + pH = \mathbf{0} \pm 0.2$$

Tabla 10-12: Clasificación de Dureza Total Permanente según el U.S. Geological Survey

Clasificación	Dureza (mg $CaCO_3$/L)
Suave	< 60
Moderadamente duro	61 – 120
Duro	121 – 180
Muy duro	> 180

La saturación de calcita depende del pH, alcalinidad, Ca^{2+}, temperatura (ºC), y - en menor grado - de los sólidos totales disueltos (STD). Los cálculos en Excel son confirmados por el modelo PHREEQC (Parkhurst & Appelo., 2018, versión 3.4), usando MINTEQ.v4 como base de datos.

El escape de CO_2 por descompresión hidráulica, el aumento de temperatura durante el día en la superficie, la mezcla de aguas de diferentes orígenes, y la evaporación en reservorios abiertos puede sobresaturar calcita y otros carbonatos después del bombeo, y así generar una lenta incrustación en tuberías alimentadas por el pozo Zarumilla.

10.8 CONTROL DE CALIDAD

Se evaluó la calidad de los datos de campo y laboratorio de los 10 pozos monitoreados mediante el balance iónico, y la comparación de la suma de iones con la conductividad eléctrica (µS/cm) y los sólidos totales disueltos (mgTDS/L), tal como se detalla a continuación. Además, se compararon metales disueltos y totales, muestras duplicadas y un blanco de agua desionizada con concentraciones menores al límite de detección (< LD).

10.8.1 Balance Iónico

En las aguas de pH neutro (7 – 8 unidades de pH) predominan los cationes principales disueltos Ca^{2+}, Mg^{2+} y Na^{+}, así como los aniones principales HCO_3^{-}, SO_4^{2-} y Cl^{-}, mientras la solubilidad y consecuentemente la concentración de metaloides y metales pesados es tan baja que no contribuyen significantemente al balance iónico.

Los datos son además corroborados por la conductividad eléctrica (EC en µS/cm), registrada en campo, y los sólidos disueltos (mg TDS/ L) del laboratorio, que correlacionan bien entre sí (Figura 10-2), y que, divididos entre 100 y 70, aportan resultados similares a la suma de los aniones y cationes (en meq/L):

La comparación de la suma de aniones y cationes con EC y TDS muestra una ligera sobrestimación sistemática de los cationes por ICP-OES y una ligera subestimación de la alcalinidad determinada en laboratorio. La ligera subestimación de HCO_3^{-} afecta sobre todo a las aguas menos mineralizadas (< 1143 µS/cm), donde el porcentaje de HCO3- entre los aniones es mayor, y en consecuencia sube el error del balance iónico (EBI) a > 20 % (véase Tabla 10-13 y Gráfico 10-5). Se tomó en consideración estos desbalances sistemáticos, que no afectan a la interpretación de los resultados.

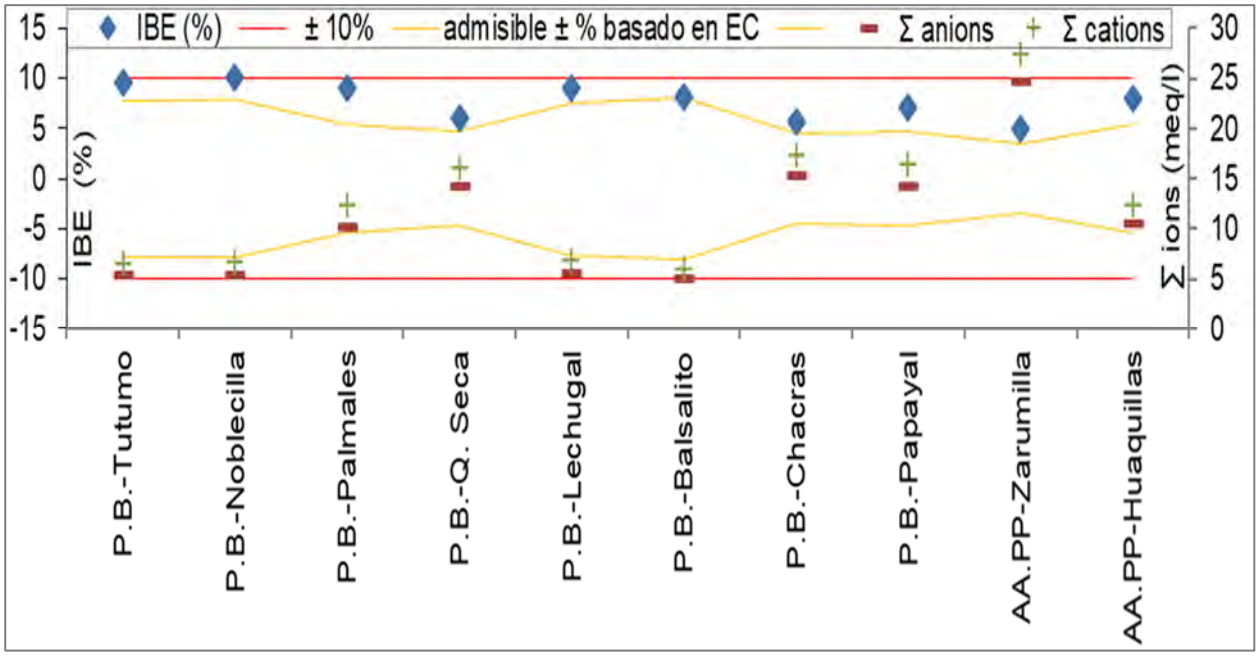
Tabla 10-13: Error del Balance Iónico y Características Hidroquímicas de las Aguas Analizadas

Piezómetro	EBI	TDS	pH	Dureza total	SI $CaCO_3$	Tipo de agua
	%	mg/l		mg $CaCO_3$/L		> 10 eq.%
P.B.-Tutumo	10	398	7.0	149	-1	**Na**-Ca-Mg–**HCO_3**-Cl-SO_4
P.B.-Noblecilla	10	383	7.1	184	-0.8	**Na**-Ca-Mg–**HCO_3**-Cl-SO_4
P.B.-Palmales	9	721	8.0	34	-0.5	**Na**–**Cl**-HCO_3-SO_4
P.B.-Q. Seca	6	878	7.8	39	-0.6	**Na**–**Cl**-HCO_3-SO_4
P.B.-Lechugal	9	399	7.7	163	-0.3	**Na**-Ca-Mg–**Cl**-SO_4-HCO_3
P.B.-Balsalito	8	359	7.2	153	-0.9	**Na**-Ca-Mg–**Cl**-SO_4-HCO_3
P.B.-Chacras	6	991	7.7	121	-0.4	**Na**–**Cl**-SO_4-HCO_3
P.B.-Papayal	7	937	7.7	224	-0.1	**Na**-Ca-Mg–**Cl**-SO_4-HCO_3
AA.PP-Zarumilla	5	2062	7.7	688	0.24	**Na**-Ca-Mg–**Cl**
AA.PP-Huaquillas	8	701	8.0	34	-0.5	**Na**–**Cl**-HCO_3-SO_4

Leyenda:

	Agua subterránea joven bicarbonatada, < 0.4 g TDS/L
	Agua subterránea clorurada, < 0.4 g TDS/L
	Agua subterránea clorurada, 0.7-0.9 g TDS/L
	Agua clorurada de avanzada mineralización, 0.9-1 g TDS/L
	AA.PP-Zarumilla, parcial recarga urbana con $CaCl_2$, 2 g TDS/L

Gráfico 10-5: Error del Balance Iónico (%) y Suma de Concentraciones de Principales Cationes y Aniones (meq/L)



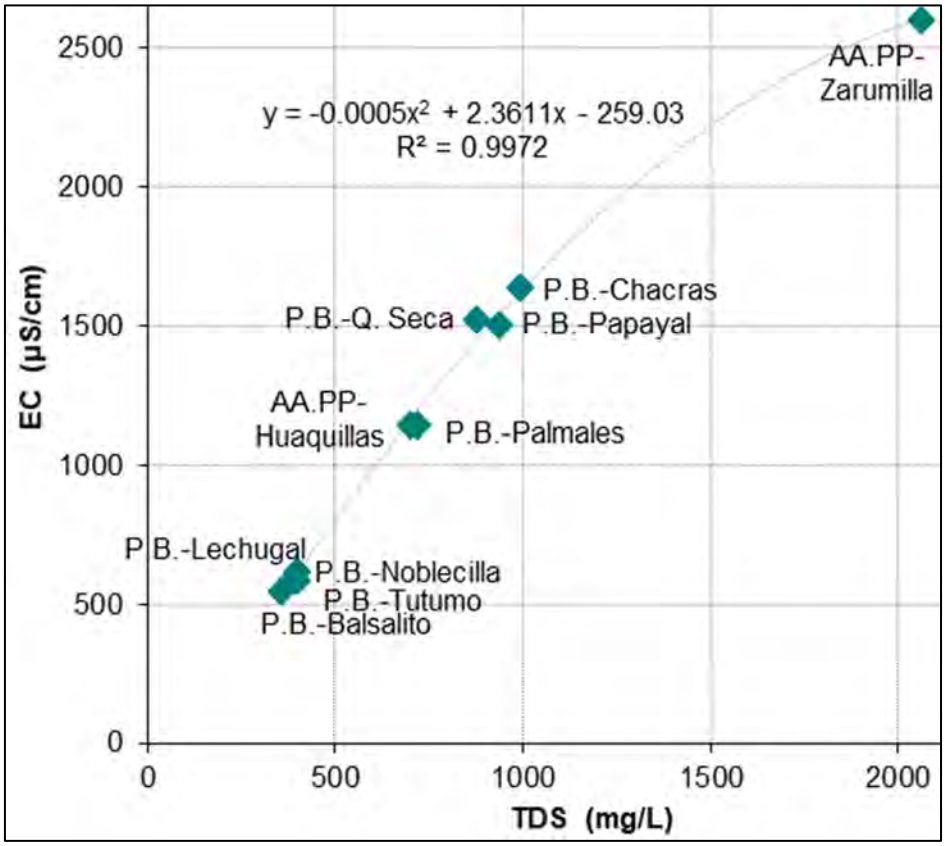
Nota: Líneas rojas reflejan rangos aceptables de errores de ± 20 % o calculado basado en la conductividad eléctrica.

A moderada mineralización es el coeficiente de actividad (a_i) igual a 1. A consecuencia, la actividad (concentración efectiva) y concentración (mg/L) de iones son idénticas (Debye-Hückel 1923):

$$a_i = \gamma_i \, c_i \qquad \text{con} \qquad \text{coeficiente de actividad } \gamma_i = 1.0$$

A mayor salinidad queda la actividad de los iones debajo de la concentración, el coeficiente de actividad disminuye a $\gamma_i < 1$, y a consecuencia deja de existir una correlación linear entre EC y TDS (factor ~ 0.7) y aumenta la conductividad gradualmente más lenta que los sólidos disueltos (véase Gráfico 10-6).

Gráfico 10-6: Correlación entre EC (µS/cm) Medida en Campo y TDS Analizados en Laboratorio (mg/L)



Los análisis de control de calidad ejecutados indican una precisión analítica aceptable de los resultados del laboratorio.

10.8.2 Metales Totales y Disueltos

Las aguas subterráneas de los pozos son claro-cristalinas, sin finos movilizados (< 5 mg TSS/ L), debido al muestreo durante prolongadas pruebas de bombeo.

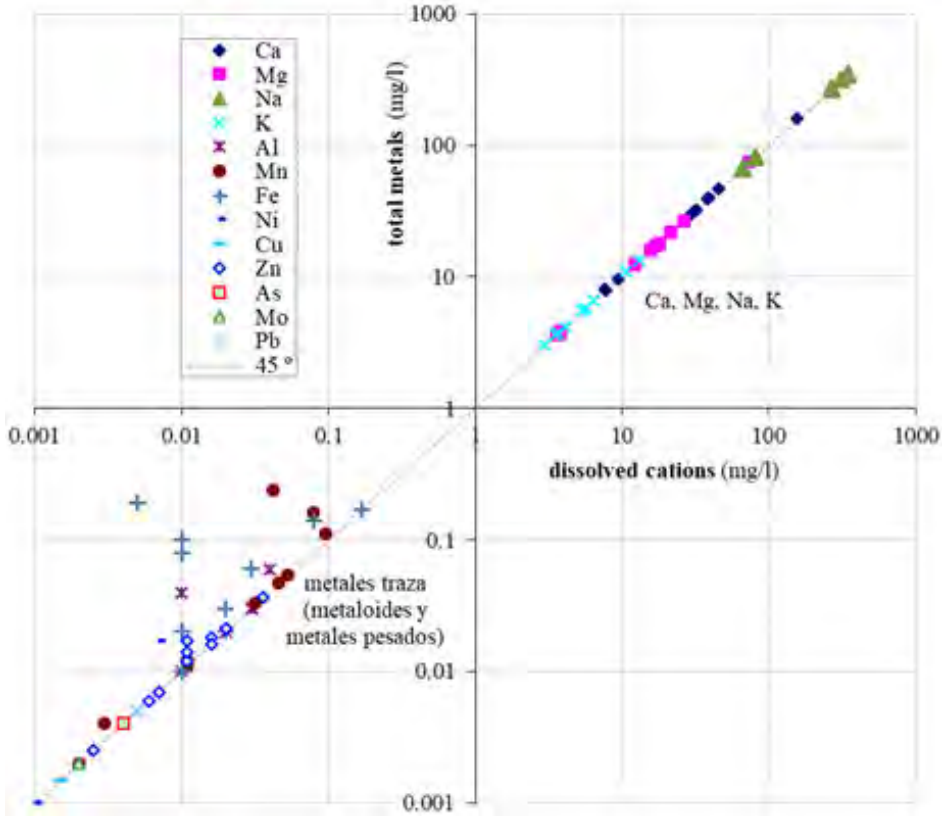
Las concentraciones totales (C_{tot}) de metales de las muestras no filtradas son iguales o superiores, nunca inferiores, a las de los mismos cationes disueltos (C_{dis}) de muestras filtradas, lo que confirma la validez de los datos, y un considerable porcentaje de algunos metaloides y metales pesados (Fe, Mn, Ni, Al) en suspensión (C_{sus}).

$$C_{tot} = C_{sus} + C_{dis} \quad (5)$$

Las concentraciones de los cationes mayoritarios disueltos y totales (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+}) en las aguas claras son prácticamente idénticas, debido a su alta solubilidad a pH neutro y ligeramente alcalino, y por ello se ajustan precisamente a la línea diagonal de 45º.

Los (Hidr)óxidos de algunos metaloides y metales pesados (Fe, Mn, Cu, Ni) en suspensión, o adsorbidos a $Fe(OH)_3$, elevan las concentraciones totales de Fe, Mn, Al y Ni sobre las disueltas del mismo metal, particularmente a bajas concentraciones cerca o debajo del límite de detección (LD), donde se magnifican las diferencias o varianzas relativas entre concentraciones totales y disueltas (véase Gráfico 10-7). Las concentraciones totales nunca inferiores a las disueltas, incluso cerca de los límites de detección donde se magnifican potenciales los errores, demuestra la repetibilidad y consistencia de muestreo y análisis.

Gráfico 10-7: Comparación de Concentraciones de Metales Disueltos y Totales



Nota: La línea diagonal de 45º indica valores de Ctot = Cdis, sin componentes en suspensión

10.8.3 Análisis de Duplicados y Blancos

Las muestras duplicadas tomadas proveen una indicación de la varianza de cada parámetro analizado, causado por errores de muestreo y/o instrumentales.

Los aniones y cationes se alinean bien con la línea diagonal de concentraciones iguales, incluso los elementos traza, cuyas concentraciones cercanas o por debajo del límite de detección pueden magnificar el error relativo entre originales y duplicados (véase Gráfico 10-8).

La buena concordancia entre las concentraciones de muestras duplicadas y originales confirma la buena replicabilidad de la metodología de muestreo y la consistencia de análisis del laboratorio.

La calidad de datos es estadísticamente controlada mediante cálculo de la diferencia porcentual relativa (DPR) entre resultados de muestras duplicadas. Los resultados < 2 %, y solo uno de 11 % para Fe, son muy inferiores a los 10 % considerados aceptables. Valores > 10 % indicarían posibles errores durante el análisis de las muestras en laboratorio y/o potenciales fuentes de

contaminación de las muestras durante su obtención, preservación, almacenamiento y/o transporte.

La metodología del DPR es recomendada por la Guía Funcional Nacional del Programa de Contratación de Laboratorio para la Revisión de Datos Inorgánicos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2016) y los *Standard Methods for Water and Waste Water* (APHA, 2017).

El cálculo, similar al balance iónico, es el siguiente:

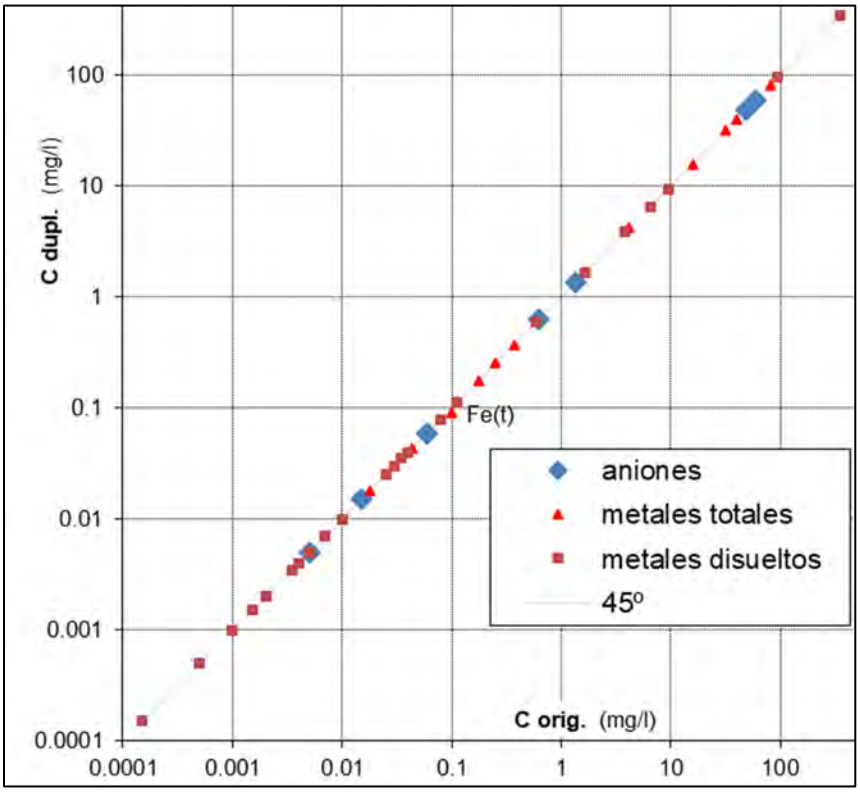
$$\text{DPR} = \frac{MO - MD}{\frac{MO + MD}{2}} * 100\ \%$$

Donde:
DPR: Diferencia Porcentual Relativa (%).
MO: Valor muestra original (o medido en laboratorio).
MD: Valor muestra duplicado (o calculado/medido in situ).

Se aplica el cálculo del DPR solamente a aquellos valores de la muestra duplicada y de la muestra original, que son igual o mayores que cinco veces el límite de detección del método (5×LD), debido a que se magnifican los errores relativos cerca al LD de elementos traza. Para los análisis de los duplicados enviados al laboratorio, se aplica un criterio de control de 10 % para la DPR. Si se supera el criterio de control, todos los resultados relacionados se resaltan y se consideran como estimados.

Además, el análisis de muestras de referencia estándar con conocida concentración de parámetros en el laboratorio provee un adicional control de calidad. Estos resultados son prácticamente idénticos por no ser afectados por posibles contaminaciones o variaciones en el procedimiento de muestreo.

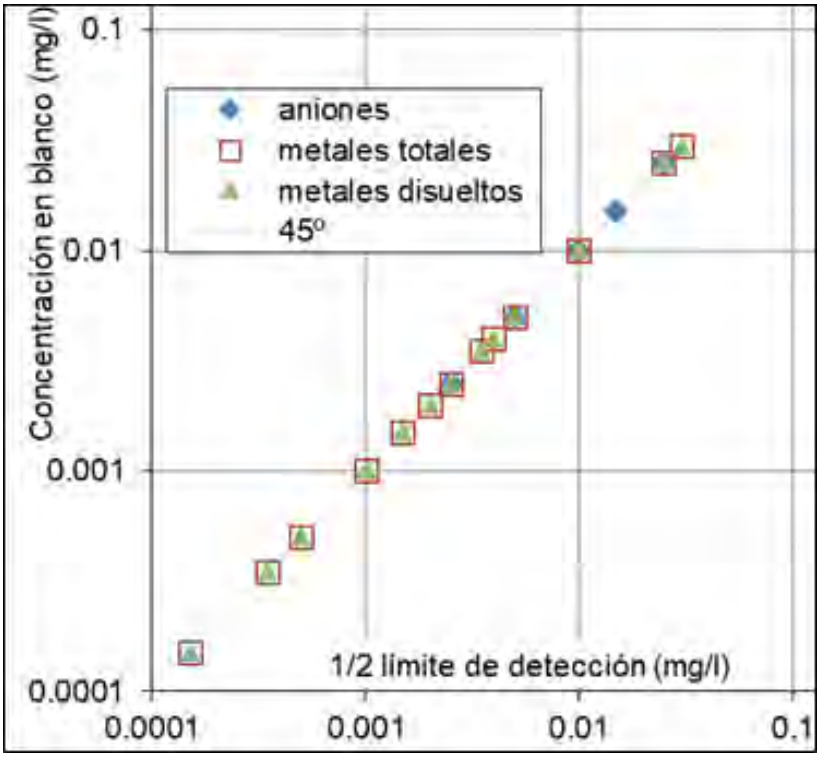
Gráfico 10-8: Concentraciones de Duplicados vs Originales



Nota: Línea diagonal de 45º indica valores ideales de $C_{duplicado} = C_{original}$

Adicionalmente se analizó un blanco de agua desionizada para demostrar que todos los parámetros estén por debajo del límite de detección (LD), presentado como mitad del LD (véase Gráfico 10-9).

Gráfico 10-9: Concentraciones de Blancos vs. Mitad del Límite de Detección (LD/2)



10.9 PRINCIPALES RELACIONES ISOTÓPICAS

10.9.1 Revisión de Información Isotópica Existente

Se cuenta con datos isotópicos de lluvias (22 muestras de 6 estaciones de colección de lluvias), aguas superficiales (15 análisis de 8 puntos de muestreo) y agua subterránea (93 muestras de cinco campañas de muestreo y 30 pozos) de estudios ejecutados entre los años 2002 y 2004 (ver Figura 10-3).

Tabla 10-14: Resultados de Análisis Isotópicos Existentes (2002-2004)

Estación	Coordenadas Geográficas		Nombre	Tipo de Muestra	Tipo de Pozo	Prof/ Alt	Avenida		Estiaje		Avenida		Estiaje		Avenida	
							Abr-02		Nov-02		Abr-03		2003		2004	
	Longitud	Latitud				(m)	O 18	H 2	O 18	H 2	O 18	H 2	O 18	H 2	O 18	H 2
Aguas Subterráneas																
IA 6-P	80° 14´ 43"	3° 28´ 47"	Carmen Atoche Romero	Sub					-1.66	-7.1	-1.56	-9.6				
IA 88-P	80° 13´ 31"	3° 30´ 13"	Agua potable Loma Saavedra	Sub	T	80	-2.73	-14.2	-3.12	-14.7	-3.09	-13.9			-3	-13.8
IB 18-P	80° 12´ 38"	3° 30´22"	Manuel Agurto Morillo	Sub	TA				4.05	10.2	7.56	27.1				
IB 128-P	80° 12´ 56"	3° 31´ 27"	Sgud Lupú B.	Sub	TA				-3.92	-20.9	-3.71	-21.5				
IB 129-P	80° 13´ 24"	3° 31´ 33"	Daniel Marchán Silva	Sub	TA				-0.21	-9.4	3.11	7.4				
IB 235-P	80° 13´ 02"	3° 31´ 15"	Victor García Preciado	Sub	TA				-2.77	-17.8	-2.69	-12.6				
IB 252-P	80° 12´ 47.1"	3° 33´ 53.1"	Agua Potable La Palma	Sub	TA	10.5	-4.14	-24.2			-4.18	-25.1	-3.63	-22.4	-3.59	-21.8
IB 269-P	80° 14´ 04"	3° 34´ 08"	Población Papayal	Sub	T	100	-2.65	-10.7	-2.79	-12.2	-2.75	-10.7	-2.75	-11.9	-2.46	-10.9
IB 300-P	80° 13´ 46"	3° 32´ 04"	Emfapa Uña de Gato	Sub	T	> 100			-2.38	-7.7	-2.42	-9.3	-2.32	-9.6	-2.27	-9.4
IB 301-P	80° 13´ 14.8"	3° 31´ 43"	Arnaldo Castro	Sub											-4	-24.5
IC 52-P	80° 13´ 18"	3° 41´ 38"	Gerardo Jimenez Zapata	Sub	TA	8.4	-3.53	-20	-4.2	-24.0	-4.07	-23.9	-3.54	-20.3	-3.29	-18.2
IIA 21-P	80° 13´ 37"	3° 29´ 18"	Emfapa Aguas Verdes	Sub	T	224			-1.75	-4.9	-1.76	-4.3	-1.7	-4.6	-1.6	-4.8
IIA 22-P	80° 15´ 13"	3° 29´ 28"	Canario I	Sub	T	120	-2.01	-6.4	-2.13	-7.5	-2.18	-9.9	-2.13	-7.4	-2.04	-7.2
IIB 1-P	80° 16´ 40"	3° 30´ 22"	Emfapa Zarumilla 028	Sub	T				-2.26	-8.3	-2.00	-5.9				
IIB 2-P	80° 16´ 12"	3° 30´ 33"	Enfapa Miraflores 27	Sub	T	120	-2.1	-5.7	-2.24	-7.9	-2.21	-7.0	-1.94	-6.1	-1.81	-6.1
IIB 3-P	80° 16´ 12"	3° 30´ 33"	Emfapa Calle Tumbes	Sub	T	150			-2.26	-8.3	-2	-5.9	-2.17	-8.1		
IIB 12-P	80° 19´ 29"	3° 31´ 25"	Centro Exp. Tumpis	Sub	T	120			-2.38	-5.9	-2.37	-9.5			-2.27	-8.7
IIC 24-P	80° 15´ 42"	3° 42´ 06"	Marcos Martinez-Lino Farfán	Sub	TA	9.5			-4.74	-28.5	-4.57	-27	-4.37	-25.1	-2.41	-11.6
La Coja	80° 12´ 32.4"	3° 35´ 42.3"	La Coja	Sub											-3.04	-14.6
IB 1-E	80° 12´ 56.5"	3° 29´ 18.8"	León en Curva	Sub	T		-1.49	-2.1			-1.67	-4.4	-1.62	-4.3	-1.41	-3.7
IB 2-E	80° 12´ 22"	3° 29´ 54"	Gasolinera Mayón	Sub	T		-2.82	-12.4			-2.43	-8.9	-3.15	-14.8	-2.95	-14.5
IC 1-E	80° 11´ 55.1"	3° 31´ 06.3"	Entrada Zapote	Sub	T		-3.38	-19.9			-3.78	-21.0				
IC 2-E	80° 12´ 1.4"	3° 30´ 57.4"	IC 2-E	Sub	TA								-2.12	-7.7	-1.71	-5.7
IC 3-E	80° 12´ 16"	3° 33´ 03.6"	Chacras	Sub	T		-2.55	-12.4					-2.5	-10.8	-2.35	-10.6
ID 1-E	80° 11´ 01"	3° 39´ 19"	Quebrada Seca	Sub	TA								-2.62	-11.8	-2.28	-9.4
ID 2-E	80° 11´ 32.4"	3° 35´ 42.4"	Guabillo	Sub	T		-3.84	-23.7	-4.48	-27.1	-3.79	-22.7	-3.77	-22.2	-3.35	-20.6
IIE1-E	80° 00´ 5.6"	3° 37´ 54.8"	Palmales	Sub	T		-4.31	26.4	-4.63	-27.4			-4.2	-26.5	-3.93	-22.7
IIE 3-E	80° 07´ 37.9"	3° 43´ 46.6"	Manabía de El Oro	Sub	TA	50	-4.36	-26.1	-4.50	-26.2			-4.06	-22.9	-3.12	-16.1
IIF 1-E	80° 03´ 35"	3° 47´ 16"	Victoria Lajas	Sub	TA	3	-4.74	-27.7	-3.7	-19.8						
Progreso	80° 08´ 41.9"	3° 40´ 30.2"	Progreso	Sub	T										-2.15	-7.5
Aguas Superficiales																
Quebrada Ilario	80° 15´ 45"	3° 42´ 05"	Tutumo	Sup					-4.92	-28.5	-4.78	-31.3				
Quebrada Faical	80° 13´ 05"	3° 41´ 39"	Isla Noblecilla	Sup					-4.49	-23.0	-2.87	-17.8				
Quebrada Seca	80° 11´ 17"	3° 39´ 50"	Quebrada Seca	Sup					-3.75	-21.5	-4.17	-23.8				
Lechugal	80° 11´ 38"	3° 36´ 54"	Lechugal	Sup					-3.70	-22.4	-3.96	-23.1				
La Palma	80° 12´ 42"	3° 33´ 36"	La Palma	Sup					-3.56	-22.3	-3.71	-20.8				
Cuchareta Baja	80° 14´ 11"	3° 31´ 18"	Cuchareta Baja	Sup	Río				-3.27	-20.5	-3.59	-20.5				
Uña de Gato	80° 14´ 05"	3° 39´ 04"	Uña de Gato	Sup											-2.75	-13.1
Balsamal Lajas	80° 06´ 20.1"	3° 40´ 28.1"	Balsamal Lajas	Sup									-1.84	-14.1	-2.85	-13.6
Aguas de Lluvia																
Tumpis 1	80° 19´ 29"	3° 31´ 25"	Tumpis	Precip		18					-1.20	0.9			-2.21	-7.8
Matapalo 1	80° 12´ 00"	3° 40´ 02"	Matapalo	Precip		58					-1.24	2.8			-1.73	-3.1
Sabadel 1	79° 26´ 40.8"	3° 34´ 6.3"	Sabadel Marzo	Precip		3060									-9.01	-56.8
Sabadel 2	79° 26´ 40.8"	3° 34´ 6.3"	Sabadel Abril	Precip		3060									-11.29	-76.8
Sabadel 3	79° 26´ 40.8"	3° 34´ 6.3"	Sabadel Mayo	Precip		3060									-12.44	-87.8

Estación	Coordenadas Geográficas		Nombre	Tipo de Muestra	Tipo de Pozo	Prof/ Alt	Avenida		Estiaje		Avenida		Estiaje		Avenida	
							Abr-02		Nov-02		Abr-03		2003		2004	
	Longitud	Latitud				(m)	O 18	H 2	O 18	H 2	O 18	H 2	O 18	H 2	O 18	H 2
Paccha	79° 39´ 55.3"	3° 35´ 6.3"	Paccha (2003)	Precip							-4.33	-22.8				
Paccha 1	79° 39´ 55.3"	3° 35´ 6.3"	Paccha Marzo	Precip		1525									-3.91	-18.9
Paccha 2	79° 39´ 55.3"	3° 35´ 6.3"	Paccha Abril	Precip		1525									-6.26	-38.4
Paccha 3	79° 39´ 55.3"	3° 35´ 6.3"	Paccha Mayo	Precip		1525									-6.65	-41.5
La Victoria	80° 03´ 33"	3° 46´ 56.8"	La Victoria (2003)	Precip							-2.72	-8.4				
Victoria 1	80° 03´ 33"	3° 46´ 56.8"	Victoria Marzo	Precip		415									-2.23	-5.4
Victoria 2	80° 03´ 33"	3° 46´ 56.8"	Victoria Abril	Precip		415									-2.5	-8.7
Victoria 3	80° 03´ 33"	3° 46´ 56.8"	Victoria Mayo	Precip		415									-2.22	-8.8
San Lorenzo 1	79° 31´ 31.9"	3° 37´ 23.9"	San Lorenzo Marzo	Precip		1686									-5.99	-32.9
San Lorenzo 2	79° 31´ 31.9"	3° 37´ 23.9"	San Lorenzo Abril	Precip		1686									-6.07	-35.7
San Lorenzo 3	79° 31´ 31.9"	3° 37´ 23.9"	San Lorenzo Mayo	Precip		1686									-6.66	-40.3
Embalse																
TAHUIN 2	80° 00´ 5,6"	3° 37´ 54.8"	Tahuin 2 m	Sup									-2.16	-13.8	-1.42	-8.5
TAHUIN 10	80° 00´ 5,6"	3° 37´ 54.8"	Tahuin 10 m	Sup									-2.22	-13.2	-1.62	-9.4

Fuente: Información proporcionada por el Proyecto GIRHT
Notas: Tipo de muestra: Sub = subterránea; Sup = superficial; Precip = precipitación; Tipo de pozo: T = tubular; TA = tajo abierto

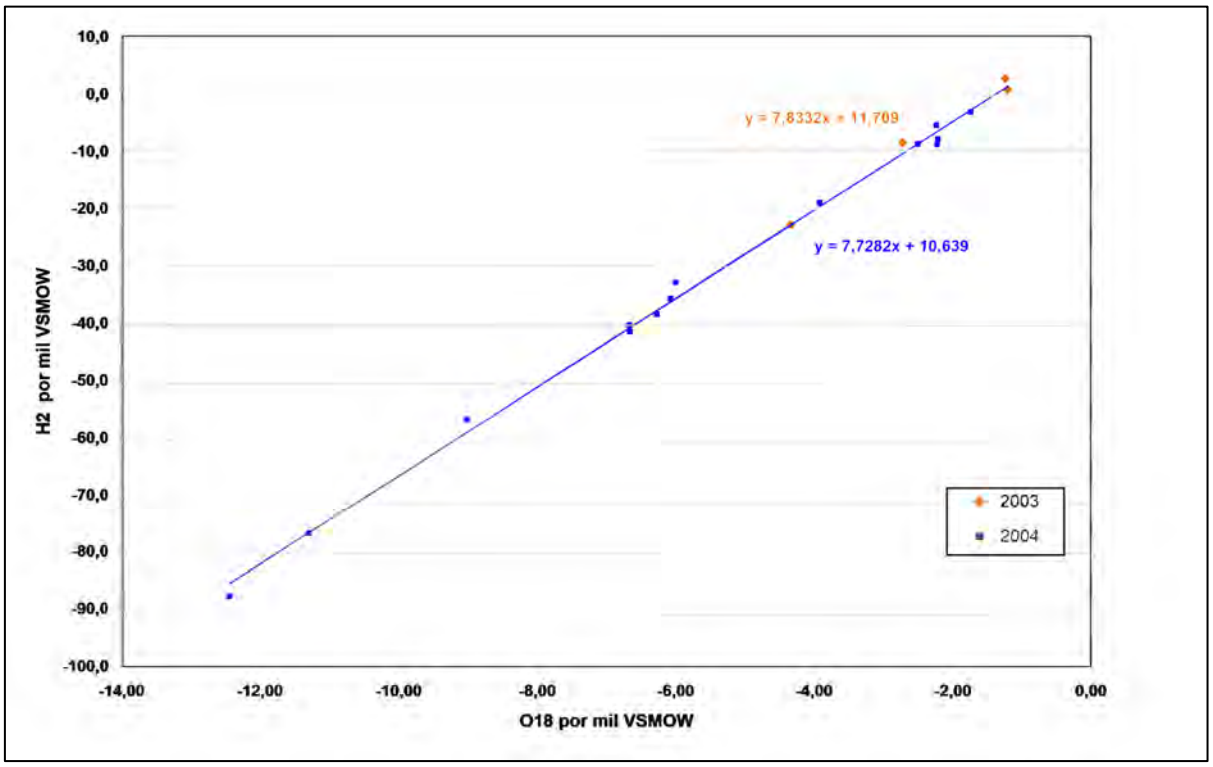
Figura 10-3: Red de Monitoreo Isotópico Existente

10.9.1.1 Recta Meteórica

La Recta Meteórica Local (RML o LMWL) fue definida en base a 6 estaciones meteorológicas donde se colectaron las muestras, incluyendo 2 estaciones en Perú y 4 estaciones en Ecuador. Las muestras de lluvias se obtuvieron durante los años 2003 y 2004, en la época de lluvias (entre diciembre y abril). Las estaciones peruanas tomaron totales anuales y las de Ecuador colectaron las muestras en forma mensual.

El Gráfico 10-10 muestra la RML definida, apreciándose que la ecuación de la RML varía de año en año, situación que se debería a las condiciones meteorológicas durante las tormentas que no son siempre las mismas y el fraccionamiento isotópico es sensible a la temperatura, presión atmosférica y cantidad de agua precipitada.

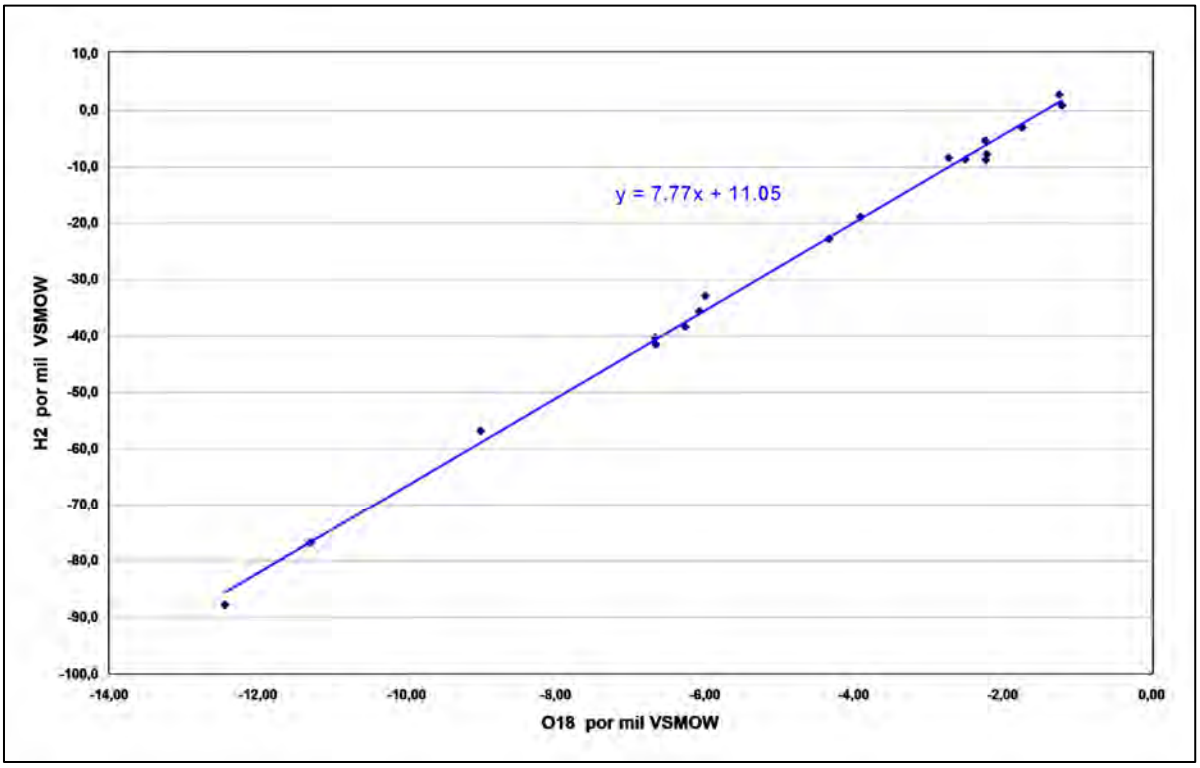
Gráfico 10-10: Precipitaciones en el Acuífero Zarumilla



Fuente: Información proporcionada por el Proyecto GIRHT

Tomando el contenido isotópico de todas las muestras de lluvia colectadas, se definió una Recta Meteórica Local (véase Gráfico 10-11)

Gráfico 10-11: Recta Meteórica Local



Fuente: Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006 (OIEA, Abril, 2009)

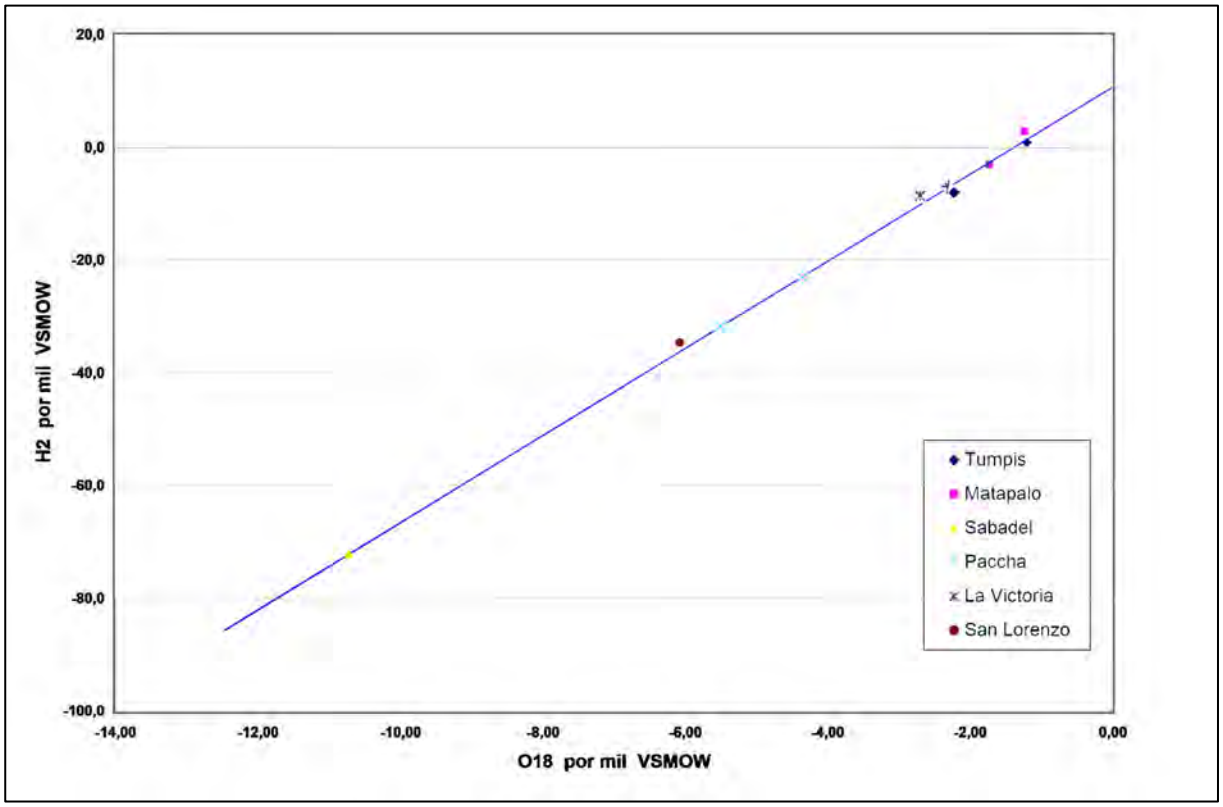
La Recta Meteórica Local obedece a la siguiente ecuación:

$$\delta 2H = 7.77\ \delta 18O + 11.05$$

Está línea es prácticamente idéntica a la línea meteórica global (GMWL), lo que indica que predomina precipitación de humedad de origen Pacifico, mientras que la humedad Atlántica proveniente de la Amazonia tiene muy alto exceso de deuterio (17 a 18, en vez del 11 de la GMWL), es decir variaría a lo largo de una línea meteórica local (LMWL) paralela y encima de la GMWL, como indican los registros mensuales en Marcapomacocha (Junín) de 2006 a 2012.

Si se toman los promedios anuales ponderados para la estación de lluvias (véase Gráfico 10-12), se puede observar que los puntos se ajustan bien a la recta meteórica.

Gráfico 10-12: Lluvias Promedio en el Acuífero Zarumilla



Fuente: Información proporcionada por el Proyecto GIRHT

Del análisis de la situación de cada estación meteorológica y las posibles zonas de recarga de los acuíferos, se advierte que algunas de las estaciones ubicadas en Ecuador, estaban muy lejos del área del proyecto y que el patrón de las isoyetas (periodo 1964 – 2001) en esos lugares es diferente al que se observaba en la cuenca del río Zarumilla (véase Figura 10-4).

Las tres estaciones a mayor altitud están ubicadas en el extremo de la cuenca del río Puyango en Ecuador, y allí las isoyetas tienen una gradiente muy fuerte, siendo la característica más notoria en su diferencia con la cuenca del Río Zarumilla.

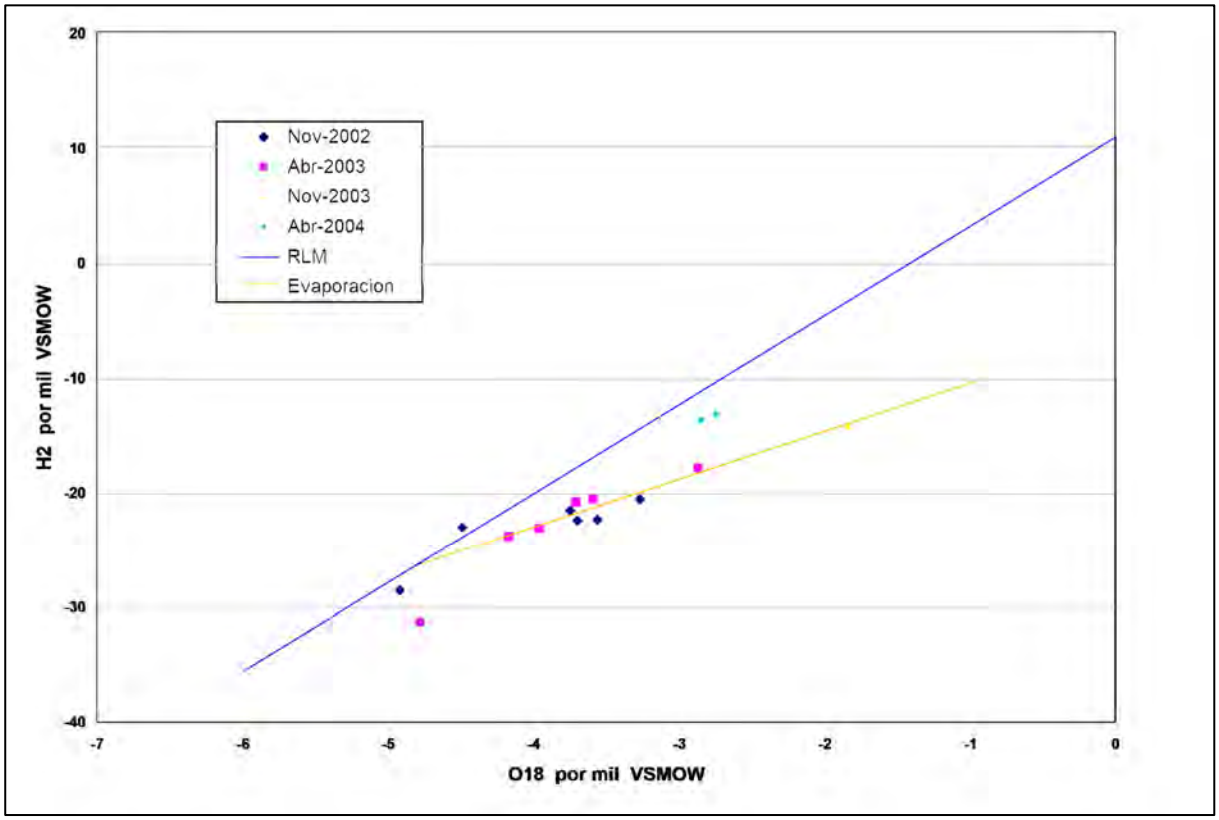
Figura 10-4: Mapa de Isoyetas de Precipitación Media Anual (1964-2001)

10.9.1.2 Isotopía de las Aguas Superficiales

De acuerdo con la información, se colectaron un total de 15 muestras entre los años 2002 y 2004 (período de lluvias) tanto en los afluentes principales como en el curso del río mismo. Solamente las campañas de muestreo de noviembre del 2002 y abril del 2003 fueron relativamente completas.

Los datos isotópicos en la Recta Meteórica Local (véase Gráfico 10-13), indican que las aguas de los afluentes de la parte alta no muestran evaporación, aun en la época de estiaje (noviembre) y del mismo modo se puede ver que las aguas en un período de crecidas (abril 2004), no muestran diferencia entre las aguas del sector alto con aquellas cercanas a la desembocadura, Balsamal Lajas y Uña de Gato respectivamente, debido a la recarga en la misma mayor altitud promedio.

Gráfico 10-13: Comportamiento Isotópico de las Aguas Superficiales en el Acuífero Zarumilla



Fuente: Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006 (OIEA, Abril, 2009)

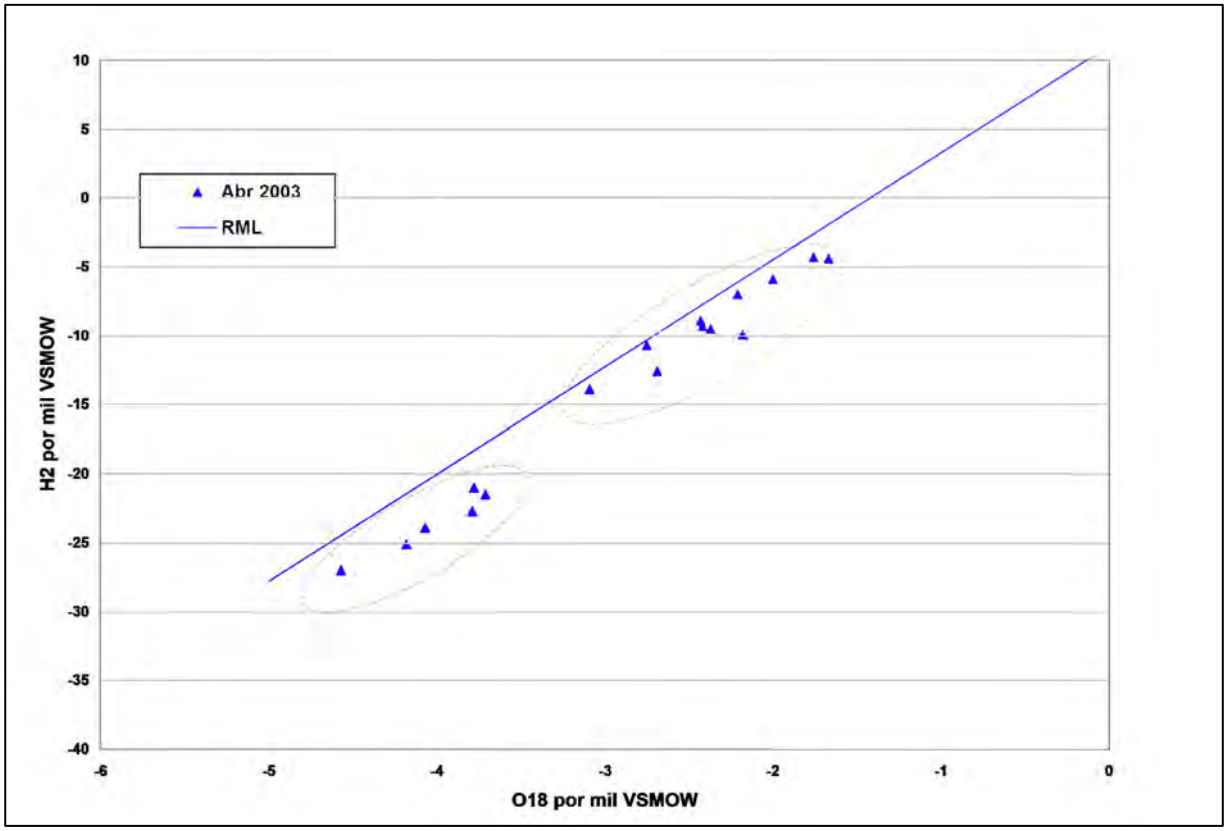
Considerando las muestras que se apartan de la Recta Meteórica Local, se determinó la Recta de Evaporación que tiene una típica inclinación de 4.5 e indica hasta 15 % de evaporación en noviembre 2003.

Aun cuando el número de muestras y su sistematización no son suficientes se puede identificar esta agua como fuente de recarga del acuífero superficial. El contenido isotópico corresponde a un promedio de las lluvias que caen en la parte alta e intermedia de la cuenca y son aguas cuyo contenido de 18O varía entre -3‰ y -5‰.

10.9.1.3 Isotopía de las Aguas Subterráneas

De acuerdo con la información proporcionada por el Proyecto GIRHT, las aguas subterráneas muestran un comportamiento isotópico bastante definido, las aguas pertenecientes al acuífero freático conectado al río Zarumilla al parecer difieren de las aguas de los acuíferos más profundos. Esta separación en el gráfico ^{18}O / ^{2}H, ya había sido observada por Luis Araguáz *et al*, en el trabajo realizado en el año 1992. El Gráfico 10-14 representa las aguas subterráneas de abril 2003, y en ella se observa claramente la separación entre el acuífero somero y el profundo.

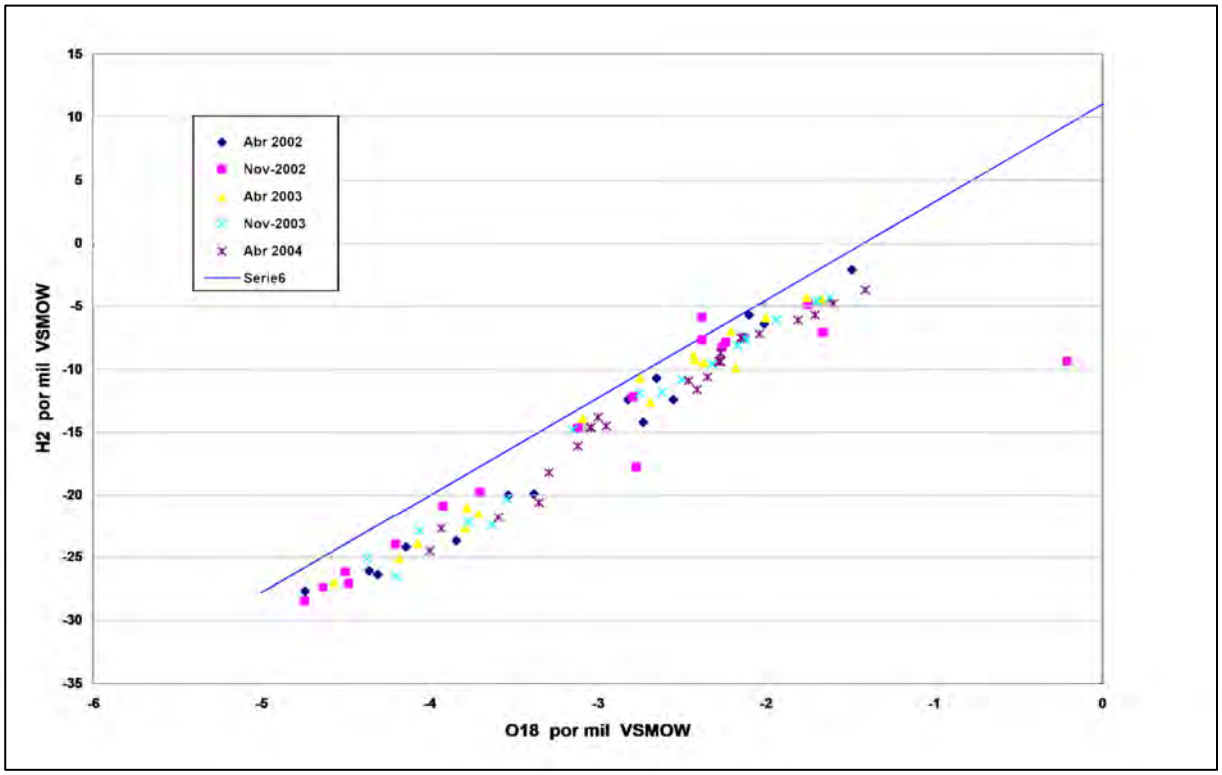
Gráfico 10-14: Comportamiento Isotópico de las Aguas Subterráneas en Abril 2003 en el Acuífero Zarumilla



Fuente: Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006 (OIEA, Abril, 2009)

En el Gráfico 10-15, donde se han representado todos los análisis realizados hasta la fecha, un total de 93 análisis de muestras tomadas de 30 pozos y en 5 campañas de muestreo. Los pozos someros, localizados en el acuífero freático, tienen un contenido de ^{18}O comprendido entre -3.6‰ y -4.8‰, en cambio las aguas de los pozos profundos varían entre -1.4‰ y -3.1‰.

Gráfico 10-15: Comportamiento Isotópico de las Aguas Subterráneas en el Acuífero Zarumilla



Fuente: Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006 (OIEA, Abril, 2009)

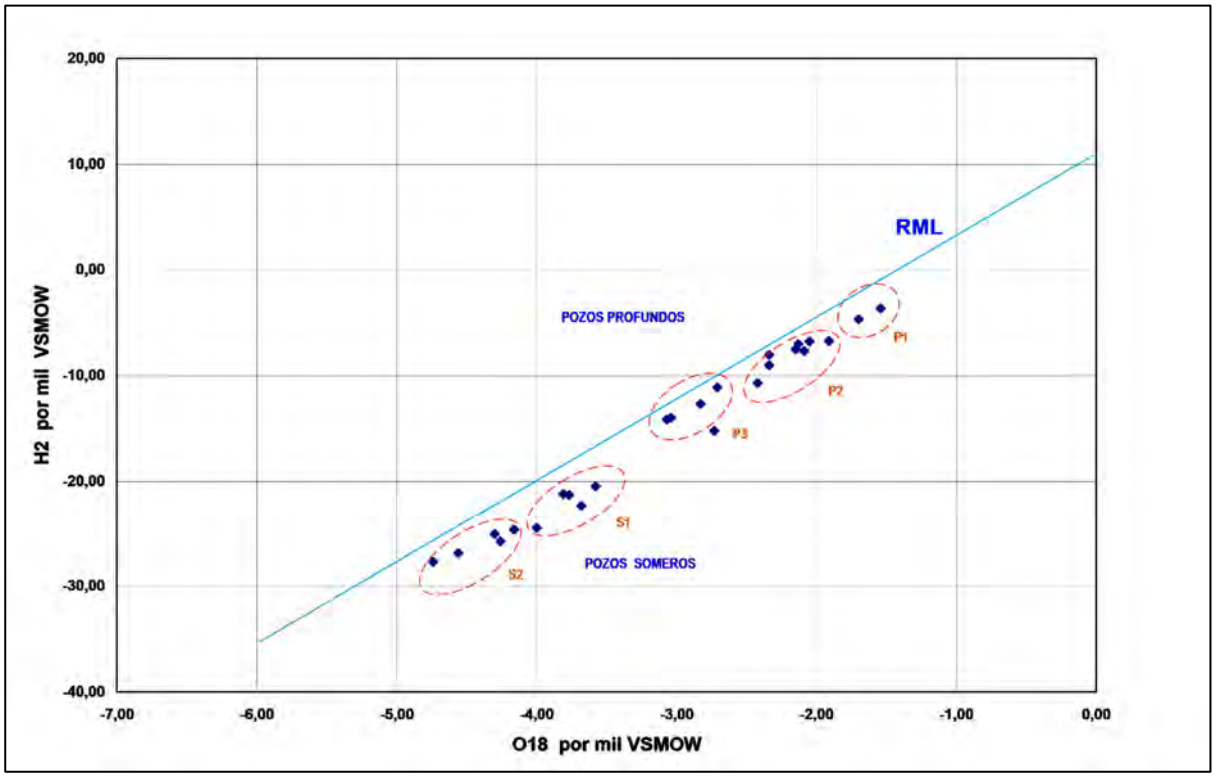
Con la finalidad de comprender e interpretar mejor los datos obtenidos, se estudiaron los pozos que tenían más de una muestra y se decidió por un valor promedio, en el caso de ser muy similares y en aquellos donde había mucha disparidad se consideró que los valores menos evaporados eran los más representativos de un buen análisis. Con estos valores medios o representativos, se elaboró el Gráfico 10-16.

Los datos se relacionaron a la Recta Meteórica Local. De su análisis se puede dividir las aguas de los pozos profundos en tres grupos P1, P2 y P3 y en los pozos someros, propios del acuífero freático se distinguen dos grupos S1 y S2.

Dentro de los pozos someros, el grupo S1 representa el acuífero freático del Zarumilla, y son las aguas que muestran mayor evaporación, esto debido a que el lecho del río tiene una gradiente muy pequeña en el sector bajo del valle y debe existir alimentación al río con aguas de retorno de riego que son evaporadas. El grupo S2 corresponde al acuífero freático de las quebradas afluentes al Río Zarumilla, son aguas menos evaporadas que el subgrupo S1 y a su vez las más livianas dentro de las aguas subterráneas, debido a la recarga a una altitud hasta 200 m, o – más probable – tener mayor porcentaje de filtración del río o canales de riego que agua subterránea de recarga local.

Las aguas de los pozos profundos fueron divididas en tres grupos, lo cual podría significar un sistema acuífero con tres estratos separados con recargas diferentes; sin embargo, el grupo P3, no es claro si forma en sí un grupo separado o es producto de la mezcla de aguas profundas con las del acuífero freático conectado al Zarumilla. Al menos hay pozos que están habilitados en ambos acuíferos, el freático y el profundo.

Gráfico 10-16: Grupos de Pozos Someros y Profundos en el Acuífero Zarumilla



Fuente: Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006 (OIEA, Abril, 2009)

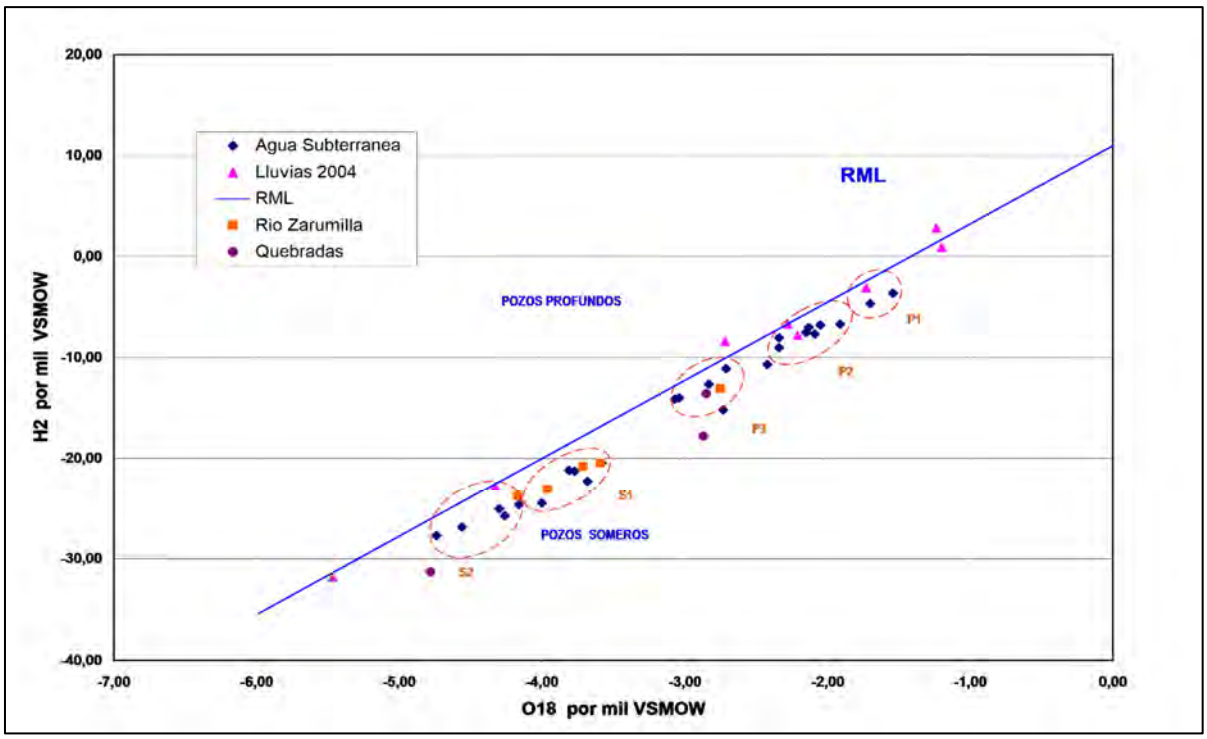
El grupo de aguas señaladas como P1, provienen de los pozos habilitados entre 180 y 220 metros de profundidad, es decir los pozos más profundos de la zona o área de estudio. El grupo P2 está conformado por los pozos profundos habilitados entre 60 y 120 metros y constituyen la mayor parte de los pozos profundos.

Lo curioso de estas agrupaciones, es que desde el punto de vista lógico las aguas más profundas deberían estar relacionadas con zonas de recarga localizadas a mayor altitud, sin embargo, en este caso se aprecian aguas que tienen un contenido isotópico propio de las precipitaciones que caen alrededor de los 50 m.s.n.m.

Las aguas subterráneas someras son isotópicamente más ligeras por ser alimentadas por filtración del río, que proviene de una altitud promedia ~ 760 ± 200 m mayor que la recarga local de los acuíferos profundos, si se asume un gradiente vertical de 3 ± 0.3 ‰ para δ18O y 24 ± 2.4 ‰ para δ2H en las precipitaciones regionales (Mallén et al. 2020, boletín INGEMMET, en impresión). En los grupos P2 y P3 puede haber crecientes porcentajes de filtración de riego. Cuanto mayor el porcentaje de filtración del río o riego (que también proviene de arroyos y ríos) isotópicamente más ligera es el agua subterránea. Dos muestras más afectadas por evaporación son otro indicio de agua de riego contribuyendo al grupo P3, y más aún a los pozos someros (véase Gráfico 10-16).

Tratando de obtener una claridad sobre las zonas de recarga se confeccionó el Gráfico 10-17, donde a las muestras de agua subterránea se han agregado los análisis isotópicos del Río Zarumilla, las quebradas afluentes y las precipitaciones del año 2004. Como se observa, hay algunas insinuaciones de correspondencia, pero aún faltan análisis y un modelo hidrogeológico conceptual, donde se incluya el conocimiento de las precipitaciones, recarga, movimiento, geometría acuífera, almacenamiento, descarga.

Gráfico 10-17: Comportamiento Isotópico de Aguas Subterráneas, Superficiales y de Lluvia en el Acuífero Zarumilla



Fuente: Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006 (OIEA, Abril, 2009)

10.9.2 Relaciones Isotópicas

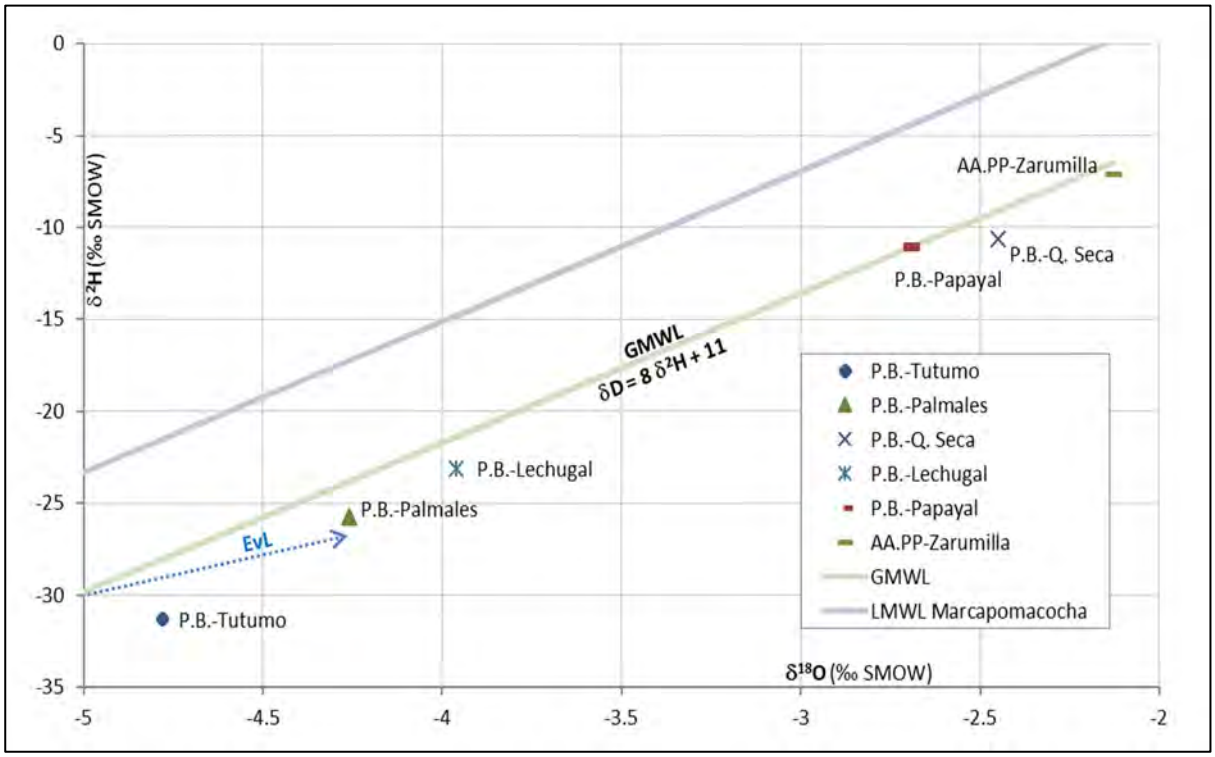
10.9.2.1 Relaciones Isotópicas δ2H-δ18O

Los análisis de $\delta^{2}H$-$\delta^{18}O$ en 6 de los pozos muestran la misma variación como las aguas subterráneas profundas y someras en la “Caracterización isotópica acuífero rio Zarumilla” del 2004.

Los pozos de Qda. Seca, Papayal y Zarumilla presentan la típica signatura de agua subterránea de recarga local.

En Tutumo, Palmales y Lechugal predomina filtrado de los ríos al costado, y/o agua de riego de la misma fuente. Los ríos recargados pocos cientos metros más alto en promedio, son isotópicamente más ligeros por efecto de altitud, mientras no es significante la continentalidad en la cabecera de las cuencas. La influencia de agua de riego en estos tres pozos se refleja también en un avance de 4, 3 y 2 % de evaporación, que genera un característico desplazamiento de la línea meteórica a lo largo de una línea de evaporación (EvL) d inclinación 4.5 (véase Gráfico 10-18). En aguas subterráneas de recarga local solo 0 a 2 % del agua se evaporó antes de la infiltración en el subsuelo. Después ya no cambia la signatura isotópica del agua, contrario a los parámetros hidroquímicos en contacto con la litología.

Gráfico 10-18: δ^2H y $\delta^{18}O$ de Aguas Subterráneas en los Pozos de la Cuenca Zarumilla (Octubre 2019)



La gradiente vertical de las precipitaciones regionales es de aproximadamente 3 ± 0.3 ‰ para $\delta^{18}O$ y 24 ± 2.4 ‰ para $\delta^{2}H$, basado en promedios ponderados de estaciones meteorológicas en Marcapomacocha (Junín) y La Paz, y estaciones o datos de costa y selva (Tabla 10-15).

En época de lluvias, cuando los ríos con elevado caudal alimentan los acuíferos aluviales, los isotopos pesados ^{18}O y ^{2}H se empobrecen más aún por efecto de masa (*rain out*, en el Gráfico 10-19), mientras el efecto de temperatura no influye significantemente en las variaciones estacionales de ^{18}O y ^{2}H en latidudes tropicales.

Basado en las diferencias de signatura isotópica y altitud se calcula el gradiente vertical de ^{18}O y ^{2}H entre Marcapomacocha y estaciones de selva y costa:

$$\frac{\Delta\ ‰}{4\,477 - \text{Altitud de recarga (m s.n.m.)}}$$

Donde:

Δ ‰: diferencia del valor $\delta^{18}O$ o $\delta^{2}H$ entre Marcapomacocha (4477 msnm.) y selva o costa

‰/ km: gradiente vertical del $\delta^{18}O$ o $\delta^{2}H$ por 1 000 m de altitud

Valores casi idénticos resultan cuando se compara con los promedios ponderados de La Paz. No existen todavia otras estaciones alto-andinas con registros isotópicos prolongados que permitan haces estadísticas.

Gráfico 10-19: Composición Isotópica de Precipitaciones Mensuales (Promedio) y Línea Meteórica Local (LMWL) de Correlación Lineal en la Estación Meteorológica Marcapomacocha y Promedios Mensuales y Anual (IAvgO18), y Promedio Ponderado (IWAvgO18 = ∑(δi*Pi)/ ∑Pi) según la Cantidad de Precipitación Mensual

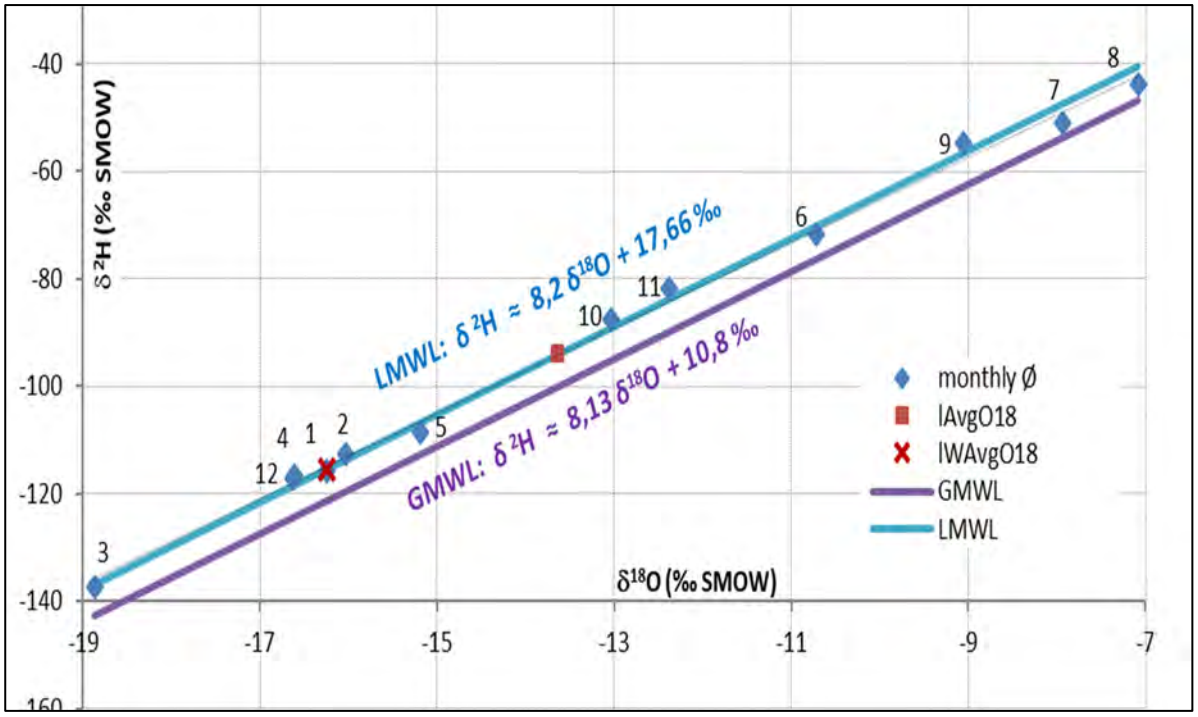


Tabla 10-15: Promedios Ponderados del δ18O y δ2H en Precipitaciones de Estaciones Meteorológicas Regionales (GNIP 2015) y Gradiente Vertical en Relación con Marcapomacocha

Estación Meteorológica	Coordenadas Geográficas		Altitud (msnm)	Promedio Ponderado		Gradiente a Marcapomacocha	
	Latitud (°)	Longitud (°)		(wØ en ‰ SMOW)		(‰/km)	
				$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Marcapomacocha	-11.4	-76.3	4477	-16.3	-116		
La Paz	-16.5	-68.1	635	-14	-99.1	2.7	19.5
Manaus	-3.1	-60	72	-5.5	-33.1	2.4	18.7
Iquitos	-3.8	-73.4	90	-4.85	-29	2.6	19.8
Cuiabá	-15.6	-56.1	165	-5.5	-33.7	2.5	19.0
Isla de Pascua (Rapa Nui) y recarga costera en Lima, Perú	-27.2	-109.4	41	-2.3	-10.3	**3.1**	**23.7**
Piura, piezómetros costeros	-5.2	-80	200	-4	-23.6	2.9	21.5

Fuente: (Mallén et al. 2020, boletín INGEMMET, en impresión)

10.10 CONCLUSIONES

Los potenciales redox altos, la casi saturación de O_2, y la ausencia de significantes concentraciones de Mn(II), Fe(II) y otros metales traza demuestran que se bombeó siempre aguas subterráneas someras, cerca al nivel freático, todavía poco afectadas por la reducción de O_2 y NO_3^-. Ningún pozo presenta significante aporte de agua subterránea de profundidad subóxica con condiciones reductoras de Mn(IV) y Fe(III). Estas condiciones óxicas y el pH

neutro (7-8) aseguran que metaloides y metales pesados no afecten la calidad de las aguas subterráneas en los pozos locales.

Se diferencia generalmente dos grupos de agua subterránea en los 10 pozos:

- Aguas someras poco mineralizadas, tipo **HCO_3**-Cl-SO_4-**Na**-Ca-Mg, en **P.B.Tutumo** y P.B.**Noblecilla,** y tipo **Cl**-SO_4-HCO_3-**Na**-Ca-Mg en **P.B. Lechugal** y **P.B**. **Balsalito**, y.
- Agua de equilibrio avanzado con la litología alumino-silicatada que se refleja en la mineralización relativamente mayor, tipo **Cl**-(SO_4-HCO_3)-**Na**-(Ca-Mg), es decir mayor predominio de Cl^- y Na^+, y un ligero aumento del pH a 7.8-8.0.

Las aguas poco mineralizadas del primer grupo (pozos P.B. Tutumo, P.B. Noblecilla, P.B. Lechugal y P.B. Balsalito) son aptos para riego sin restricciones (véase Gráfico 10-3).

En Tutumo, Palmales y Lechugal predomina filtrado de los ríos al costado, y/o agua de riego (también de origen fluvial), que están empobrecidos de los isotopos pesados ^{18}O y ^{2}H por los efectos de:

- Altitud (gradiente vertical de 3 ± 0.3 ‰ para $\delta^{18}O$ y 24 ± 2.4 ‰ para $\delta^{2}H$), porque se originan pocos cientos metros más alto al sur, y
- Masa (*rain out*) en época de lluvias, cuando elevado caudal genera infiltración de los rios a los acuiferos adyacentes.

Los pozos P.B. Qda. Seca, P.B. Papayal y AA.PP Zarumilla presentan el típico sello de agua subterránea de recarga local a menos de 100 msnm.

El segundo grupo requiere precaución en el uso para riego. La avanzada mineralización e intercambio de cationes convierte las aguas de los pozos P.B. Palmales, P.B. Qda. Seca y AA.PP Huaquillas en los más críticos para el riego (C3S4), con alto y muy alto peligro de salinización y alcalinización de suelos. En caso del pozo P.B. Palmales proviene la salinidad del porcentaje de agua subterránea de recarga local.

La salinidad es similar en los pozos Chacras (C3S3) y Papayal (C3S2), e incluso mayor en Zarumilla (C4S2), pero el peligro de alcalinización se reduce, debido a menor contenido de Na^+.

El contacto exclusivo con alumino-silicatos deja las aguas subterráneas mayormente subsaturadas de Calcita (SI-$CaCO_3$ = 0 a -1.2).

Aunque las aguas subterráneas de los pozos sean jóvenes, predomina siempre Na^+ como principal catión, y Cl^- como principal anión en 8 de los 10 pozos analizados, debido a mayor tiempo de residencia de aguas más profundas (> 50 m, como se menciona en documentos del Proyecto Binacional Puyango-Tumbes 2003) y/o el contacto del agua subterránea con evaporitas en terrazas y depósitos marinos en la cuenca más baja cerca de la costa.

Las concentraciones de Na^+ siempre superiores a las de Cl^- indican un intercambio generalizado de cationes en los sedimentos arcillosos en la parte baja de la cuenca del Zarumilla.

El intercambio de cationes avanzó a un enriquecimiento extremo de Na^+ a 93-94 eq.% de los cationes en los pozos P.B. **Palmales**, P.B.**Qda. Seca** y **AA.PP-Huaquillas**. La adsorción simultanea de Ca^{2+} y Mg^{2+} genera aguas subterráneas muy blandas (34-39 mg $CaCO_3$/L) de tipo HCO_3-SO_4-**Na**–**Cl**-

El agua subterránea dura del **AA.PP-Zarumilla** es afectada por recarga urbana que contiene el aditivo al cemento $CaCl_2$ (Sika) lixiviado de todo tipo de materiales de construcción. Sin embargo, no está elevada la concentración de NO_3^- que muchas veces está relacionado con recarga urbana por fugas del alcantarillado y de pozos sépticos.

10.11 RED DE CONTROL HIDROGEOQUÍMICO OPTIMIZADA PROPUESTA

El análisis químico de los dos (02) potenciales horizontes del acuífero libre será esencial para confirmar su existencia, por lo tanto, se ha considerado incluir un grupo de pozos someros (menores a 100 m de profundidad), instalados en materiales cuaternarios compuesto por materiales aluviales y macizos rocosos altamente fracturados, y otro de pozos profundos (mayores a los 100 m de profundidad), instalados principalmente en macizos rocosos levemente fracturados de diferentes formaciones (véase Figura 10-5).

La Tabla 10-16 muestra el detalle de los pozos que conforman la red control hidrogeoquímico propuesta (optimizada); y la Figura 10-5 presenta la distribución espacial de los pozos que conforman la red propuesta en el área de estudio.

En general, se ha mantenido la red de control hidroquímica actual, excluyendo los pozos que se encontraban en un estado que no permitía su muestreo (sellados, enterrados, contaminados, entre otras razones), y otros que han sido identificados como No Utilizables en el inventario que forma parte del alcance de la presente consultoría; asimismo, se ha descartado pozos ubicados muy cercanos entre sí y de similar profundidad, y que representarían la misma agua.

Al igual que con la red de control piezométrica, se propone efectuar un monitoreo periódico de los pozos seleccionados e históricos, con la finalidad de definir la existencia de los dos (02) horizontes del acuífero libre interpretado.

Al igual que con la red de control piezométrica, se propone efectuar un monitoreo periódico de los pozos seleccionados e históricos, con la finalidad de definir la existencia de los dos (02) horizontes del acuífero libre interpretado.

Se propone un monitoreo hidrogeoquímico con profundidades y períodos diferenciados, esto con la finalidad de optimizar costos y debido a que probablemente se trate de un solo acuífero. Si los resultados del análisis químico del agua, tanto en pozos someros como profundos, muestren similitudes en dos o tres rondas de monitoreo, incluso, se podría revisar y actualizar el período de monitoreo. Es decir, esta propuesta de monitoreo podrá ser revisada y actualizada frecuentemente.

La Tabla 10-17 presenta la lista de parámetros de campo y laboratorio a ser analizados que se propone ejecutar.

Tabla 10-16: Red de Control Hidrogeoquímico Optimizada Propuesta

N°	Código de Pozo*	Código IRHS	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)		Acuífero Objetivo	Profundidad Actual (m)	Estado del Pozo	Distrito	Sector	Propietario del Pozo	Frecuencia de Muestreo		
			Este (m)	Norte (m)							Mensual	Trimestral	Semestral
Sector Peruano													
1	IRHS-9-ZAR	9	577320	9616463	Somero	8.24	**	Zarumilla	Nueva Esperanza	Grupo de Regantes "Nueva Esperanza"	X		
2	IRHS-11-ZAR	11	575455	9613507	Somero	9.00	**	Zarumilla	Nueva Esperanza	Leonardo Barrero Núñez		X	
3	PER-831	27	581073	9612113	Profundo	120.00	Utilizado	Zarumilla	Zarumilla	Aguas de Tumbes - Pozo Nº 02			X
4	PER-844	30	580208	9612465	Profundo	120.00	Utilizado	Zarumilla	Zarumilla	Agua potable N° 4-8 de la localidad de Zarumilla, administrado por OTASS	X		
5	IRHS-36-ZAR	36	574423	9607559	Somero	8.40	**	Zarumilla	Quebrada Grande	Aureliano Villegas Calderón	X		
6	IRHS-42-ZAR	42	573269	9607974	Profundo	130.00	**	Zarumilla	El Santuario	German Gaspar Quiroz Severino	X		
7	IRHS-110-AGV	110	584007	9610265	Somero	6.35	**	Aguas Verdes	Nueva Esperanza	Gerardo Camizan Neyra		X	
8	PER-751	137	582861	9612758	Somero	6.39	Utilizable	Aguas Verdes	Pocitos	Rafael Guerrero Peña			X
9	PER-746	209	582937	9614109	Profundo	110.00	Utilizado	Aguas Verdes	Canario I	Comité de Regantes Cruz - Canario I			X
10	IRHS-224-AGV	224	581859	9614442	Profundo	98.00	**	Aguas Verdes	Complejo	Aguas de Tumbes - Pozo Nº 05		X	
11	IRHS-317-AGV	317	584446	9613968	Somero	15.65	**	Aguas Verdes	La Pitaya	David Murillo Chanta			X
12	IRHS-320-AGV	320	584680	9610813	Somero	16.13	**	Aguas Verdes	Cuchareta	Población " Cuchareta Baja"			X
13	PER-88	36	588442	9602700	Somero	5.68	Utilizable	Papayal	La Coja	Comité de Riego "La Coja"			X
14	PER-392	45	586259	9604268	Somero	15.55	Utilizable	Papayal	Baldarrago	Herederos Medina Arica			X
15	PER-565	52	585024	9605525	Profundo	87.00	Utilizado	Papayal	Papayal	Aguas de Tumbes - Papayal			X
16	PER-110	82	587922	9607273	Somero	6.00	Utilizable	Papayal	Las Delicias	Comité Agrario Las Delicias		X	
17	PER-727	07	583249	9595779	Somero	7.20	Utilizable	Matapalo	Refugio	Beato Cuello Zurita			X
18	IRHS-61-MAT	61	585736	9590320	Somero	6.70	**	Matapalo	Las Peñitas	Felicio Ramírez Prado		X	
19	PER-64	122	589012	9592665	Somero	35.37	Utilizable	Matapalo	Matapalo	Población Matapalo			X
20	PER-214		587089	9591440	Somero	40.24	Utilizado	Matapalo	I. Noblecila	Agua potable de la localidad de Isla Noblecilla	X		
21	PER-66	194	588982	9600274	Somero	25.25	Utilizado	Papayal	Lechugal	Población Lechugal	X		
22	PER-465		585870	9597689	Somero	40.00	Utilizable	Matapalo	Algarrobal	7 usuarios		X	
23	PER-544		585250	9613280	Somero	9.00	Utilizado	Aguas Verdes	Loma Saavedra	Zocola Jose	X		
24	PER-428		586076	9612790	Somero	46.03	Utilizable	Aguas Verdes	Loma Saavedra				X
25	PER-865		575183	9615118	Profundo	100.00	Utilizado	Zarumilla	El Bendito		X		
26	PER-743		582983	9605899	Profundo	200.00	Utilizado	Papayal	El Pasayo				X
27	PER-805		581791	9607014	Profundo	96.00	Utilizado	Papayal	El Pasayo		X		
Sector Ecuatoriano													
1	ECU-25		599364	9594005	Profundo	60.50	Utilizado	Palmales	06 de Noviembre		X		
2	ECU-251		590437	9594901	Somero	55.70	Utilizado	Carcabón	Qda. Seca	Comunidad	X		
3	ECU-505		587255	9604130	Profundo	83.25	Utilizado	Chacras	Balsalito	Junta de Balsalito			X
4	ECU-420		588794	9607698	Profundo	126.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Junta Agua Chacras			X
5	ECU-515		585111	9615003	Profundo	183.00	Utilizado	Huaquillas	Huaquillas	Junta Agua Huaquillas	X		
6	ECU-55		596926.99	9587712.05	Profundo	65.00	Utilizado	Palmales	Manabi el Oro	Junta Agua Manabi El oro		X	
7	ECU-46		597536	9593020	Somero	18.00	Utilizado	Palmales	San Pedro	Jimmy Riera			X
8	ECU-235		590536	9605024	Profundo	120.10	Utilizado	Chacras		Francisco Ramón Rodriguez			X
9	ECU-335		589909	9605006	Profundo	120.57	Utilizado	Chacras		Amelia Borja Ochoa		X	
10	ECU-407		588992	9611082	Profundo	102.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Junta Agua Huaquillas		X	
11	ECU-144		591470	9611453	Profundo	140.20	Utilizado	Chacras		Rolando Mora			X
12	ECU-228		590586	9612960	Profundo	103.80	Utilizado	Huaquillas		Eliseo Castillos			X
13	ECU-214		590719	9613422	Somero	54.95	Utilizado	Huaquillas		Julia María Rodríguez			X
14	ECU-382		589357	9612136	Somero	40.00	Utilizado	Huaquillas		Oviedo Benito		X	
15	ECU-470		587772	9609745	Profundo	60.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Aronte	X		
16	ECU-381		589372	9612590	Profundo	80.00	Utilizado	Huaquillas		Humberto Ortiz			X
17	ECU-116		591973	9614122	Profundo	80.00	Utilizado	Huaquillas		Darwin Hidalgo	X		
18	ECU-197		590818	9614600	Profundo	100.00	Utilizado	Huaquillas		Amable Paladines			X
19	ECU-446		588135	9610128	Profundo	60.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Aronte	X		
20	ECU-112		592531	9592948	Profundo	124.00	Utilizado	Palmales	El Progreso	Iñiguez		X	
21	ECU-356		589599	9603666	Profundo	105.60	Utilizado	Carcabón	Guabillo	Honores			X

N°	Código de Pozo*	Código IRHS	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)		Acuífero Objetivo	Profundidad Actual (m)	Estado del Pozo	Distrito	Sector	Propietario del Pozo	Frecuencia de Muestreo		
			Este (m)	Norte (m)							Mensual	Trimestral	Semestral
22	ECU-419		588798	9606307	Profundo	150.00	Utilizable	Chacras	Chacras	Cordoba E			X
23	ECU-396		589194	9608178	Profundo	87.00	Utilizado	Chacras	Chacras	ORG Mensajeros de la Paz		X	
24	ECU-59		596658	9587784	Somero	23.00	Utilizable	Palmales	Manabi El Oro	Asociación de Riego Manabi		X	
25	ECU-06		601117	9594788	Somero	31.20	Utilizado	Palmales		Manuel Herminio Garzón	X		
26	ECU-212		590724	9601247	Somero	30.00	Utilizado	Carcabón	Guabillo	Florencio Flores	X		
27	ECU-431		588500	9607398	Somero	40.00	Utilizado	Chacras	Chacras				X
28	ECU-456		587967	9610202	Somero	40.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Aronte			X
29	ECU-173		591066	9611302	Somero	33.00	Utilizable	Chacras		Patricio Pardo			X
30	ECU-140		591583	9614030	Somero	23.93	Utilizable	Huaquillas			X		

Nota:

* El código del pozo fue el establecido en el Inventario 2019. Cuando no se identificó el pozo en el inventario, se creó un código basado en el código IRHS asignado y el distrito en el que se ubica el pozo.

** Debe ser definido en el primer monitoreo ejecutado. No se descartó debido a que:
i) Aunque no se pudo medir su profundidad actual en el inventario 2019, éste se registró en estado UTILIZADO y en algunos casos hasta trabajando durante el censo
ii) Fue monitoreado en campaña junio 2019 por la ALA TUMBES; por lo que se asume que su estado es UTILIZADO o UTILIZABLE y podría ser considerado en la red propuesta de verificarse su operatividad.
En celda gris los pozos que se mantienen de la red de control piezométrica o hidrogeoquímico actual ALA TUMBES

123 Profundidad inicial registrada en el inventario 2019, se consideró a falta de profundidad actual

123 Datos tomados de red piezométrica o hidrogeoquímica actual ALA TUMBES, se consideró a falta de profundidad actual del pozo en el Inventario 2019

123 Dato del pozo registrado en las pruebas de bombeo ejecutadas el 2019, se consideró a falta de este en el inventario 2019

Figura 10-5: Red de Control Hidrogeoquímico Optimizada Propuesta

Tabla 10-17: Parámetros Propuestos A ser Analizados

Parámetro	Tipo
Nivel de agua	Medición *in situ*
Descripción Física	
pH	
Conductividad eléctrica	
Sólidos Totales Disueltos	
Temperatura (°C)	
pH	
Conductividad eléctrica	
Turbidez	
Sólidos Totales Disueltos	
Sólidos Totales Suspendidos	
Alcalinidad (Carbonato, Bicarbonato, Total)	
Cloruros	
Sulfatos	
Sulfuros	
Fluoruros	
Fosfatos	
Cianuro Total	
Amonio	
Nitratos	
Nitritos	
Bromatos	
Bromuros	
Metales totales y disueltos por ICP - MS (aluminio, cobre, plata, níquel, plomo, hierro, zinc, cadmio, boro, molibdeno, manganeso, litio, fósforo, sílice, calcio, magnesio, sodio, potasio)	
Hidrocarburos de Petróleo Totales	
Contenido de Orgánicos Volátiles	
Coliformes fecales	
Coliformes totales	

11 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO

Para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual se ha utilizado los datos y resultados del balance hídrico obtenidos con la ayuda del modelo SWAT (Capítulo 4) y se ha complementado con los análisis e interpretaciones geológicas, geofísicas e hidrodinámicas realizadas en campo.

La interpretación geológica ha ayudado a definir las características litológicas de las formaciones geológicas presentes en la cuenca de estudio. A esto también ha ayudado la interpretación de la geología estructural, que aunque con limitaciones, muestra los sectores con mayor presencia de fracturamiento tanto lateral como vertical. En este sentido, la parte alta o cabecera de la cuenca, a pesar de estar conformada por rocas metamórficas, es considerada como una zona de recarga, aunque restringida al grado de fracturamiento y la presencia de materiales meteorizados que conforman los suelos.

En ausencia de datos litológicos de los pozos inventariados, el aporte de la geofísica ha sido enfocado como un sustento para la interpretación geológica, en base a los resultados de las resistividades eléctricas; los cuales han ayudado a definir las profundidades de los contactos entre las potenciales zonas de permeabilidades altas.

Complementariamente, las pruebas de bombeo han aportado principalmente, aunque con bastante limitación, datos de transmisividad y permeabilidad, de las potenciales zonas productivas de agua subterránea (acuíferos). Al haber tenido la limitación en la cantidad de pruebas de bombeo (solo 10 pruebas para toda la cuenca), se ha considerado extrapolar los valores obtenidos para el resto del área, en base a literatura y experiencia en terrenos similares, aunque éstos se deben considerar como valores referenciales.

Para la definición del modelo hidrogeológico conceptual, se ha tomado en cuenta el balance hídrico que gobierna a los recursos hídricos de la cuenca.

En este caso, el principal aporte de agua a la cuenca está representado por la Precipitación, mientras que las salidas están dadas por la Evapotranspiración, la Escorrentía, la Percolación, la Recarga y la Revaporación (almacenamiento).

Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Revaporación (Almacenamiento)

Para una mejor aproximación del balance hídrico, se ha efectuado un cálculo individual de cada subcuenca que compone la cuenca hidrogeológica Zarumilla (siete (07) subcuencas), aunque dos (02) de ellas representan intercuencas en la parte baja de la cuenca, esto con la finalidad de caracterizar y considerar el aporte parcial que podrían tener hacia el acuífero en estudio (véase Gráfico 11-1).

Los cálculos muestran que la mayor precipitación se presenta en las subcuencas altas (3, 5 y 6), con valores que van desde 722.2 mm a 918.8 mm (véase Gráfico 11-2 y Tabla 11-1). Esto es congruente con la zonas típicas de mayor precipitación que generalmente se encuentran en las altas montañas.

Asimismo, para una mejor visualización del balance hídrico, se presenta la Tabla 11-2, expresado en volúmenes anuales (m^3/año) y el Gráfico 11-3, que muestra de manera esquemática los ingresos y salidas de agua en la cuenca hidrogeológica Zarumilla.

Gráfico 11-1: Ubicación Esquemática de Subcuencas en el Acuífero Zarumilla

Gráfico 11-2: Precipitación Promedio Anual por Subcuencas (mm)

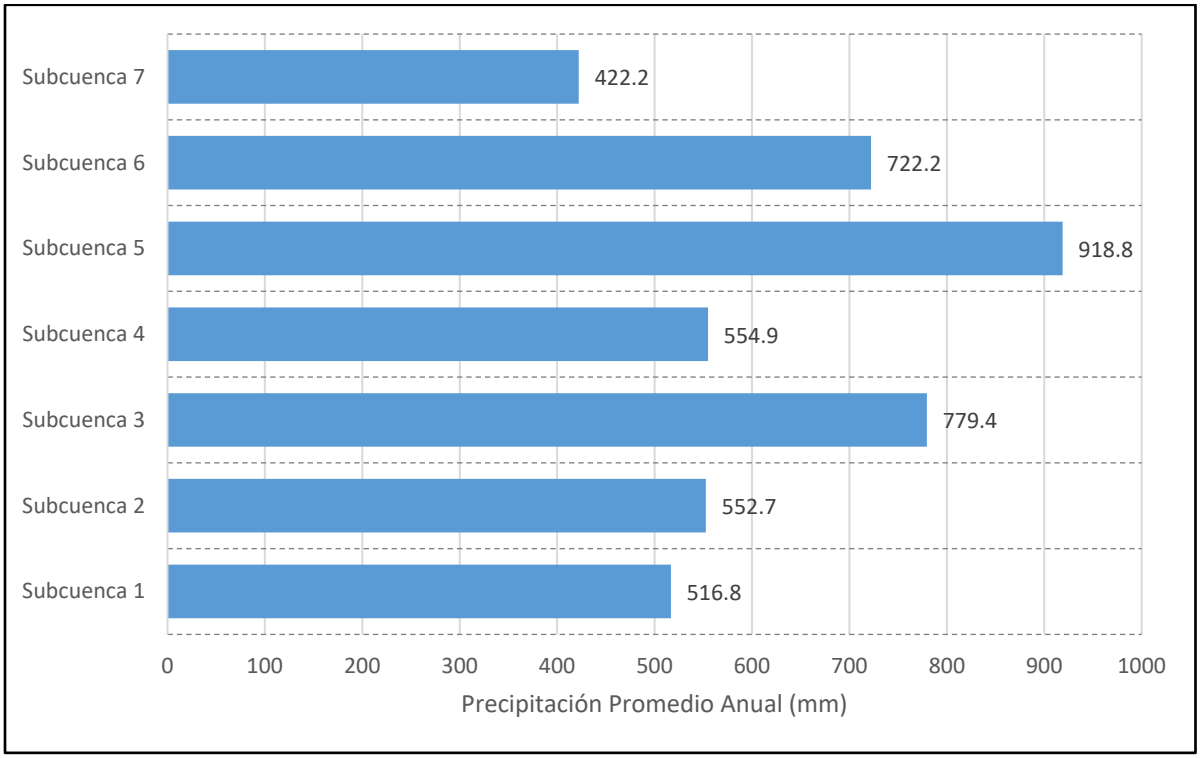


Tabla 11-1: Balance Hídrico por Subcuencas (mm/año)

Sub-cuenca	Area (km^2)	Precipitación (mm/año)	Evapo-transpiración (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	Percolación (mm/año)	Recarga (mm/año)	Revaporación (Almacenamiento) (mm)
1	168.90	516.81	380.52	40.51	87.72	43.80	-35.75
2	239.71	552.65	397.27	54.11	73.82	36.90	-9.44
3	138.49	779.44	439.64	147.62	105.05	52.51	34.60
4	13.18	554.93	389.55	56.96	92.77	46.38	-30.73
5	225.71	918.84	446.60	201.88	177.90	88.77	3.70
6	257.02	722.17	375.70	122.99	151.50	75.62	-3.64
7	108.03	422.23	418.29	1.33	0.55	0.27	1.79
Promedio		**638.15**	**406.80**	**89.34**	**98.47**	**49.18**	**-5.64**

Tabla 11-2: Balance Hídrico de la Cuenca Hidrogeológica Zarumilla (m^3/año)

Parámetro	Ingresos (m^3/año)	Salidas (m^3/año)	(%)	(%)
Precipitación	773 639 546.45		100.00	
Evapotranspiración		468 071 781.55		60.50
Escorrentía		118 327 044.03		15.29
Percolación		127 433 326.79		16.47
Recarga		63 627 265.82		8.22
Revaporación (Almacenamiento)		-3 819 871.74		-0.49
Total	**773 639 546.45**	**773 639 546.45**	**100.00**	**100.00**

El aporte principal, prácticamente en la totalidad, que ocurre en la cuenca hidrogeológica es a través de la ***Precipitación*****,** con un promedio anual de ***638.15 mm*** (equivalente a 773.64 MMC), que mayormente ingresa al acuífero por la zona alta de la cuenca y en menor proporción en las zonas media y baja, aunque éstas se incrementan considerablemente en épocas de lluvia extrema, como, por ejemplo, durante el fenómeno de El Niño.

En contraste, la ***Evapotranspiración*** es la principal salida del agua subterránea de la cuenca hidrogeológica, y se presenta con mayor intensidad en las zonas intermedia y baja de la cuenca hidrogeológica, con un valor promedio anual de ***406.80 mm*** (equivalente a 468.07 MMC), que típicamente ocurre a través de la vegetación cuando la napa freática se encuentra muy somera, usualmente menores a 5 m de profundidad.

Otra de las salidas es a través de la ***Escorrentía*** que ocurre en mayor cantidad en la zona alta de la cuenca, debido a las pendientes del terreno mucho más abruptas que en las zonas intermedia y baja. Para el presente balance hídrico se ha calculado un valor promedio anual de ***89.34 mm*** (equivalente a 118.33 MMC).

Asimismo, se considera como salida a la ***Percolación***, que aporta de manera parcial a la red de drenaje a través de los ríos como flujo base, y para el presente balance hídrico se ha calculado en ***98.47 mm*** (equivalente a 127.43 MMC).

Adicionalmente, otro de los componentes del balance hídrico es la ***Recarga*** promedio anual de la cuenca, que se ha calculado en ***49.18 mm*** (equivalente a 63.63 MMC), véase Tabla 11-3, lo que generalmente ocurre en la zona intermedia y alta de la cuenca. Aunque de manera temporal también ocurre una recarga por efectos del aumento de caudal del río, tanto en la zona intermedia y baja, sobre todo en las épocas de lluvia.

Finalmente, otro de los componentes del balance hídrico es la ***Revaporación*** que ocurre generalmente como un retorno hacia el exterior a través de la zona de aereación, y para la cuenca en estudio tiene un valor promedio anual de ***-5.64 mm*** (equivalente a -3.82 MMC).

Gráfico 11-3: Modelo Hidrogeológico Conceptual y Balance Hídrico del Acuífero Zarumilla

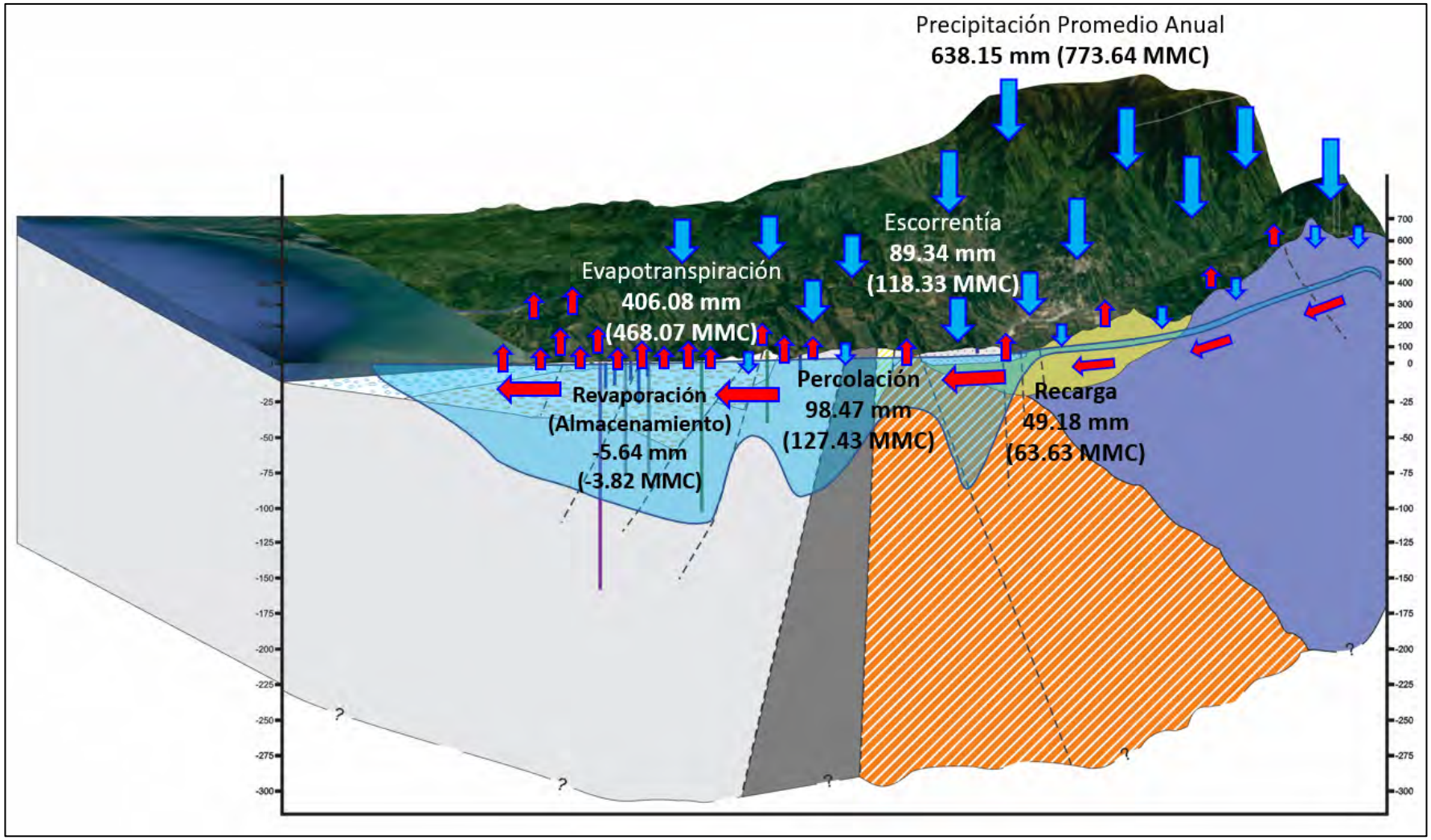


Tabla 11-3: Volumen de Recarga (m^3) al Acuífero en la Cuenca Hidrogeológica Zarumilla

Subcuenca	Área (Km^2)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	168.90	217568.54	266017.50	607127.94	1017006.02	1205414.00	1051993.65
2	239.71	200505.43	245151.42	707000.67	1283023.80	1522146.50	1310350.74
3	138.49	166437.28	183790.08	530534.42	970731.81	1212687.70	1095691.33
4	13.18	13187.54	15649.01	50118.06	91272.47	106132.20	90298.03
5	225.71	500805.35	593843.01	1410868.07	2542781.15	3255009.10	2998433.21
6	257.02	448795.47	566947.57	1503309.98	2625793.43	3216027.00	2889328.88
7	108.03	821.03	550.95	475.33	1874.32	5066.60	5223.25

Subcuenca	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total (m^3/año)
1	887138.81	688 284.39	507 628.95	400 259.22	301 503.39	247 970.54	7 397 913.00
2	1086701.31	830 439.34	604 069.20	465 121.30	334 419.42	255 974.32	8 844 903.00
3	932640.13	722 793.16	529 627.31	409 085.61	293 834.23	224 672.33	7 272 525.00
4	74510.66	56 809.34	41 281.56	31 748.66	22 756.02	17 383.10	611 147.00
5	2588724.42	2 023 794.86	1 490 047.14	1 154 879.07	834 224.16	642 415.80	20 035 825.00
6	2455196.40	1 900 290.22	1 391 339.22	1 074 574.92	772 614.97	591 171.70	19 435 390.00
7	4612.88	3 608.20	2 662.94	2 052.57	1 474.61	1 139.72	29 562.00
Total Recarga Anual							**63 627 266.00**

Es necesario tomar en cuenta que, de acuerdo a la explotación de los pozos inventariados, generalmente ubicado en los valles aluviales compuestos por materiales cuaternarios bastante permeables (gravas y arenas), se deberían considerar como puntos de salida del agua subterránea; sin embargo, debido a que en su totalidad son utilizados para el regadío de las zonas agrícolas ubicados en las mismas zonas aluviales, se consideran que éstas reingresan al acuífero a manera de infiltración, probablemente con ligeras pérdidas despreciables por evaporación que no afecta en mayor proporción.

Para efectos del modelo hidrogeológico conceptual, de manera simplificada y de acuerdo con los cálculos efectuados de la explotación del agua subterránea en la cuenca, con un volumen total de 53.85 MMC (véase Capítulo 7), ésta debería volver al sistema con la misma cantidad, y para efectos del modelo hidrogeológico numérico ésta lo hará a través de los ríos que se consideran que actúan como recolector final del agua de regadío (véase Tabla 11-4).

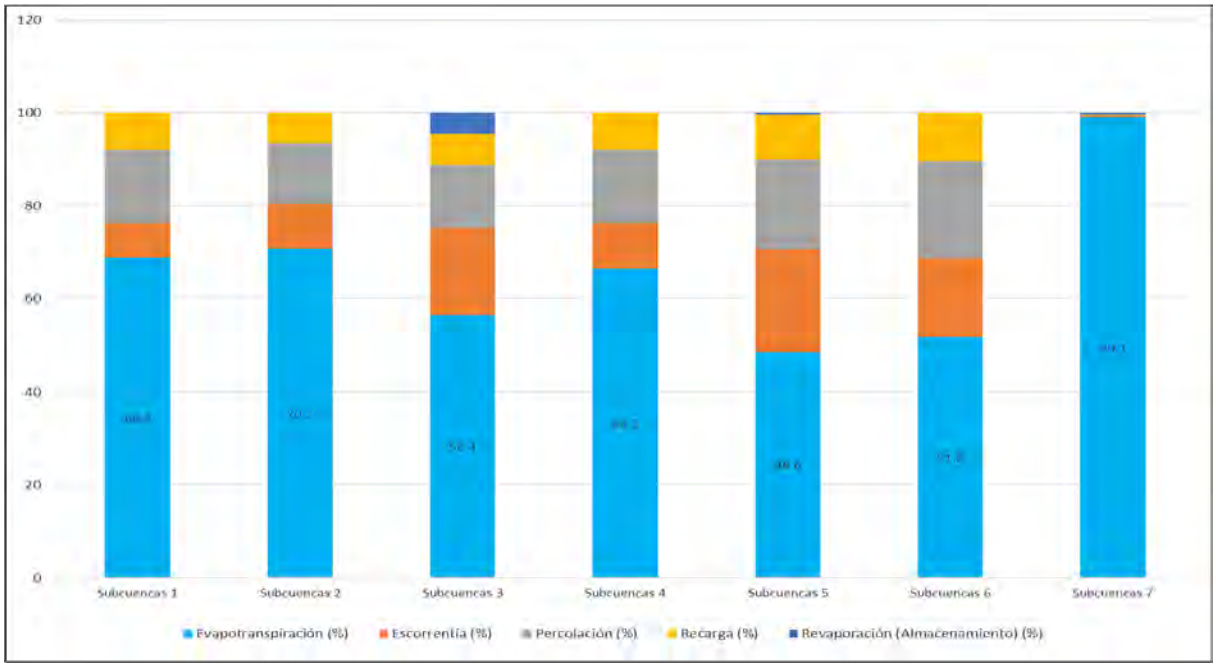
Tabla 11-4: Salida y Reingreso de Agua al Acuífero Zarumilla

Componente	Salida (MMC)	Ingreso (MMC)
Pozos	53.85	
Ríos		53.85
Total	**53.85**	**53.85**

Por otro lado, con la finalidad de determinar las tasas del balance hídrico referente a las salidas (Evapotranspiración, Escorrentía, Percolación, Recarga y Revaporación (Almacenamiento)) con respecto a la entrada (Precipitación), se obtuvo que la evapotranspiración representa el mayor porcentaje de salida del agua subterránea, variando desde 48.6% en la subcuenca 5 hasta 99.1% en la subcuenca 7 (véase Gráfico 11-4).

Esto es congruente, si se tiene en cuenta que el nivel freático se encuentra más somero en la zona costera influenciada, además, por las altas temperaturas; que la zona alta de la cuenca, donde la temperatura es menor y el nivel freático se encuentra a mayor profundidad.

Gráfico 11-4:Tasas del balance Hídrico



11.1 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO

Aunque se ha tenido acceso a información de siete (07) pozos instalados con profundidades mayores a 70 m, uno de ellos hasta aproximadamente 126 m (ANA, 2018); no ha sido posible validar los registros litológicos descritos, debido a que la descripción refiere a una sola unidad litológica perteneciente a materiales cuaternarios, cuando por su profundidad podrían estar instalados en rocas sedimentarias (areniscas y conglomerados).

Sin embargo, en base a la correlación efectuada entre la geología regional, sobre todo estructural, y los sondajes geofísicos (SEV y TDEM) y las pruebas de bombeo, se interpreta que en el área de la Cuenca Zarumilla existe una Unidad Hidrogeológica***,*** compuesta por dos (02) horizontes bien marcados, uno somero representado por los materiales cuaternarios y macizos rocosos altamente fracturados, y otro profundo, por macizos rocosos levemente fracturados.

Por experiencia en otros proyectos en similares condiciones, ha sido posible encontrar acuíferos en rocas ígneas o metamórficas, siempre y cuando estén fracturadas o falladas, como es el caso de la Cuenca Zarumilla.

En este caso, dada las limitaciones de información, esta interpretación tendrá considerables incertidumbres (usualmente en estos casos de hasta 30% a 40%). Para una determinación más aproximada de la disponibilidad hídrica de la Unidad Hidrogeológica interpretada, se requerirá llevar a cabo estudios hidrogeológicos más detallados en áreas específicas, que incluyan la perforación de pozos pilotos y pozos de bombeo, ayudados por estudios geofísicos a través, por ejemplo, de líneas de tomografías eléctricas, en reemplazo de sondajes verticales que son bastante limitados y restringidos a un punto.

11.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Para definir las unidades hidrogeológicas presentes en el área de la Cuenca Zarumilla se han requerido conocer las conductividades hidráulicas (permeabilidad) de las unidades litológicas y sus correspondientes espesores; sin embargo, debido a la ausencia de información sobre la litología y los diseños de instalación de los pozos, se ha asumido un espesor potencial aproximado, en base a los potenciales espesores de los materiales cuaternarios y macizos rocosos altamente fracturados interpretados de la geología regional y los estudios geofísicos.

Para este efecto se ha elaborado ocho (08) secciones hidrogeológicas conceptuales, tanto longitudinales como transversales a la cuenca de estudio; manteniendo las mismas líneas de secciones interpretadas previamente para la geología y geofísica (véase Figura 8-1).

Tomando en consideración que los valores de las conductividades hidráulicas obtenidos de las pruebas en los 10 pozos de bombeo son muy limitados, éstos se han extrapolado únicamente hacia las áreas cercanas a los pozos (zona baja e intermedia y de la cuenca), donde hay mayor presencia de los materiales cuaternarios y macizos rocosos altamente fracturados (Horizonte 1), que podrían representar a la Unidad Hidrogeológica de un ***Acuífero Libre***.

Sin embargo, la parte alta de la Cuenca Zarumilla, al no contar con datos de pruebas de bombeo y por estar conformado mayormente por rocas metamórficas, se ha considerado como una zona de permeabilidad baja, el cual podría interpretarse como una Unidad

Hidrogeológica correspondiente a un ***Acuitardo*** con tendencia en mayor profundidad a un ***Acuicludo***[2].

En consecuencia, la interpretación del modelo hidrogeológico conceptual considera un espesor generalizado del acuífero libre que fluctúa mayormente entre los 60 y 100 m, abarcando casi la totalidad del Horizonte 1, aunque en algunos casos se ha profundizado hasta los 300 m, debido principalmente a los efectos de las fallas geológicas y los sistemas de desplazamiento verticales, como Graben y Horst, donde se ha considerado un mayor grado de fracturamiento de la parte superior del Horizonte 2 (véase Figuras 11-1 a 11-8).

La verificación de estas unidades hidrogeológicas será posible mediante la realización de estudios hidrogeológicos más detallados y sectorizados, que incluyan perforaciones y estudios geofísicos tipo tomografía eléctrica.

11.3 ZONAS DE RECARGA

Por la topografía y geología de la cuenca Zarumilla, se interpreta que la zona de recarga se encuentra en las cabeceras de ésta; es decir, existe un aporte al agua subterránea a través de las precipitaciones en forma vertical en las zonas altas, y de manera lateral para las zonas intermedias y bajas.

Adicionalmente y de manera local, en las zonas bajas, próximos al área de la costa, los ríos representan una zona de recarga temporal, sobre todo en época de avenida; así como las tierras agrícolas, por efectos de los sistemas de riego.

11.4 ZONAS DE DESCARGA

La zona de descarga regional del acuífero Zarumilla es el Océano Pacífico, a través de los estuarios ubicados tanto en territorio peruano como ecuatoriano, y de manera temporal y localizada, los pozos de bombeo constante, sobre todo aquellos que se encuentran en la costa y sirven para abastecimiento de agua potable a las poblaciones urbanas; y en menor proporción algunas quebradas y los ríos en la parte intermedia y baja de la cuenca, a través de los flujos base.

11.5 DIRECCIÓN DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La dirección de flujo del agua subterránea en la cuenca Zarumilla, a escala subregional, es generalmente de sur a norte. Sin embargo, en algunas zonas donde hay quebradas poco profundas, mayormente en la parte intermedia de la cuenca, la dirección del flujo varía y se dirige localmente hacia éstas; así como también debido a la concentración de pozos de bombeo en algunas zonas, de manera localizado, existen unas direcciones convergentes hacia éstos durante las extracciones de agua, retornando a su estado original cuando cesan las extracciones y manteniendo la dirección de flujo hacia el norte con dirección hacia el Océano Pacífico (véase Figura 8-1 en el Capítulo 8).

Adicionalmente, para el modelo hidrogeológico conceptual, se ha considerado unas direcciones de flujo de intercambio lateral que fluye de una subcuenca a otra.

[2] Acuífero: $<10^{-1} – 10^{-6}$ m/s; Acuitardo: $10^{-6} – 10^{-8}$ m/s; Acuicludo: $10^{-8} – 10^{-10}$ m/s; Acuífugo: 10^{-10} - $>10^{-12}$ m/s

Figura 11-1: Sección Hidrogeológica Conceptual 1-1´ (Octubre 2019)

Figura 11-2: Sección Hidrogeológica Conceptual 2-2´ (Octubre 2019)

Figura 11-3: Sección Hidrogeológica Conceptual 3-3´ (Octubre 2019)

Figura 11-4: Sección Hidrogeológica Conceptual 4-4´ (Octubre 2019)

Figura 11-5: Sección Hidrogeológica Conceptual 5-5´ (Octubre 2019)

Figura 11-6: Sección Hidrogeológica Conceptual 6-6´ (Octubre 2019)

Figura 11-7: Sección Hidrogeológica Conceptual 7-7´ (Octubre 2019)

Figura 11-8: Sección Hidrogeológica Conceptual 8-8´ (Octubre 2019)

12 MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

12.1 SELECCIÓN DE CÓDIGO DE MODELAMIENTO

Para la construcción del modelo de flujo de aguas subterráneas se usó MODFLOW-2005 v.1.12.00, el cual es el código para el modelamiento de agua subterránea en 3D basado en diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El software es capaz de representar condiciones relacionadas con el flujo del agua subterránea como la evapotranspiración, recarga, drenaje, interacción del río, entre otras. Su enfoque de diferencias finitas provee la capacidad de calcular el régimen del flujo con excepcional control sobre la discrepancia del balance hídrico, con MODFLOW se puede contar que el flujo que entra al modelo es el mismo que sale del modelo, desde la escala regional a la local y en secciones transversales.

Para el pre-procesamiento, procesamiento y calibración de la simulación de agua subterránea se utilizó la librería de Python llamada Flopy v.3.3.0, esta librería tiene la facilidad de correr variedad de programas de agua subterránea relacionados con MODFLOW, además, tiene la facilidad de aplicar condiciones de borde que varían en el tiempo y el espacio mediante el uso de diccionarios y objetos en forma de matrices de Python que permiten la flexibilidad de lectura e ingreso de datos.

12.2 DISEÑO DEL MODELO DE ACUÍFERO

12.2.1 Diseño del Modelo del Acuífero

El diseño del modelo numérico comprende la determinación de la extensión del acuífero de la cuenca transfronteriza del río Zarumilla, los ríos y quebradas afluentes a éste y la distribución espacial de los pozos de bombeo en el área delimitada.

Aunque se tomó en consideración los datos iniciales del modelo hidrogeológico conceptual, el modelo numérico puede diferir ligeramente en algunos parámetros debido a que no necesariamente se construye con las mismas condiciones establecidas conceptualmente.

La extensión del modelo numérico tanto horizontal como vertical fue determinada para que el modelo permita la simulación de los requerimientos actuales y futuros al sistema del agua subterránea sin la interacción con los bordes externos del modelo. La extensión total del modelo va en la dirección sur-norte, teniendo como coordenada mínima 9570572.39 y como máxima 9621372.39, y en la dirección oeste-este desde la coordenada 572710.55 hasta la 614610.55 en el sistema de proyección WGS 84 UTM, hemisferio Sur, Zona 17. El área activa del modelo corresponde a 109097.75 hectáreas.

En la Figura 12-1 y 12-2 se visualizan la vista en planta e isométrica del modelo numérico.

Figura 12-1: Vista en Planta de la Extensión del Modelo Numérico

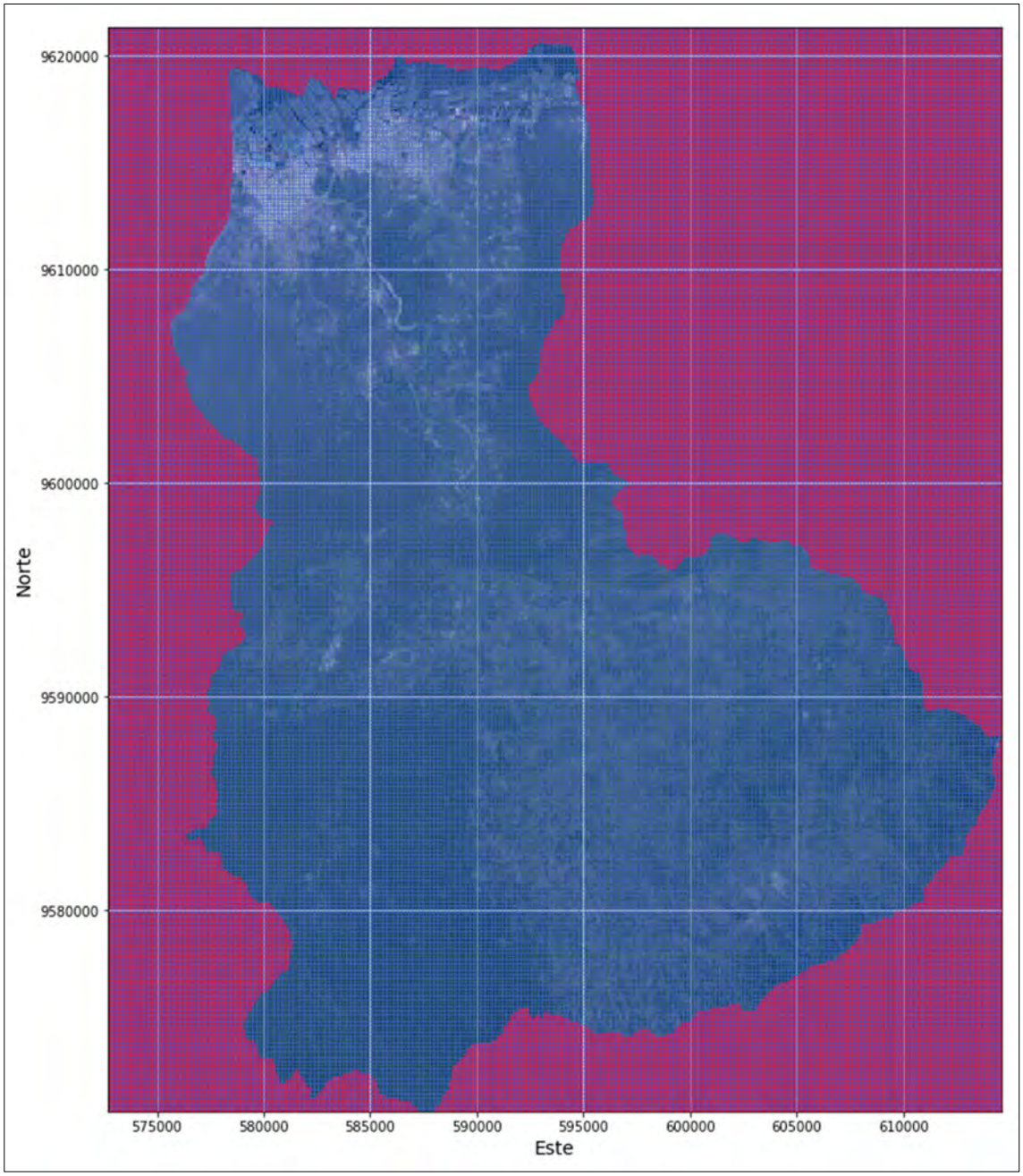
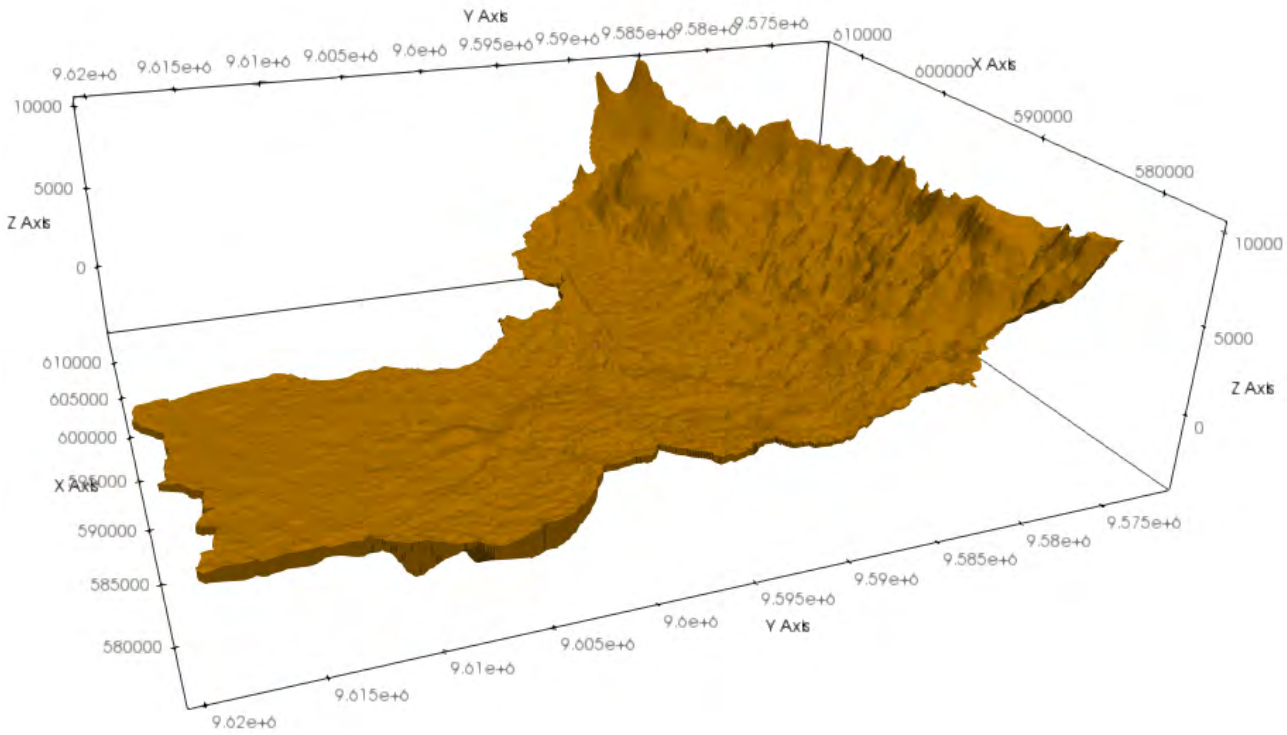


Figura 12-2: Vista Isométrica de la Extensión del Modelo Numérico



12.2.2 Discretización del Sistema Acuífero

El tamaño de celdas para la discretización espacial del modelo tanto horizontal como vertical ha sido conceptualizada de manera que tenga una adecuada resolución que permita representar las principales características del régimen de agua subterránea sin exceder los requerimientos computacionales en la simulación de flujo.

En la extensión del modelo numérico se utilizó una grilla estructurada. La grilla es regular y consta de 419 columnas de un ancho de 100.0 m y 508 filas de un ancho de 100.0 m. La grilla del modelo tiene una rotación de 0.00º grados que permite a la discretización del modelo una buena representación de la dirección de flujo.

En el eje vertical, el modelo nuestra el espesor total del acuífero, con un espesor mínimo de 0.30 m y un espesor máximo de 437 m, compuesta de 02 capas, la primera tiene espesores que varían desde 0.5 m a 31.75 m, mientras que los espesores de la segunda capa varían generalmente desde 0.5 m a 165.62 m, y en algunos casos hasta 435 m; y por debajo de estas capas se tiene una capa de baja permeabilidad. Esta discretización vertical permite representar los principales patrones de flujo vertical en la extensión del modelo y una correcta interacción del acuífero con las condiciones de borde.

En la Figura 12-3 se puede visualizar una sección de corte (A-A´) de la parte central del acuífero, en la cual se ve la distribución vertical de las celdas. En la Figura 12-4 se muestra una representación de vista en planta del refinamiento horizontal utilizado para la grilla del modelo y en la Figura 12-5 se puede visualizar una representación isométrica del refinamiento utilizado para el modelo

Figura 12-3: Vista en Corte de Discretización Vertical del Modelo

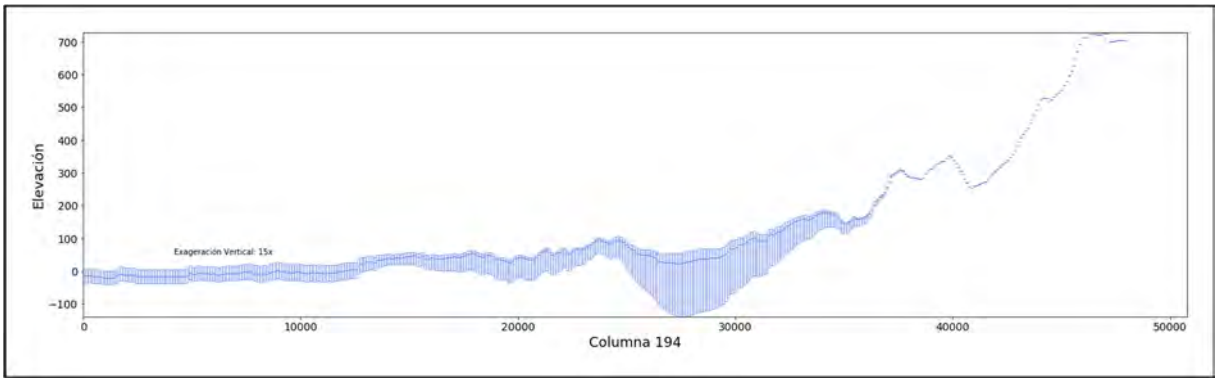


Figura 12-4: Vista en Planta de Discretización Horizontal del Modelo

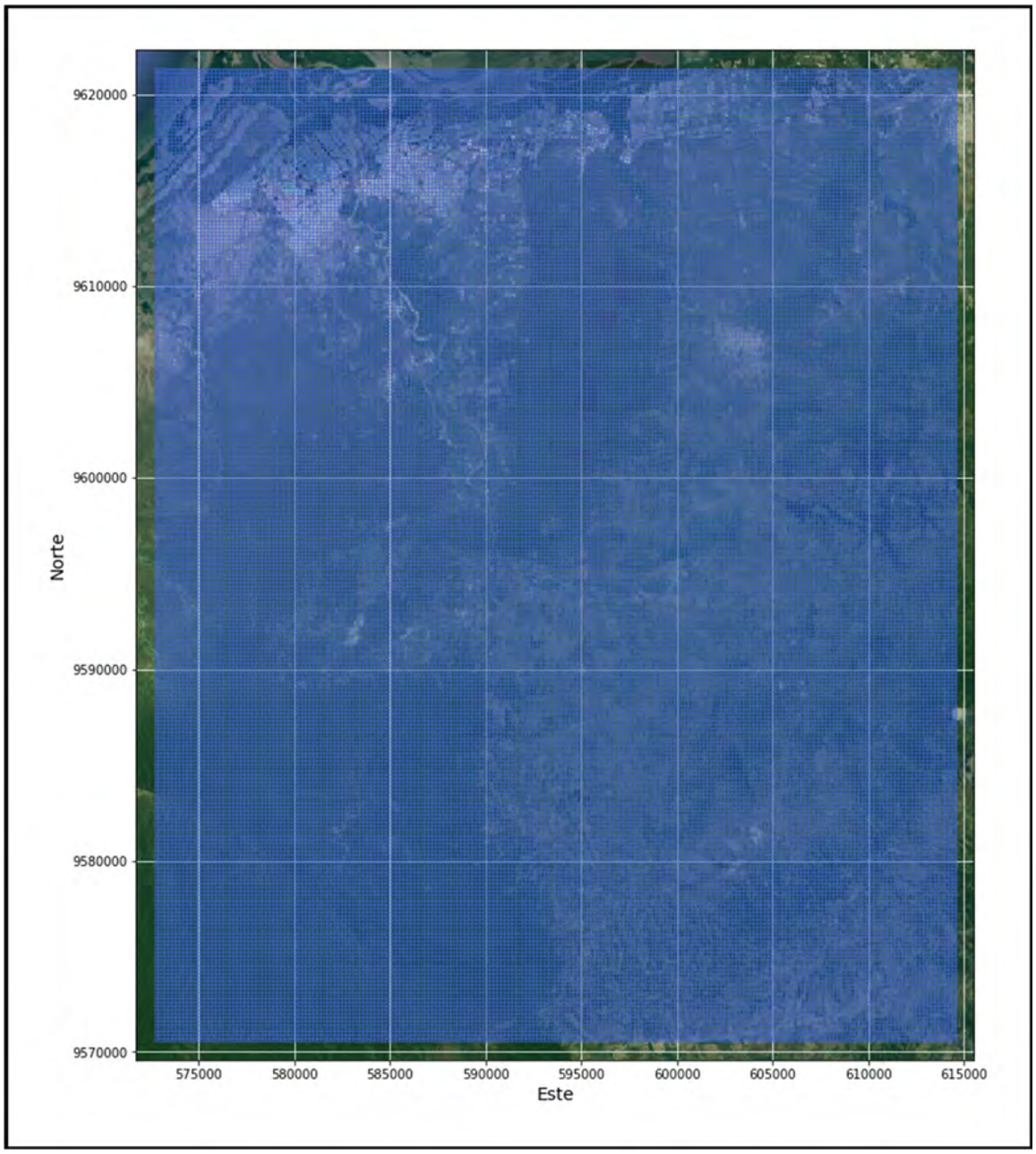
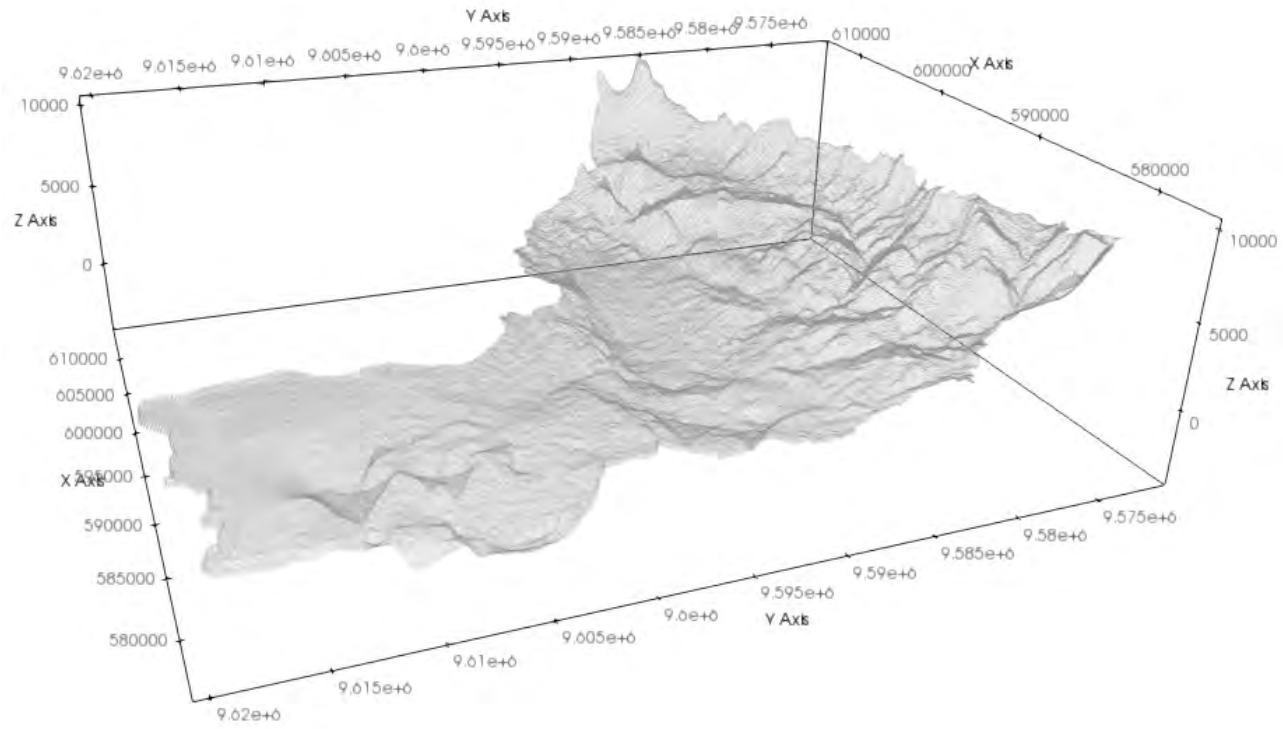


Figura 12-5: Vista Isométrica de la Grilla del Modelo



La discretización temporal conceptualiza la escala temporal de flujo de aguas subterráneas en distintos periodos de requerimiento o “stress periods” como es mencionado en MODFLOW. Para este caso de estudio, la simulación del régimen de flujo fue implementada en estado estacionario que se establece con el fin de obtener el balance hídrico del acuífero y determinar los niveles estáticos de la napa freática.

El modelo numérico se dividió en 1.0 periodo de requerimiento o “stress periods”, cada período estacionario tiene etapas de tiempo o “time step” que permite estabilizar el flujo del modelo. El tiempo total considerado en la simulación es de 1 segundo.

La superficie del terreno o topografía fue obtenida mediante imágenes satelitales ALOS Global Digital Surface Model (AW3D30) proveídas por la NASA para la zona de estudio con una resolución horizontal de 30 m.

Las elevaciones fueron filtradas a la grilla del modelo para aplicar el valor del ráster de elevación más cercano al centro de la celda del modelo. De lo mencionado anteriormente se obtienen para el modelo numérico elevaciones de superficie que van desde un mínimo de -0.38 m.s.n.m. hasta un máximo de 1073.16 m.s.n.m. mientras que las elevaciones de fondo del modelo numérico corresponden a un valor uniforme equivalente a -448.25 m.s.n.m.

El espesor del acuífero se calculó de la diferencia entre la superficie y la elevación de fondo del acuífero, que va desde un mínimo de 0.30 m hasta un máximo de 457.90 m. En la Figura 12-6 se puede visualizar la vista en planta de la distribución de las elevaciones en la superficie de la extensión del modelo numérico, y en la Figura 12-7 se visualiza la vista en planta de la distribución de los espesores en metros del modelo numérico.

Figura 12-6: Vista en Planta de la Distribución de la Elevación de Superficie (msnm) del Modelo Numérico

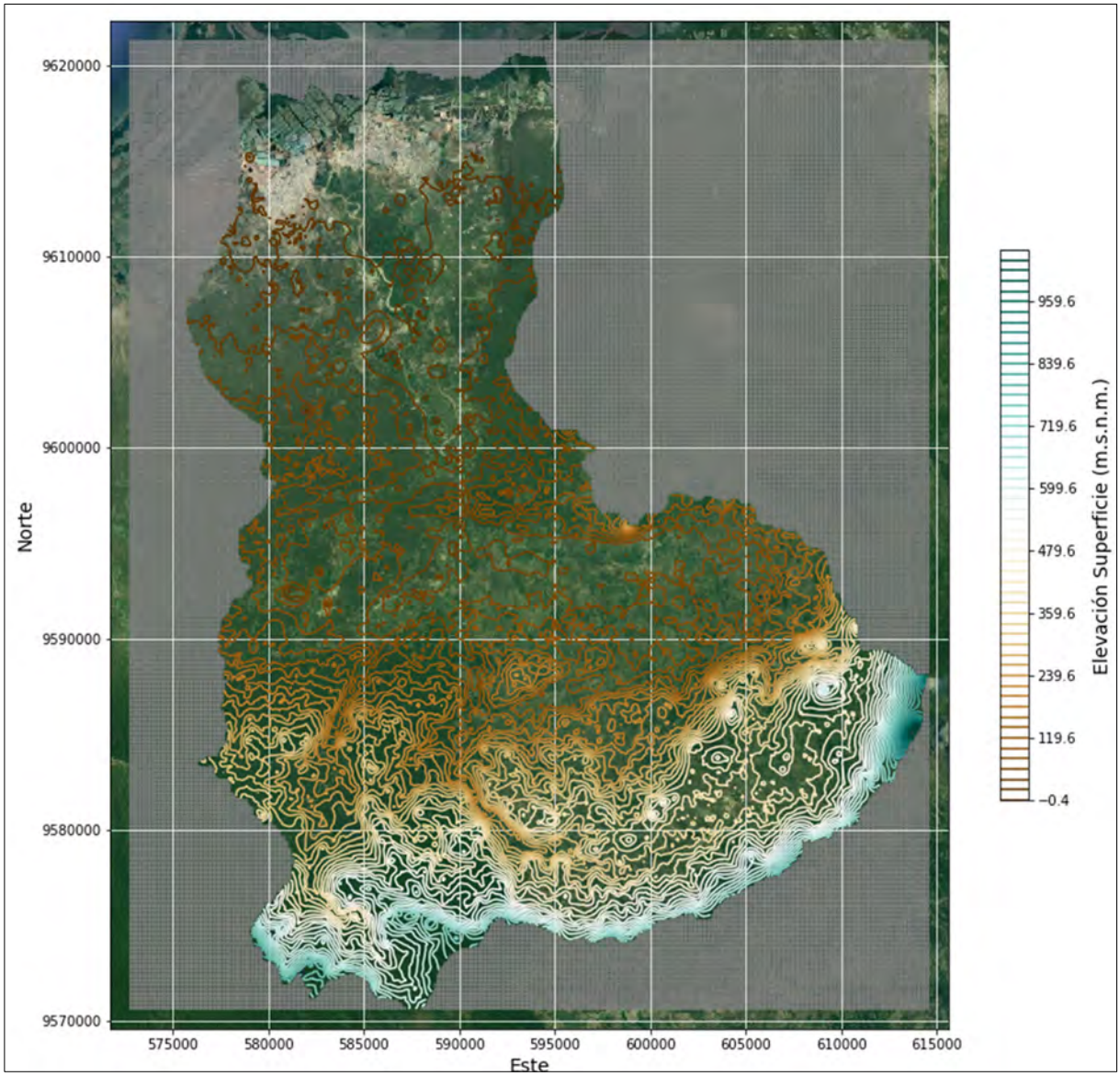
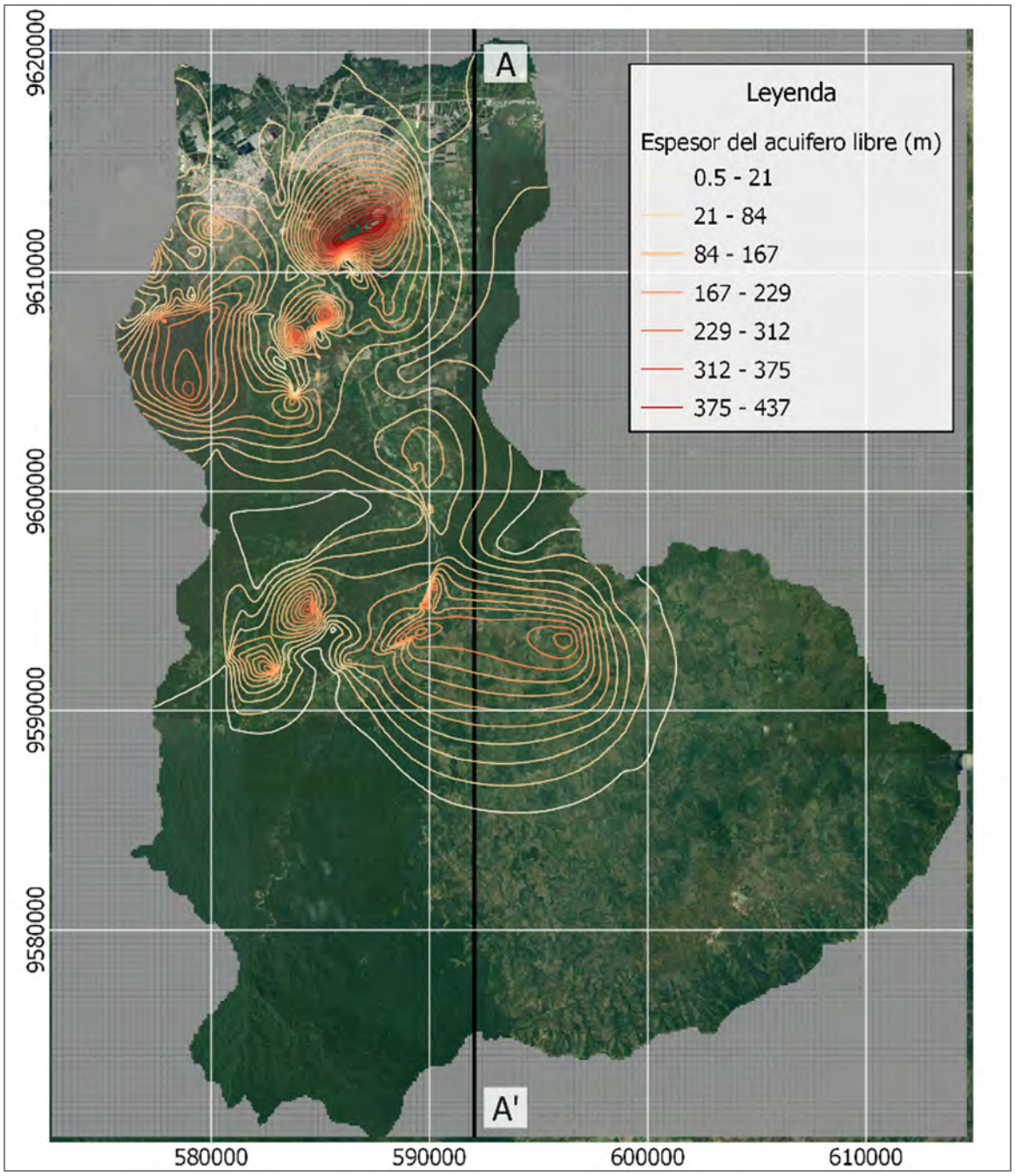


Figura 12-7: Vista en Planta de la Distribución de los Espesores (m) del Modelo Numérico



12.2.3 Unidades

Las dimensiones utilizadas en el modelo numérico corresponden al Sistema Internacional (SI), por lo que la dimensión de espacio utilizada es el metro y la dimensión de tiempo utilizada es el segundo (Tabla 12-1), estas unidades dominan por completo la simulación, por lo que cualquier propiedad asignada tendrá estas unidades básicas a menos que sea un parámetro adimensional.

Tabla 12-1: Unidades del Modelo Numérico

Longitud	Tiempo
metro	segundo

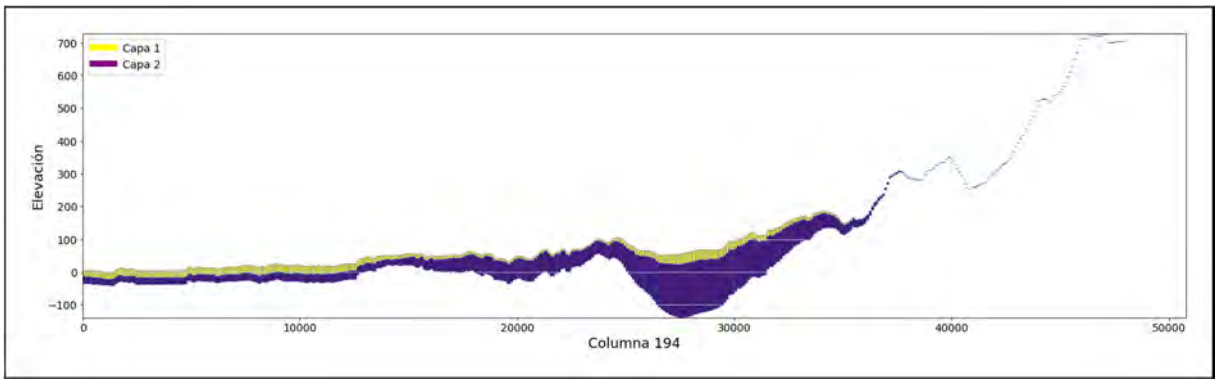
12.2.4 Números de Capas y Tipo de Acuífero

Debido a las condiciones de flujo y la ubicación de la napa freática en la extensión vertical de la celda, se han considerado 02 capas en la extensión del modelo numérico, ambas capas han sido establecidas como Capa 1, compuesta por materiales cuaternarios o macizo rocoso altamente fracturado y Capa 2, compuesto por macizo rocoso levemente fracturado, definiendo así la totalidad del acuífero como un medio poroso y fracturado con una considerable capacidad de almacenamiento.

En la Figura 12-8 se observa la sección del corte vertical (A-A') donde se muestra las 02 capas, la primera con espesores que varían desde 0.5 m a 31.75 m, mientras que los espesores de la segunda capa varían desde 0.5 m a 165.62 m, y por debajo de éstas se considera una capa impermeable. Es decir, en esta figura se puede visualizar la distribución de las unidades hidrogeológicas del acuífero libre con dos Horizontes:

- Capa 1: material cuaternario/macizo rocoso altamente fracturado
- Capa 2: material macizo rocoso levemente fracturado.

Figura 12-8: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas



En la Figura 12-9 a 12-14 se puede visualizar la distribución de las unidades hidrogeológicas en los diferentes sectores de la cuenca Zarumilla.

Figura 12-9: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 1-1´

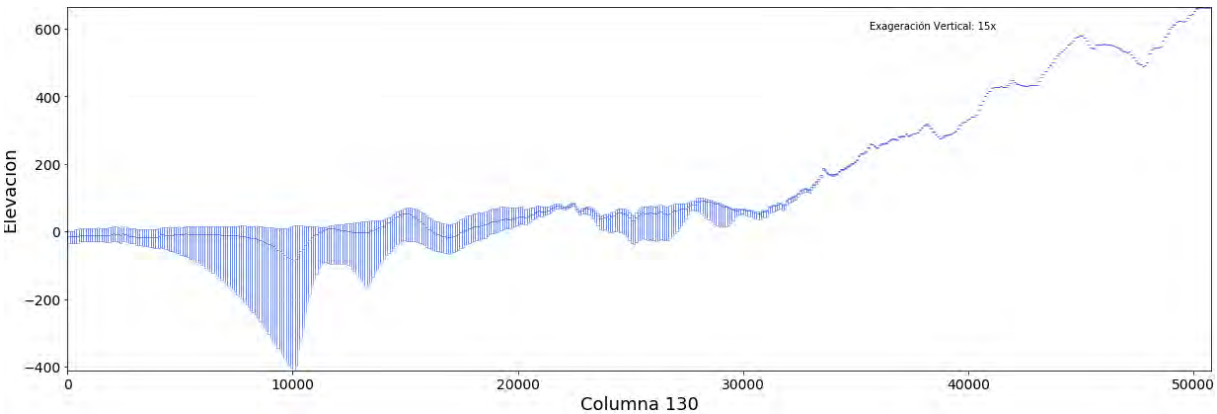


Figura 12-10: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 2-2´

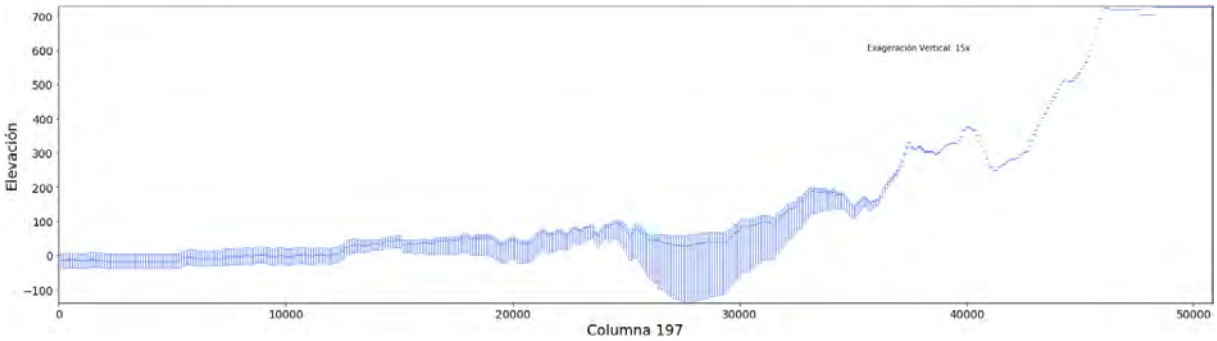


Figura 12-11: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 3-3´

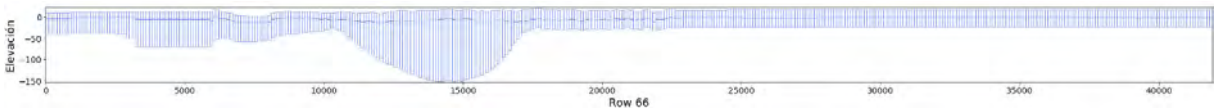


Figura 12-12: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 4-4´

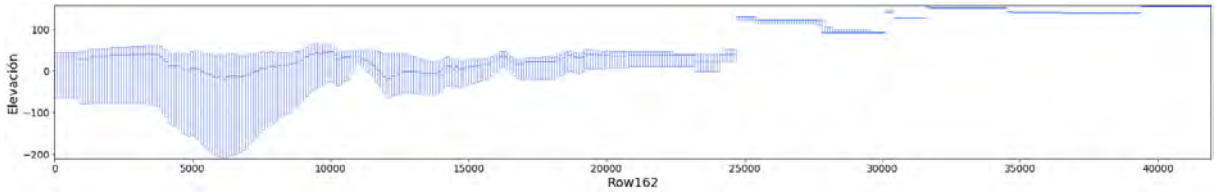


Figura 12-13: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 5-5´

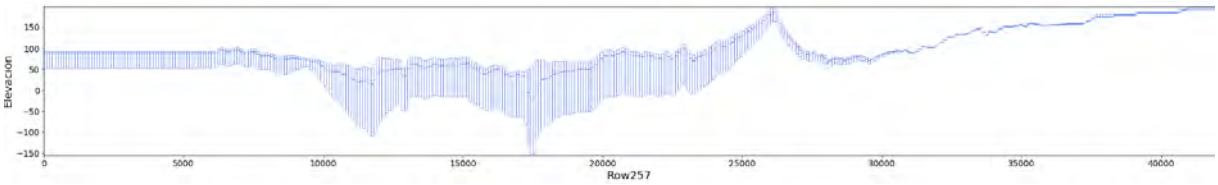
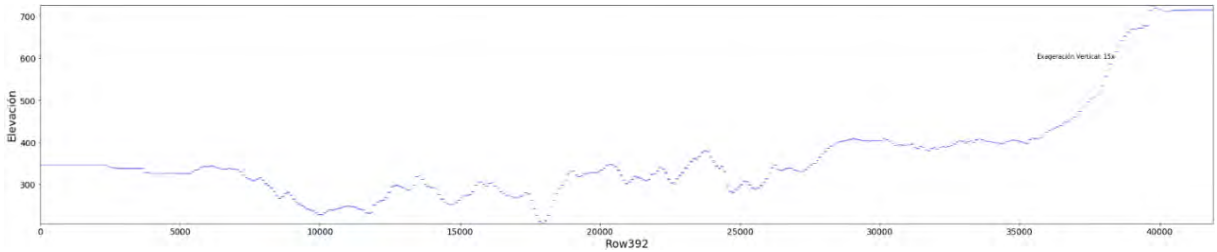


Figura 12-14: Vista en Corte de las Unidades Hidrogeológicas – Sección 6-6´



12.2.5 Condiciones de Frontera

Recarga (RCH)

Para simular la distribución de la recarga en el sistema de aguas subterráneas, se usa el paquete Recarga (RCH) que permite definir la tasa de recarga en el área del modelo. Para el modelo numérico se ha dispuesto la recarga como productos de las precipitaciones de la zona. Los valores de recarga son aplicados para la capa superior que se encuentra activa durante la simulación y alcanza un valor máximo de 3840 mm/año y un valor mínimo de 150 mm/año.

En la Figura 12-15 se puede visualizar la distribución espacial de la condición RCH aplicada al modelo numérico mediante una vista en planta y en la Figura 12-16 se visualiza la vista isométrica de la condición aplicada.

Figura 12-15: Vista en Planta de la Condición de Borde de Recarga (RCH)

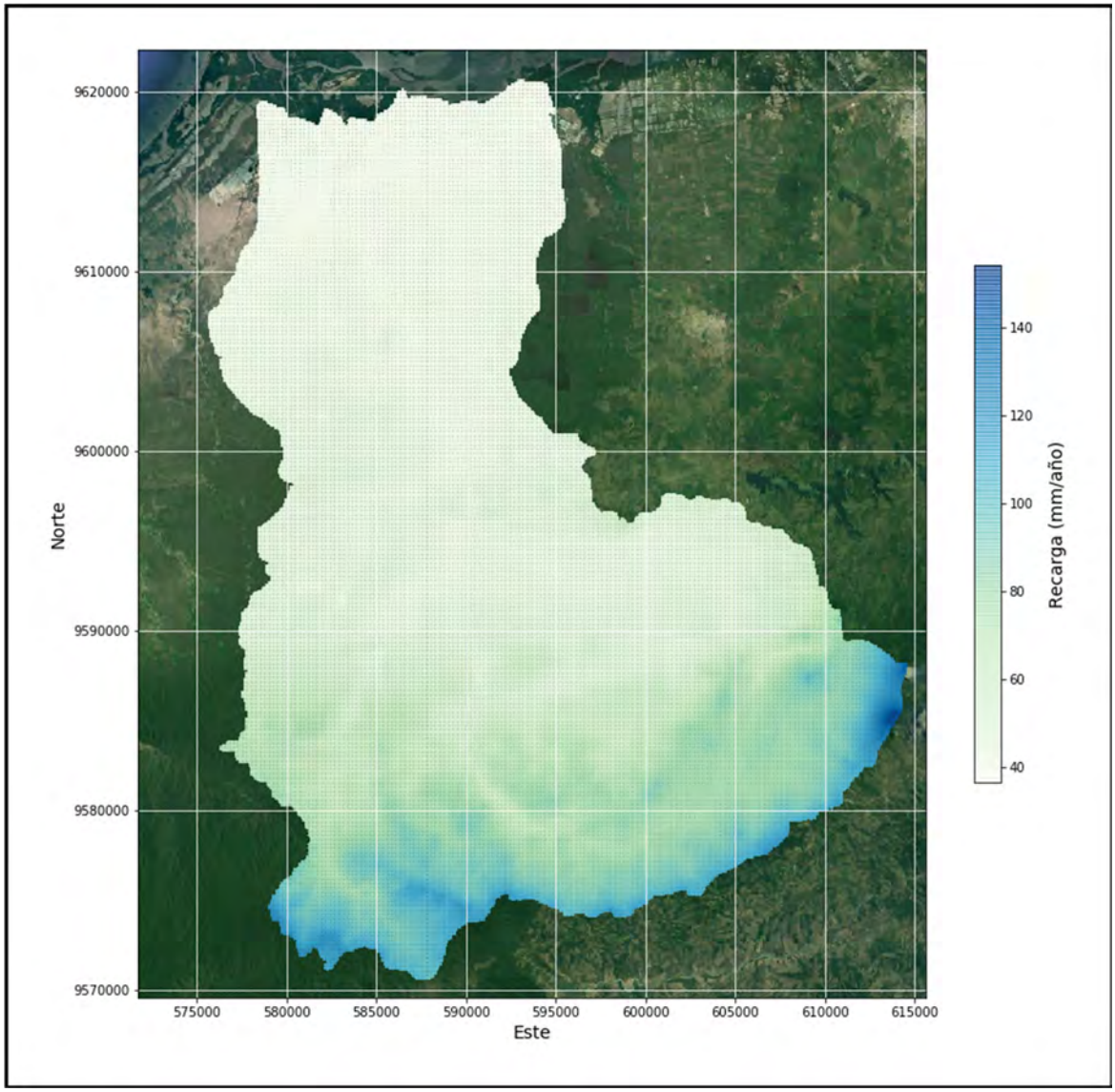
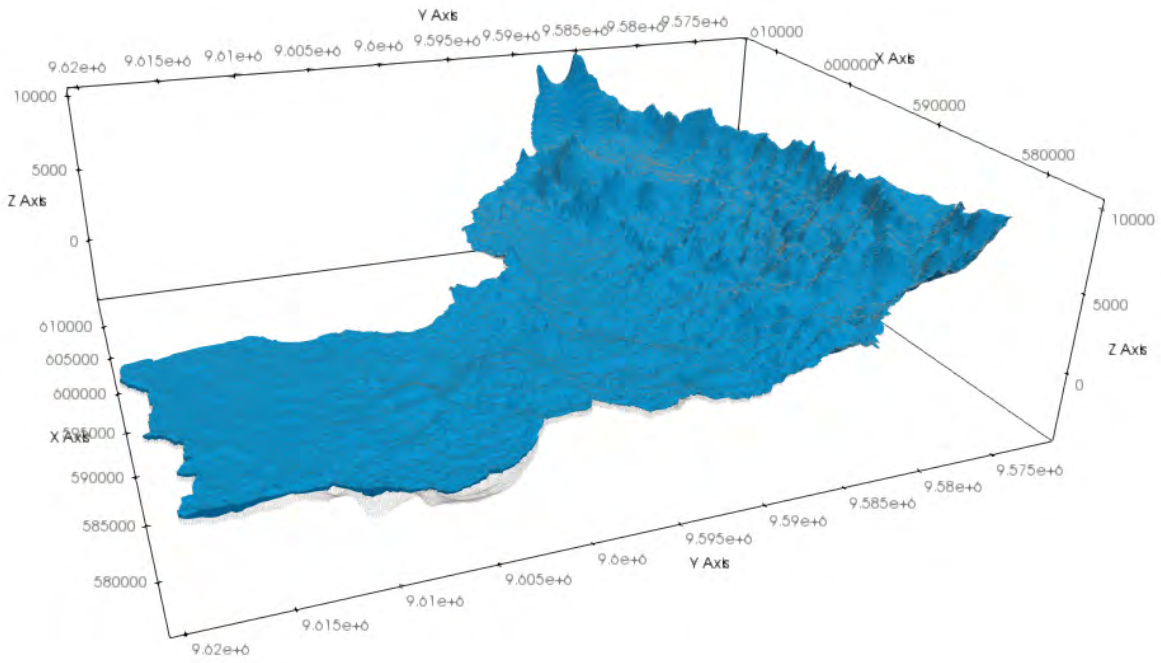


Figura 12-16: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Recarga (RCH)



Evapotranspiración (EVT)

Para simular la distribución de la evapotranspiración en el sistema de aguas subterráneas, se usa el paquete Evapotranspiración (EVT) que permite definir la tasa de evapotranspiración, la superficie de la evapotranspiración y la profundidad máxima a la cual se efectúa la evapotranspiración en el área del modelo.

La evapotranspiración considerada en el modelo numérico se refiere a la evaporación subterránea de todo el sistema que es un proceso que ocurre en aquellas zonas donde el agua subterránea está muy cercana a la superficie, que permite que las raíces de las plantas puedan consumir aguas subterráneas.

En la Figura 12-17, se observa la distribución de la distancia de la napa freática menores a 5 metros representadas en color verde, que corresponderían a las zonas con mayor evaporación subterránea y que también coinciden con la ubicación de los pozos inventariados.

Se considera que este proceso es muy relevante en el desarrollo del modelo numérico ya que representa la descarga del sistema, es decir, el agua subterránea está saliendo como transpiración de las plantas que consumen aguas subterráneas desde sus raíces.

Como se aprecia en la figura anterior, la evapotranspiración en la parte sur de la cuenca (zona alta) aplicada en el modelo numérico difiere del modelo hidrogeológico conceptual, esto debido a que el modelo numérico ha considerado la existencia de una capa de material que almacena agua muy cercana a la superficie, que podría estar representada por un suelo que alimenta a la vegetación existente en la zona. Sin embargo, para la conceptualización inicial del modelo se consideró que el acuífero, de un espesor muy delgado (entre 1.5 a 2.5 m), podría estar a una profundidad mayor, considerando que las rocas metamórficas usualmente se encuentran fracturados en sus primeras decenas de metros debido a la meteorización y por efectos del sistema de fallamientos que se aprecian en la zona.

En este contexto, los valores de evapotranspiración han sido aplicados a la primera capa del modelo numérico, siendo la superficie de la evapotranspiración equivalente a la superficie del terreno y la profundidad máxima de evapotranspiración igual a 5 m. Este proceso de descarga no es despreciable en el balance de entradas y salidas de aguas subterráneas, para el caso de la zona de estudio, se demuestra que la principal salida del sistema es la evaporación subterránea con 3.82 l/s y en segundo orden, los ríos tienen un flujo de salida de 2610 l/s.

En la Figura 12-18 se puede visualizar la distribución espacial de la condición EVT aplicada al modelo numérico mediante una vista en planta y en la Figura 12-19 se visualiza la vista isométrica de la condición aplicada.

Figura 12-17: Vista de Zonas con Mayor Evapotranspiración (EVT) en la Cuenca Hidrogeológica

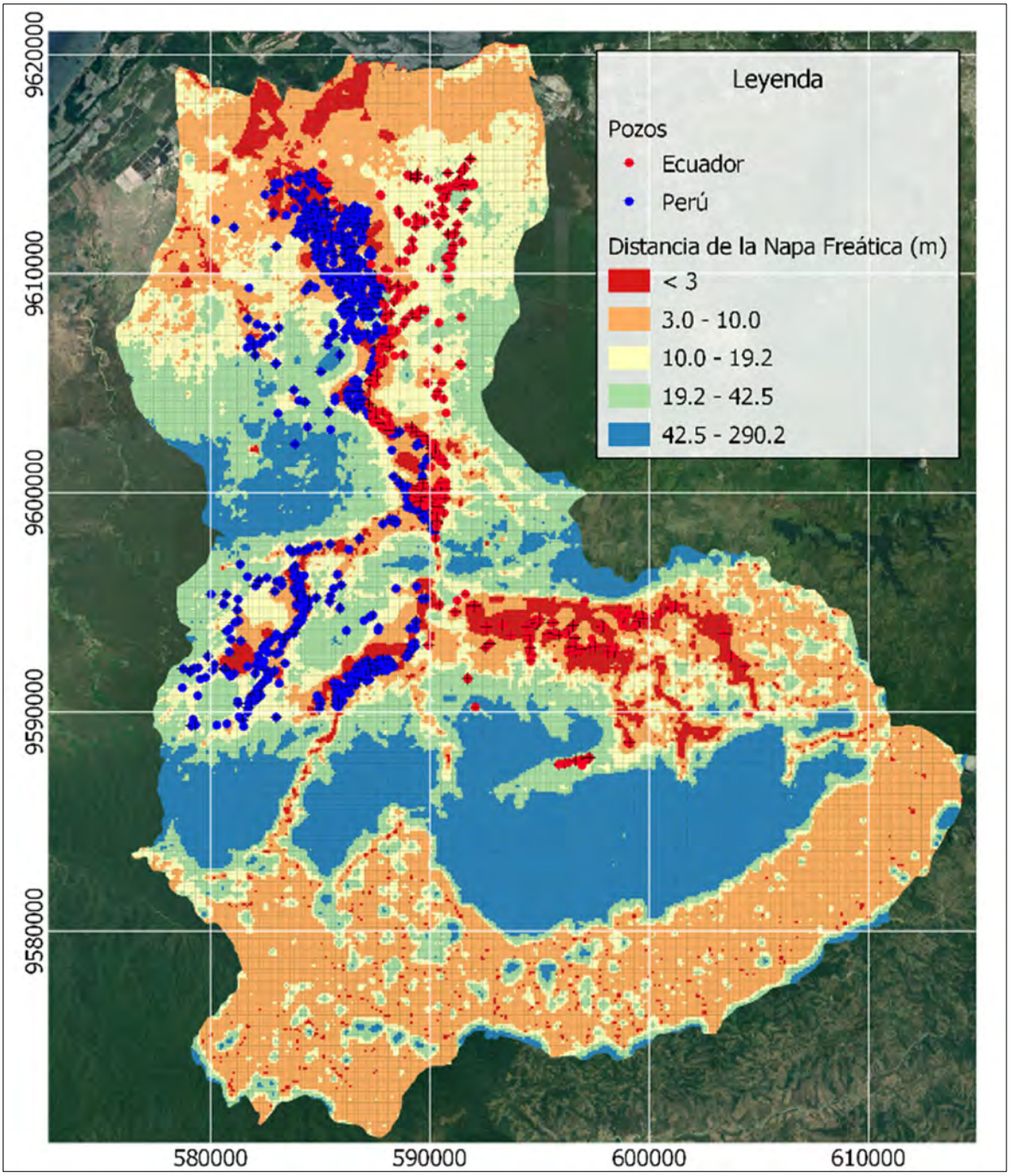


Figura 12-18: Vista en Planta de la Condición de Borde de Evapotranspiración (EVT)

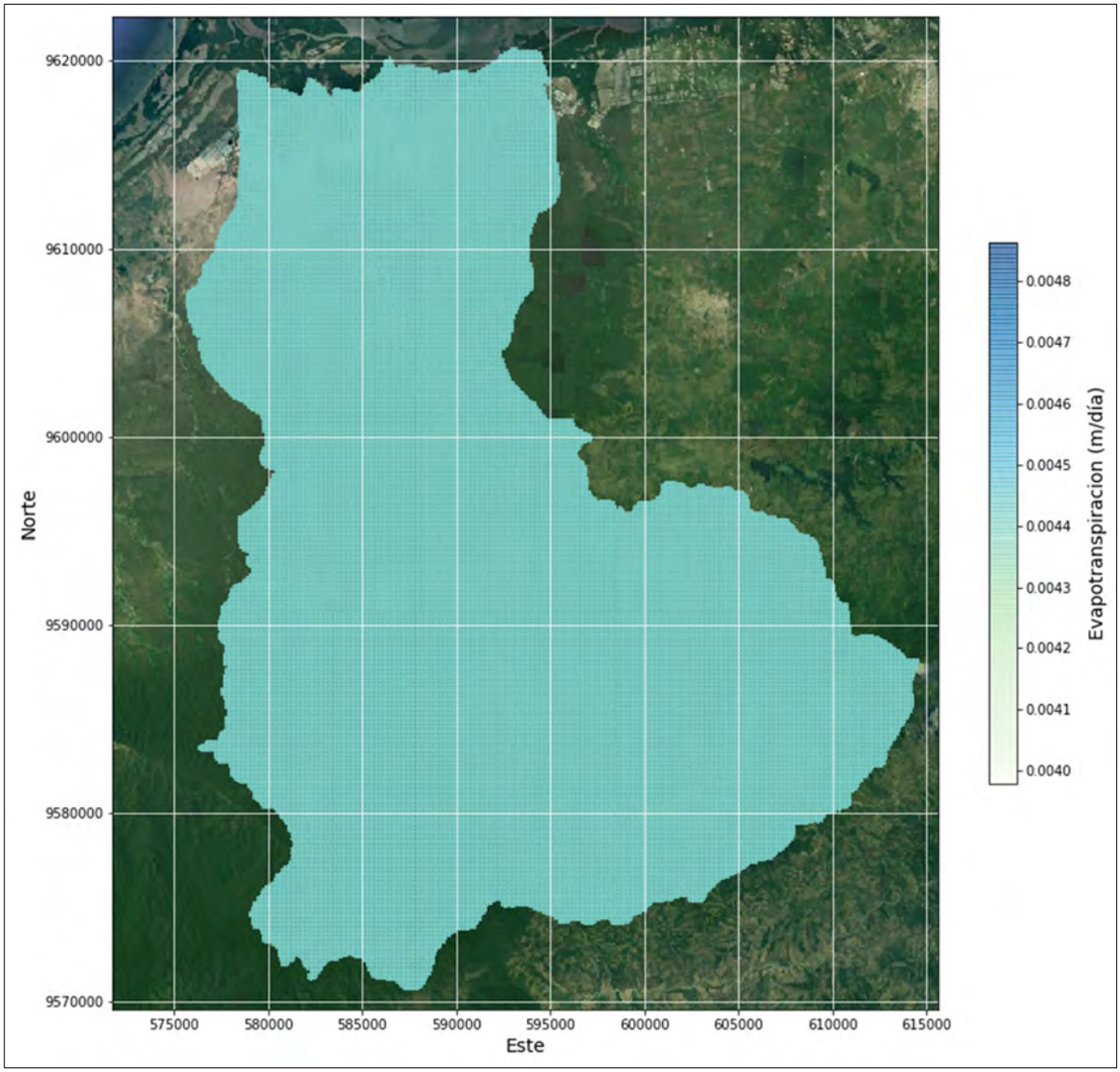
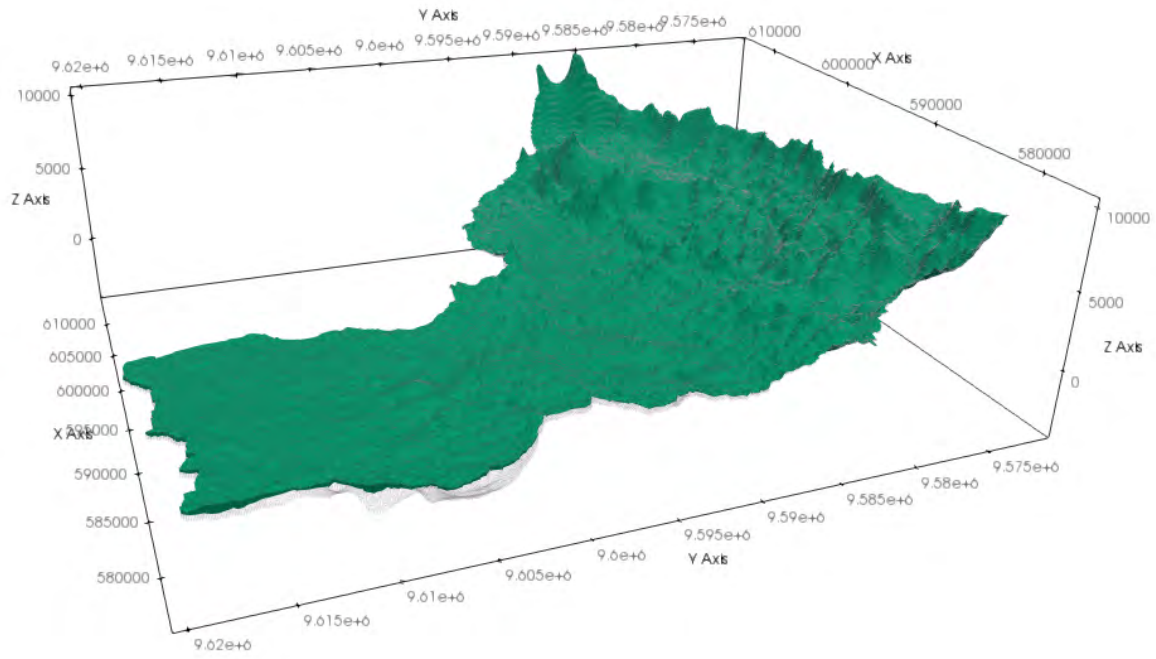


Figura 12-19: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Evapotranspiración (EVT)



Rio (RIV)

Este paquete de MODFLOW permite simular el ingreso o salida de flujo de agua subterránea a las celdas conceptualizadas como río (RIV). La tasa de flujo que el río Zarumilla aporta o drena al/del sistema de agua subterránea depende de la gradiente hidráulica entre el río y las celdas contiguas, del tirante del río y la conductancia del lecho de río.

Con la finalidad de simular el efecto de río Zarumilla sobre el régimen de aguas subterráneas se asignaron los parámetros hidráulicos necesarios para implementar el paquete Río (RIV). El tirante de agua superficial en el río Zarumilla es de 1.00 m, la conductancia hidráulica de la interconexión entre el río y el acuífero es de 0.004 m2/s que representa la conductividad y grosor de la capa de sedimento en el río y el ancho y longitud de la condición de borde en la celda del modelo numérico. El número de celdas aplicadas con condición de borde de río (RIV) es de 1971 celdas.

Las celdas aplicadas como río (RIV) en la extensión del modelo se muestran como vista en planta en la Figura 12-20 y en la Figura 12-21 se muestra una representación isométrica de las mismas.

Figura 12-20: Vista en Planta de la Condición de Borde de Río (RIV)

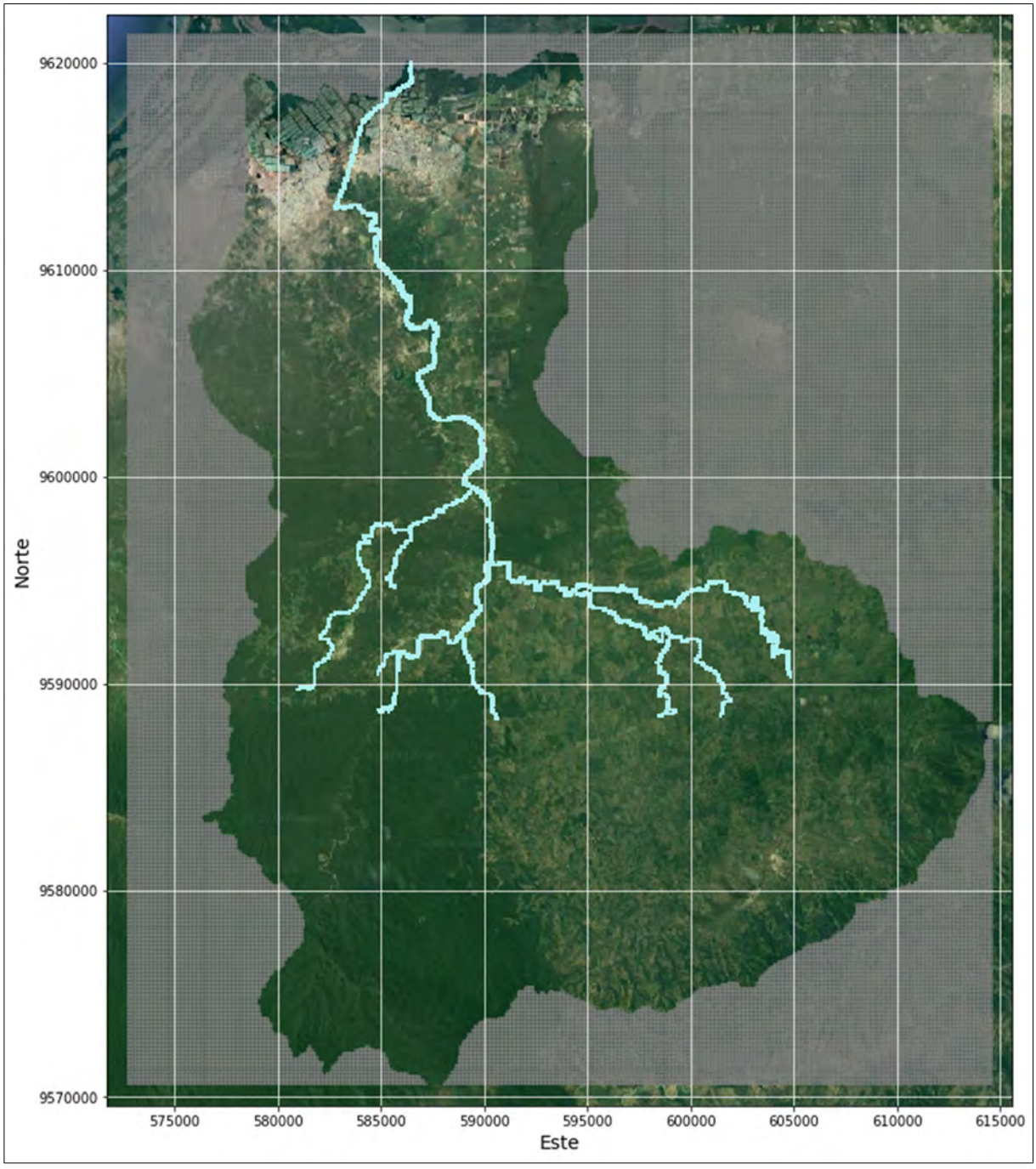
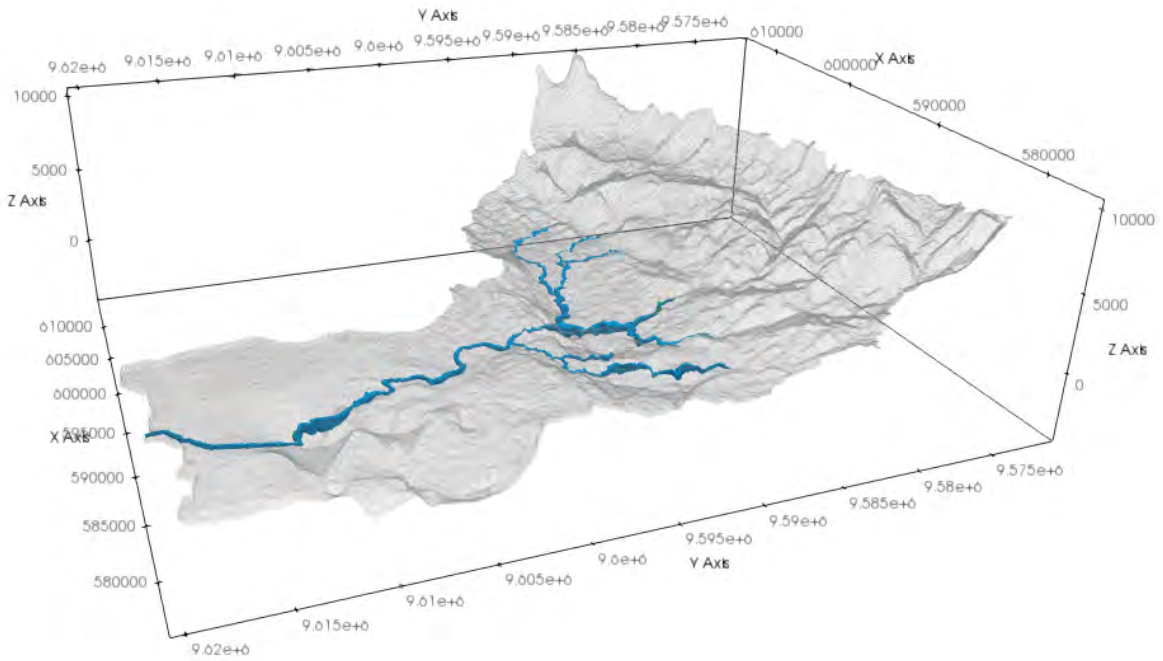


Figura 12-21: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Río (RIV)



Dren (DRN)

El paquete de dren permite simular la salida de flujo de agua subterránea en las celdas conceptualizadas como dren (DRN). La tasa de flujo drenada del sistema corresponde a todos los ríos/quebradas tributarios al río Zarumilla, esto solamente ocurre si la napa freática se encuentra encima de la superficie sobre la cual es asignada esta condición, de lo contrario su valor será´ igual a 0, siendo la cantidad drenada proporcional a una conductancia asignada.

Con la finalidad de simular el efecto de los ríos/quebradas tributarios sobre el sistema de agua subterráneas se asignaron los parámetros necesarios para implementar el paquete de dren (DRN), este fue asignado a las geometrías de los tributarios con una conductancia igual a 0.01 m2/s que representa la relación entre la conductividad hidráulica, área y la distancia entre el centro de las celdas, siendo un total de 1799 celdas con esta condición.

Las celdas aplicadas como dren (DRN) en la extensión del modelo se muestran como vista en planta en la Figura 12-22 y en la Figura 12-23 se muestra una representación isométrica de las mismas.

Figura 12-22: Vista en Planta de la Condición de Borde de Dren (DRN)

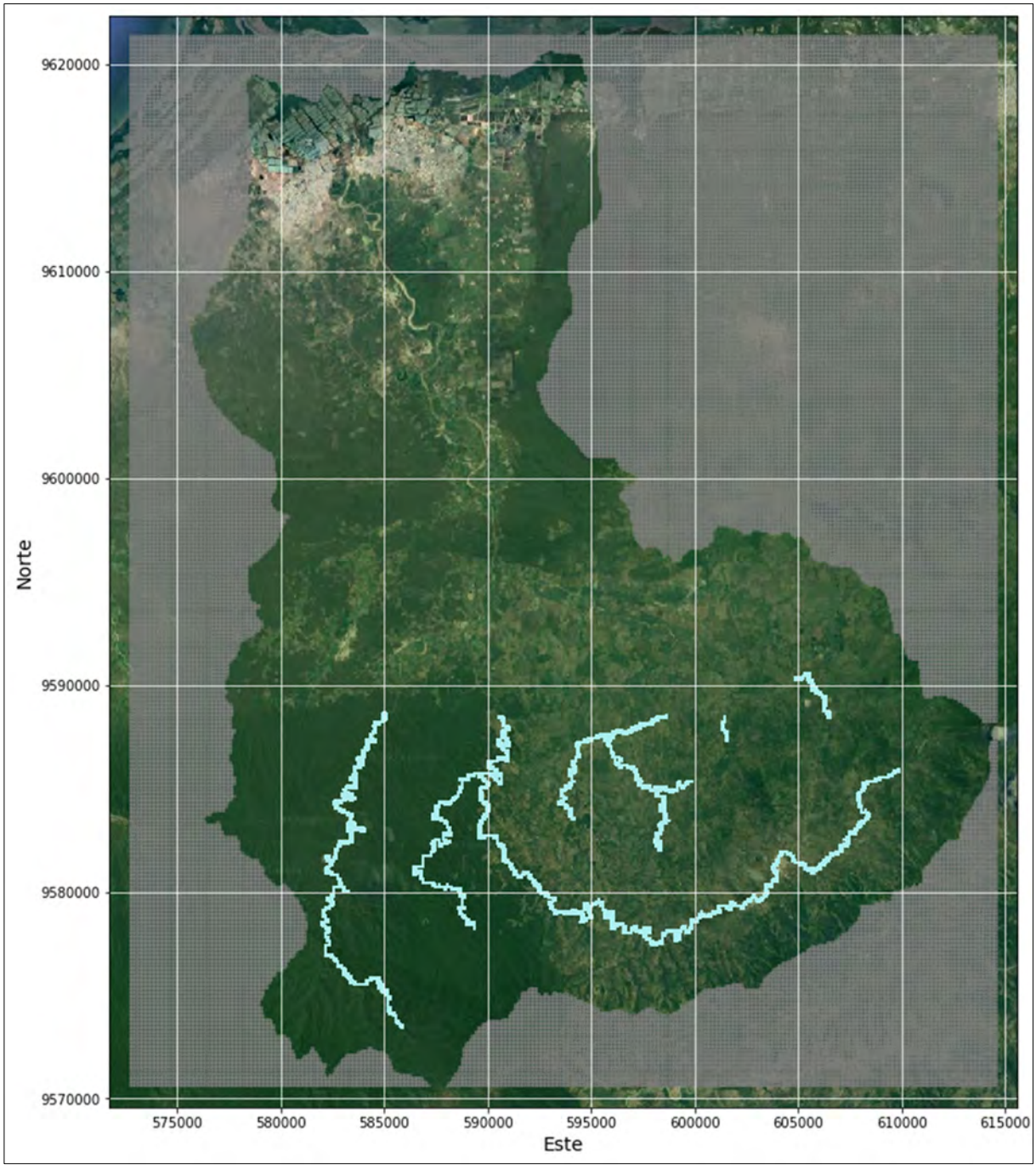
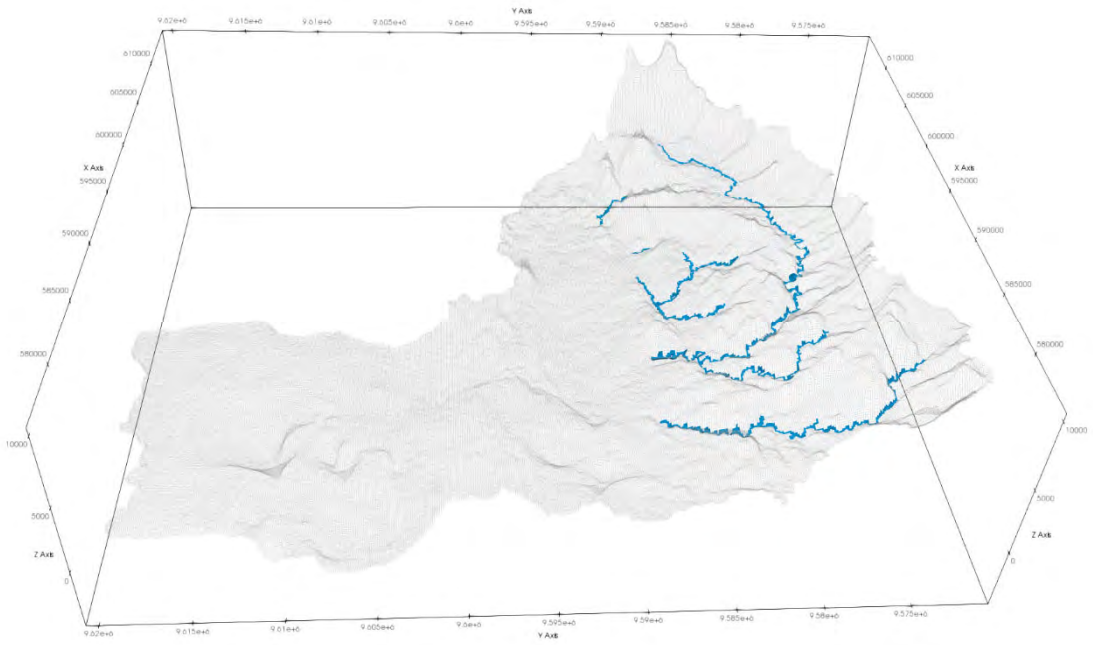


Figura 12-23: Vista Isométrica de la Condición de Borde de Dren (DRN)



Flujo Regional (GHB)

En el modelo numérico se ha conceptualizado que el aporte regional sea asignado mediante la condición de borde de carga hidráulica general (GHB) la cual permite definir la tasa de flujo al modelo numérico en función de una elevación de flujo y un valor de conductancia.

De la condición aplicada se tiene que la altura de la condición es equivalente a 1.00 msnm, la conductancia aplicada equivale a 0.0001 m2/día y la condición GHB ha sido aplicada a 109 celdas de la grilla del modelo numérico.

En la Figura 12-24 se puede apreciar una vista en planta de las zonas en las que se ha aplicado la condición GHB y en la Figura 12-25 se visualiza la vista isométrica de la condición GHB.

Figura 12-24: Vista en Planta de la Condición de Borde de GHB

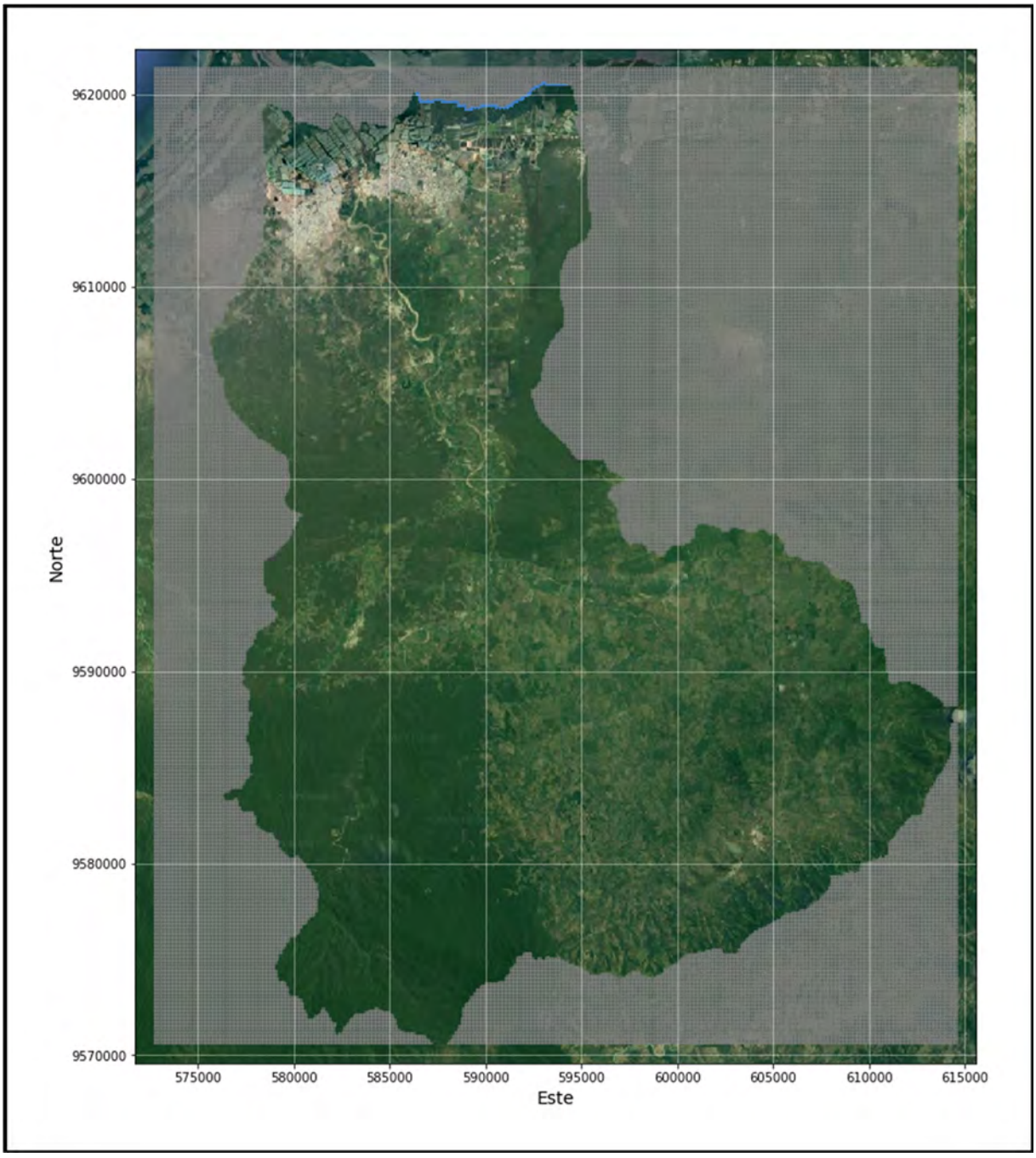
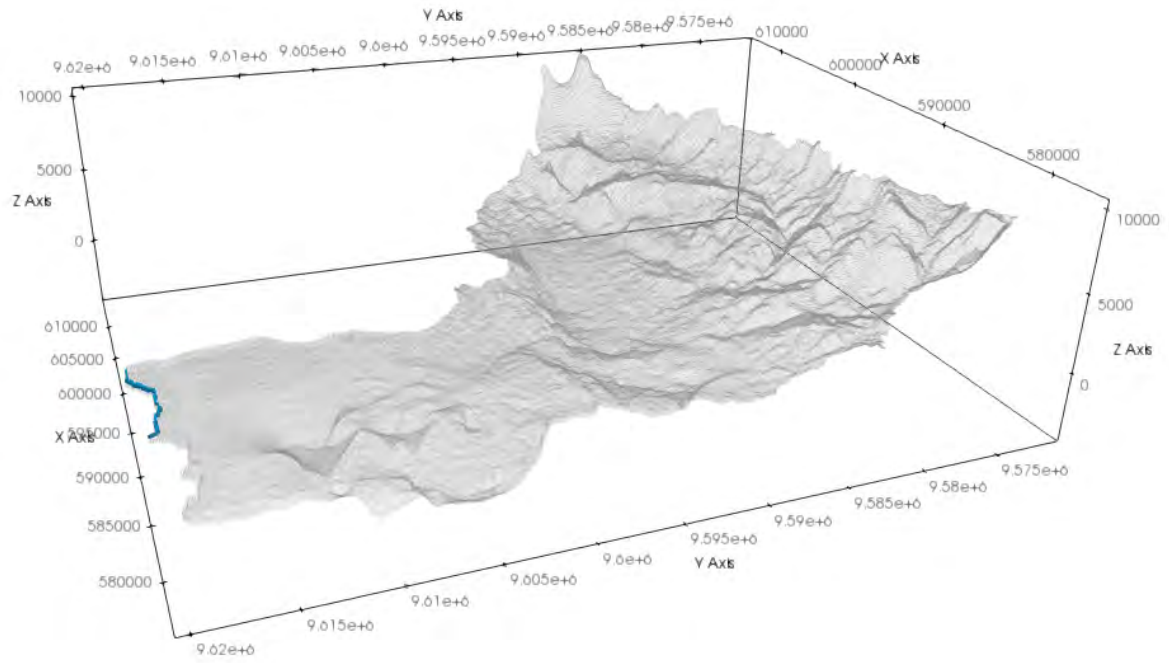


Figura 12-25: Vista en Isométrica de la Condición de Borde de GHB



Pozos de Bombeo (WEL)

Este paquete de MODFLOW permite simular los pozos de extracción y de inyección en toda la extensión del modelo. El modelo considera un total de 1132 pozos de explotación de los cuales todos extraen caudales, siendo el máximo caudal extraído igual a 3548.40 m^3/día, con un total de 1.71 m^3/s (1710 l/s) o 53.85 MMC. Para cada pozo conceptualizado se especifica el caudal de bombeo en un periodo de requerimiento, así como la profundidad del pozo.

Según las especificaciones del paquete WEL de MODFLOW, cada pozo está localizado en una determinada capa, fila y columna. El signo negativo en los valores de caudal de pozo indica que el agua se está bombeando según la convención de signos de MODFLOW.

En la Figura 12-26 se visualiza la vista en planta de los pozos implementados al modelo numérico, y en la Tabla 12-2, se presenta un extracto, a manera de ejemplo, de las posiciones de los pozos en cuanto a la capa, fila y columna, además de los caudales de cada pozo, el cual se muestra en detalle con los datos de todos los pozos considerados en el modelo como Anexo VIII-C.

Es necesario precisar que los caudales considerados (véase Tabla 12-2 y Anexo VIII-C) están expresados en unidades de m^3/s, los cuales no necesariamente coinciden con los caudales individuales de extracción de los pozos (en l/s). Esto debido a que en el modelo numérico estático se asume los regímenes de bombeo acumulado al año de cada pozo, y para este efecto, éstos han sido calculados dividiendo dichos caudales acumulados entre los 365 días del año; sin embargo, los caudales reales de extracción de cada pozo están asociados a la cantidad de horas y días de bombeo al mes. Por ejemplo, un pozo con un caudal de extracción de 10 l/s, que utiliza 20 días al mes, por 10 horas diarias y 8 meses al año (mayo a diciembre), acumula un total de 1600 horas al año y equivale a un volumen total de 57600 m^3/año; y para

fines del modelo numérico estático éste se considera como un caudal de 0.00183 l/s, que se obtiene dividiendo este caudal acumulado entre los 365 días.

Figura 12-26: Vista en Planta de los Pozos Implementados al Modelo Numérico

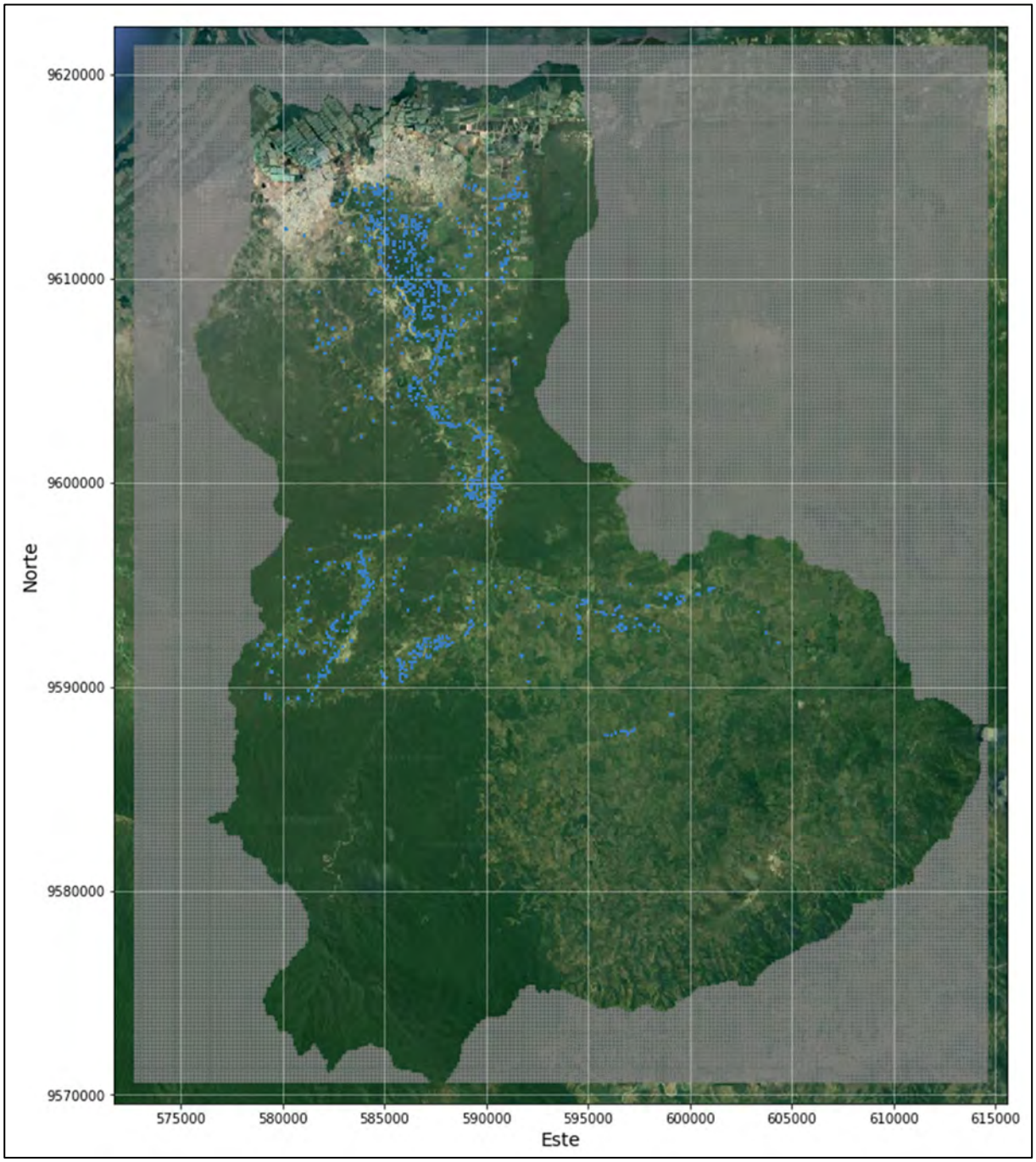


Tabla 12-2: Ubicación y Caudales de Bombeo de Pozos (WEL) en el Modelo Numérico

Coordenadas del Pozo UTM (WGS84, zona 17s)		Profundidad	Caudal
Este (m)	**Norte (m)**	**(m)**	**(m^3/s)**
588195	9592031	14.5	-0.00090
582131	9607687	58.5	-0.00133
582183	9590960	14.5	-0.00019

Coordenadas del Pozo UTM (WGS84, zona 17s)		Profundidad	Caudal
Este (m)	**Norte (m)**	**(m)**	**(m^3/s)**
588615	9600429	11.42	-0.00202
582377	9592924	14.5	-0.00048
582389	9592079	14.5	-0.00202
582510	9593000	14.5	-0.00043
583916	9613606	24	-0.00049
583920	9596014	14.5	-0.00202
584911	9597569	14.5	-0.00202
586140	9608556	6.7	-0.00018
586316	**9608442**	**22**	**-0.00183**
586317	9611566	20	-0.00122
586721	9591631	5.6	-0.00202

12.2.6 Parámetros de Entrada del Modelo

Propiedades de Flujo de Aguas Subterráneas

Los paquetes de flujo de aguas subterráneas son usados para definir las propiedades del acuífero como la conductividad hidráulica. Para el presente modelo se usó el paquete UPW (Upstream Weighting Package), el cual es un solucionador de flujo interno considerando que cada nodo está en el centro de cada celda, requiere la introducción de valores directos de conductividad hidráulica, y calcula automáticamente las conductancias de cada celda con la geometría de cada una.

La zona de la cuenca hidrogeológica de Zarumilla está ubicada en una formación geológica de origen aluvial con predominancia de gravas y arenas, y lecho rocoso altamente fracturado, mientras que el basamento rocoso está conformado por intercalaciones de rocas metamórficas y lutitas de baja permeabilidad. Hidrogeológicamente, se identificó unidades hidrogeológicas que tienen la capacidad de transmitir agua (conductividad hidráulica) y almacenar agua (capacidad de almacenamiento).

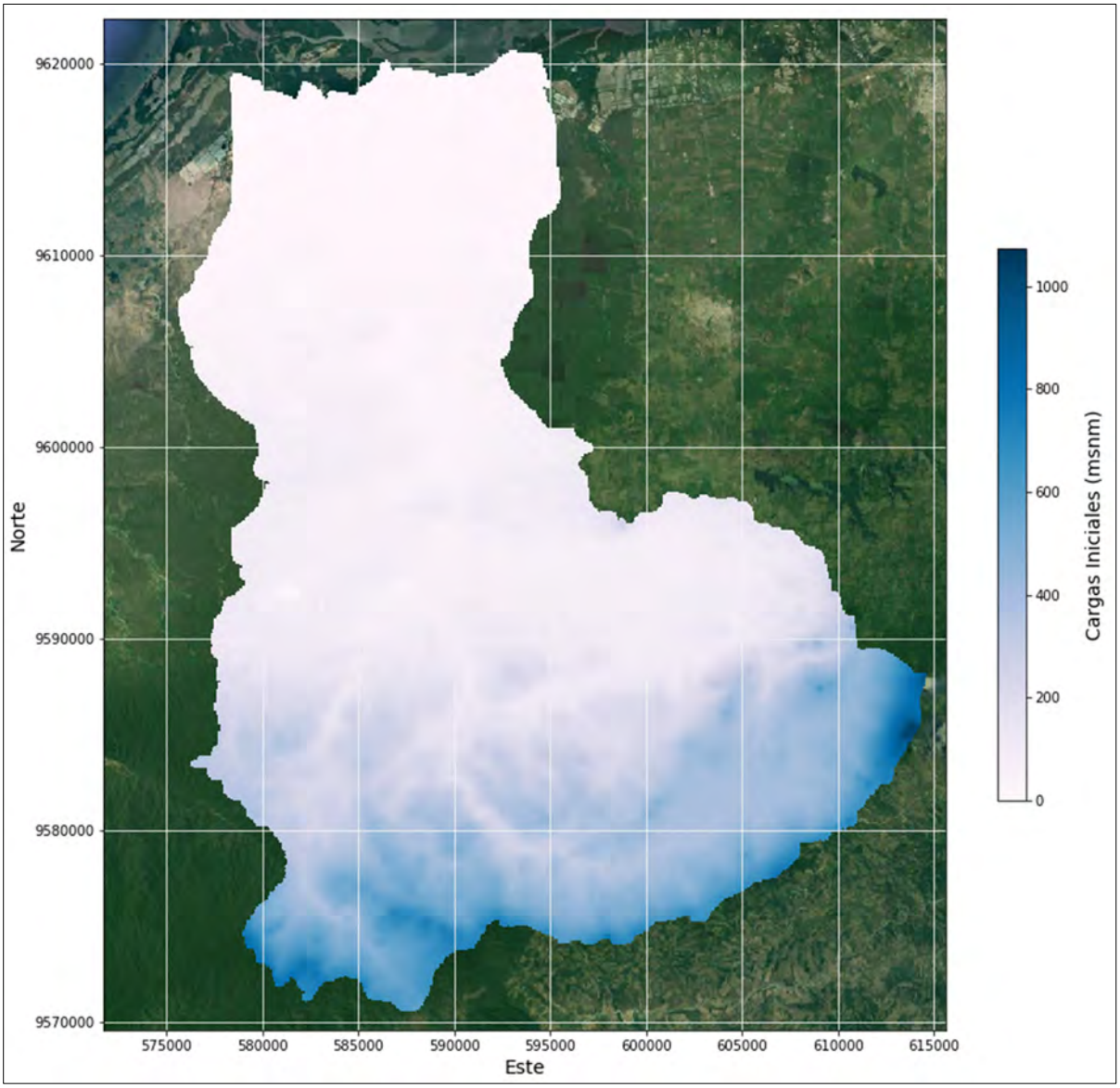
El paquete UPW permitió asignar las variables de las unidades hidrogeológicas en todas las celdas del modelo en función de sus propiedades como la conductividad hidráulica horizontal (HK) a lo largo de las filas y capas, conductividad hidráulica vertical (VKA), almacenamiento especifico (Ss) y rendimiento especifico (Sy).

Cargas Hidráulicas Iniciales

Para modelos en condiciones de régimen uniforme como este caso de estudio, las cargas hidráulicas iniciales representan el nivel inicial de la iteración para que MODFLOW calcule las cargas hidráulicas. En este modelo las cargas hidráulicas iniciales corresponden a la cota de la superficie topográfica obtenida de un modelo digital de elevaciones (DEM) correspondiente al set de datos de elevación de ALOS Global Digital Surface Model (AW3D30).

Los valores de carga hidráulica inicial para el modelo oscilan desde los -0.38 a 1073.16 m.s.n.m . En la Figura 12-27 se visualiza la distribución espacial de las cargas hidráulicas iniciales en el modelo numérico.

Figura 12-27: Vista en Planta de las Cargas Hidráulicas Iniciales del Modelo Numérico



12.2.7 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica es una propiedad combinada del medio poroso saturado y el agua que lo atraviesa este parámetro hidráulico es determinado por la Ley de Darcy, donde se relaciona el caudal específico y el gradiente hidráulico que lo origina.

Para representar la conexión con las distintas capas del acuífero se ha conceptualizado una zona de alta conductividad hidráulica vertical que permita transportar el agua en la primera unidad hidrogeológica, mientras que la capa inferior tienen baja conductividad hidráulica vertical característico de estratos rocosos levemente fracturados.

Para el modelo numérico se han establecido diferentes zonas de conductividad hidráulica establecidas por materiales graníticos, roca impermeable, lecho de río, neógeno y sedimento marino. Se define al acuífero como isotrópico con un valor de anisotropía vertical igual a 1 a excepción de la primera capa la cual cuenta con una anisotropía igual a 3.

12.2.8 Puntos de Observación de los Niveles de Agua Subterránea

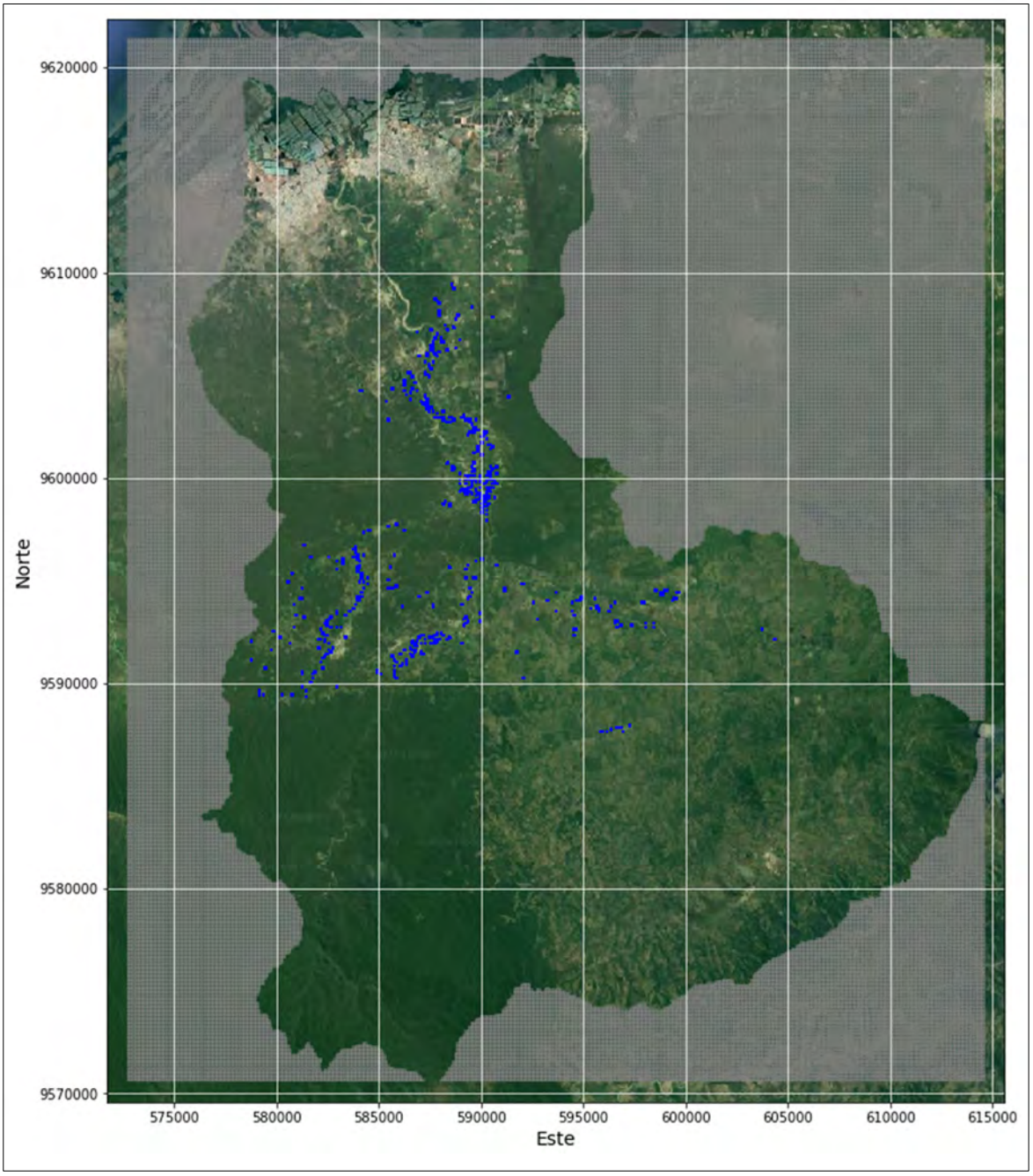
El paquete HOB permite introducir los datos de niveles de piezómetros obtenidos de la Evaluación hidrogeológica de la cuenca transfronteriza del río Zarumilla, se ha recolectado información de 572 pozos donde cada punto tiene los siguientes datos:

El paquete de observación HOB introduce los datos de niveles observados como puntos donde la carga simulada es interpolada desde el centro de la celda más cercana hasta la posición de la carga observada. En la Tabla 12-3 se muestra un extracto, a manera de ilustración, de los valores de cada pozo en la extensión del modelo numérico y los detalles completos se muestran en el Anexo VIII-D, y en la Figura 12-28 se observa la representación espacial de los pozos en el modelo.

Tabla 12-3: Ubicación de Pozos (HOB) y Niveles Observados en el Modelo Numérico

Código de Campo	Coordenadas UTM (WGS84, zona 17 s)		Altitud	Nivel Observado
	Este (m)	Norte (m)	(msnm)	(msnm)
H1-CAR-058	590266	9597926	42	34.8
H1-CAR-059	590309	9598437	41	33.5
H1-CAR-060	590335	9599069	37	31.6
H1-CAR-061	590320	9599096	38	31.4
H1-CAR-071	590288	9599345	59	30.5
H1-CAR-072	590348	9599410	43	30.5
H1-CAR-073	590355	9599331	42	30.8
H1-CAR-074	590197	9598825	36	31.8
H1-CAR-075	590277	9598897	37	31.9
H1-CAR-076	590182	9598961	25	31.4
H1-CAR-077	590229	9599037	36	31.3
H1-CAR-078	590262	9599551	55	30
H1-CAR-079	590549	9599508	36	31
H1-CAR-080	590354	9599526	40	30.1
H1-CAR-082	589992	9599799	38	29.4
H1-CAR-084	590159	9599766	36	29.7
H1-CAR-085	590276	9599810	35	29.7
H2-CAR-102	589867	9599262	41	30
H2-CAR-103	590386	9598998	32	32
H2-CAR-105	590298	9599206	36	31
H2-CAR-107	590371	9599328	34	30.9
H2-CAR-108	590416	9599350	39	31
H2-CAR-109	590387	9599332	41	30.9
H2-CHA-143	588321	9607248	16	15
H5-PPY-056	585681	9604348	22	19

Figura 12-28: Vista en Planta de la Ubicación de los Pozos



12.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

El proceso de calibración del modelo numérico se realiza para que el conjunto aplicado de parámetros hidráulicos y condiciones de borde representen numéricamente el régimen de flujo de las aguas subterráneas observado en los distintos puntos de observación.

En modelos numéricos de flujo de aguas subterráneas construidos en MODFLOW, el proceso de calibración se realiza con la ayuda de paquetes de observación como HOB y software utilitario desarrollado por la USGS como Flopy (USGS, 2018) y Gridgen (USGS, 2017).

El presente modelo fue calibrado por el método de “ensayo y error” con los valores observados de niveles y de concentraciones en los pozos introducidos al modelo. El proceso de calibración busca un ajuste de los valores observados con cargas hidráulicas simuladas.

Este procedimiento de calibración brinda validez y aceptación al representar condiciones específicas del régimen de flujo de aguas subterráneas. Con los resultados de la calibración se pueden realizar posteriores simulaciones predictivas.

12.3.1 Calibración en Régimen Permanente

12.3.1.1 Solucionadores de la Matriz de Flujo del Agua Subterránea

En la simulación del modelo numérico se necesita incluir un solucionador para la matriz de flujo. Este solucionador está´ definido por diferentes algoritmos utilizados para resolver la matriz que se construye del arreglo de ecuaciones de flujo para cada celda del modelo.

El modelo utilizó el paquete de Gradiente Conjugado Generalizado (GCG) ya que es un solucionador popular, rápido y no requiere de demasiada memoria computacional. Debido al gran tamaño de las matrices de flujo estas no pueden ser resueltas directamente. Se requieren procesos iterativos donde se ingresan distintas cargas hidráulicas al modelo para luego obtener cargas hidráulicas de salida hasta que el modelo converja en una solución.

Este solucionador utiliza iteraciones interiores y exteriores para evitar que el tiempo del proceso de simulación sea excesivo o en caso que el proceso tenga problemas de convergencia, por ello se especificó un número máximo de iteraciones exteriores (MXITER) de 250 y número iteraciones interiores (ITER1) de 50 propias de las ecuaciones en diferencias finitas.

El modelo numérico fue implementado con el precondicionador para la aceleración de esquema Lanczos/ORTHOMIN llamado “Modified Incomplete Cholesky (MIC)”, el cual es el precondicionado por defecto de Modflow.

12.3.1.2 Parámetros Hidráulicos Calibrados del Modelo de Flujo

A continuación, se detallan los parámetros del modelo calibrado.

Conductividad Hidráulica (hk)

Los valores de conductividad hidráulica en la extensión del modelo numérico determinan la tasa de flujo subsuperficial, la interacción entre las condiciones de borde de ingreso y de descarga, así como los niveles piezométricos en los puntos de observación.

En base de la respuesta las unidades hidrogeológicas para los sets de parámetros hidráulicos en la calibración del modelo, se ha obtenido una distribución de la conductividad hidráulica que va desde un mínimo de 1.73 m/d ($2x10^{-5}$ m/s) a un máximo de 259.20 m/d ($3x10^{-3}$ m/s).

En la Figura 12-29 se observa una distribución en planta de los valores de calibrados de conductividad hidráulica.

La Figura 12-30 muestra una representación isométrica de la distribución de conductividades hidráulicas horizontales calibradas en la extensión del modelo

Figura 12-29: Distribución de la Conductividad Hidráulica del Modelo (m/s)

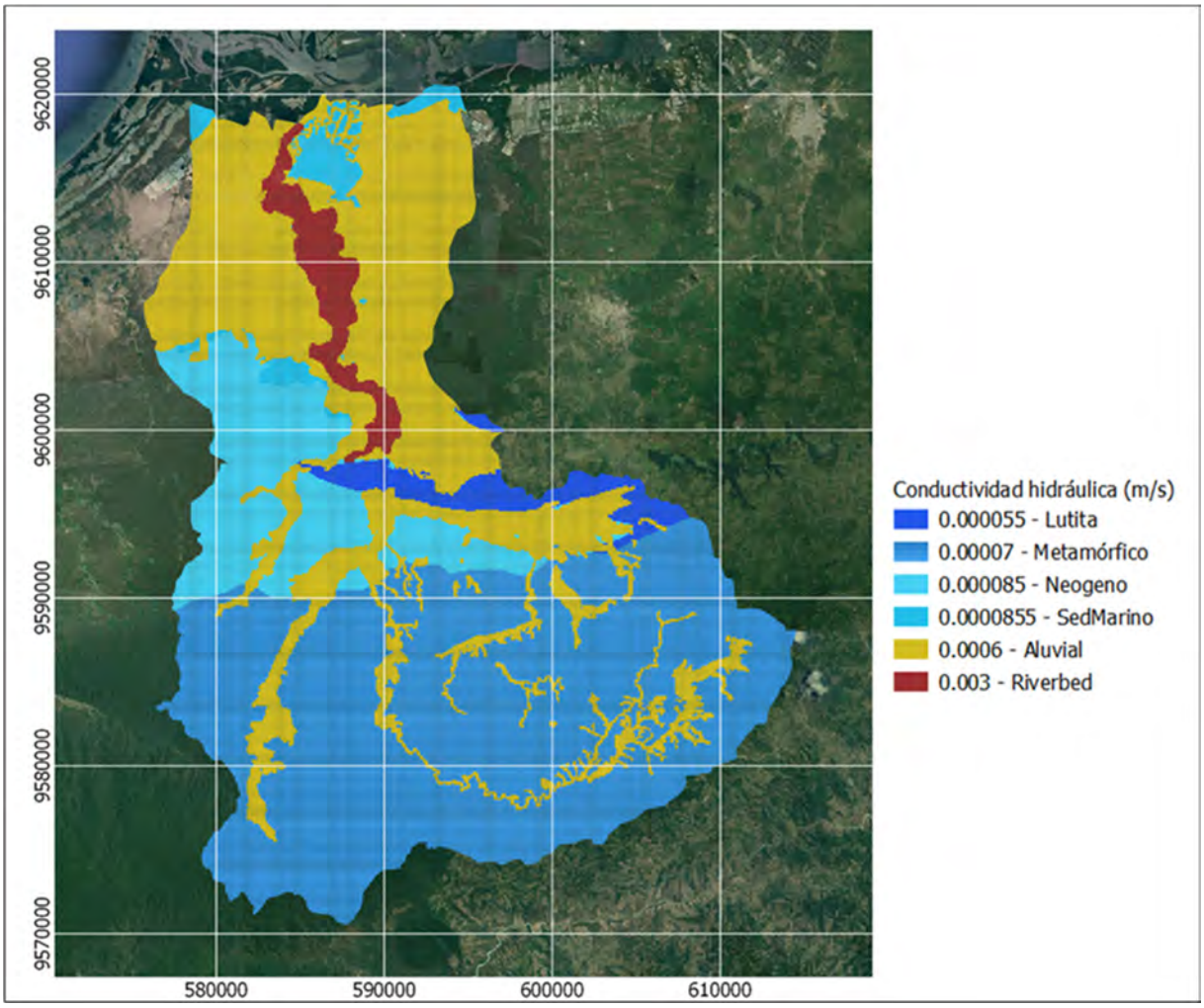
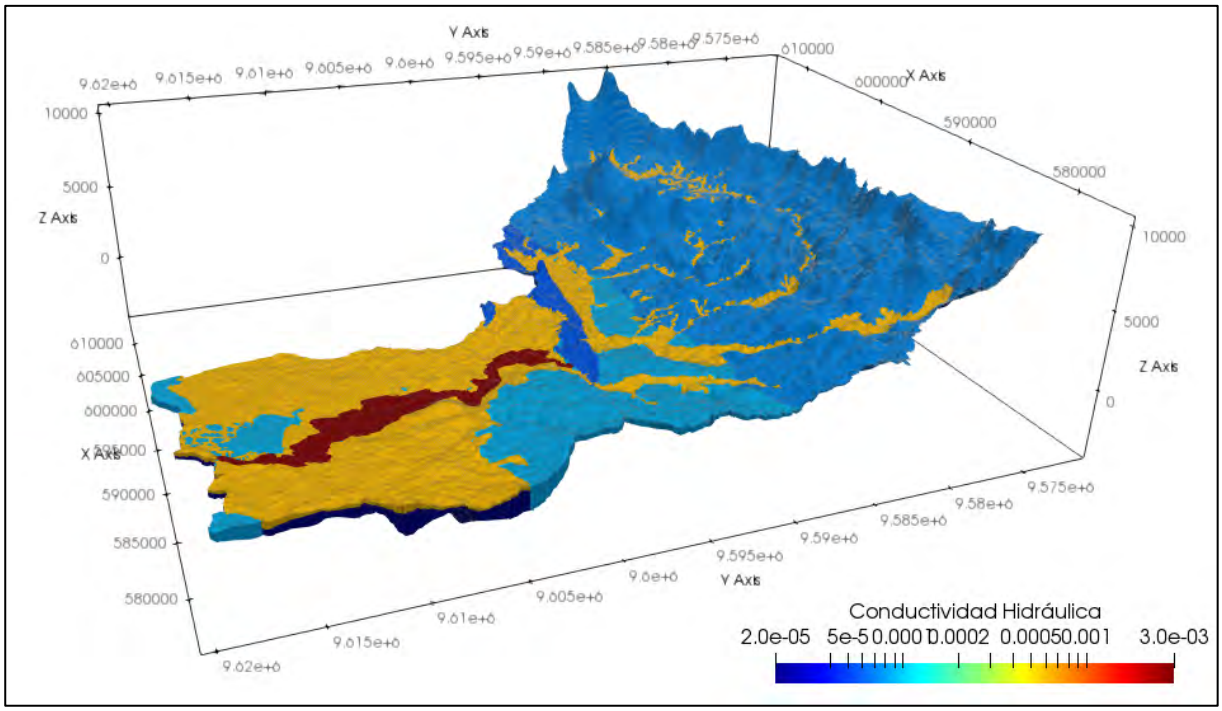


Figura 12-30: Vista Isométrica de la Conductividad Hidráulica Horizontal Calibrada



12.3.1.3 Estadísticas de Calibración del Modelo de Flujo

Las estadísticas de calibración aportan información de las incertidumbres resultantes y riesgos de error, donde se debe establecer errores mínimos aceptables para el modelo numérico. De acuerdo con los resultados de la simulación estos valores son comparados con los datos observados en un plano coordenado de ejes X e Y, donde el eje de las ordenadas (X) esta´ representado por los valores observados y el eje de las abscisas (Y) representado por los valores simulados.

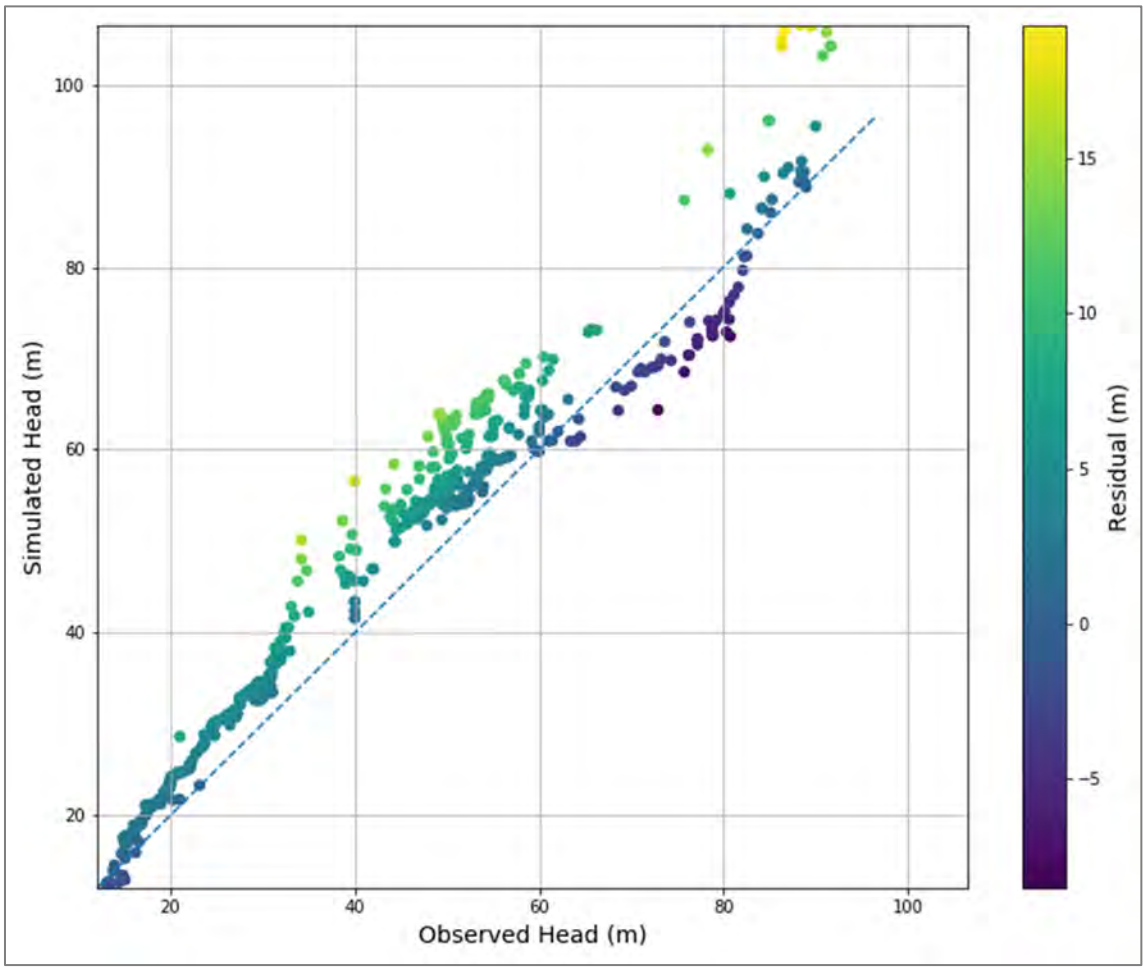
El ajuste de los valores observados y su impacto en la exactitud de los valores simulados, se aprecia en la distancia que existe entre los datos observados/simulados a un cierto valor central representados por una línea de tendencia, donde una distancia más reducida representa un margen de error aceptable que asegura la confiabilidad de la calibración del modelo.

En la Tabla 12-4 se muestra los estadísticos de calibración en los pozos ubicados en las celdas activas del modelo numérico, los estadísticos aplicados son la raíz del error cuadrático medio, el error cuadrático medio, el coeficiente de determinación y los errores absolutos medio y promedio, para los cuales todos demuestran una buena correlación entre lo observado y simulado, y en la Figura 12-31 se representa la comparación entre los valores observados y simulados en el modelo numérico dentro del área activa del modelo.

Tabla 12-4: Estadística de Calibración del Modelo Numérico

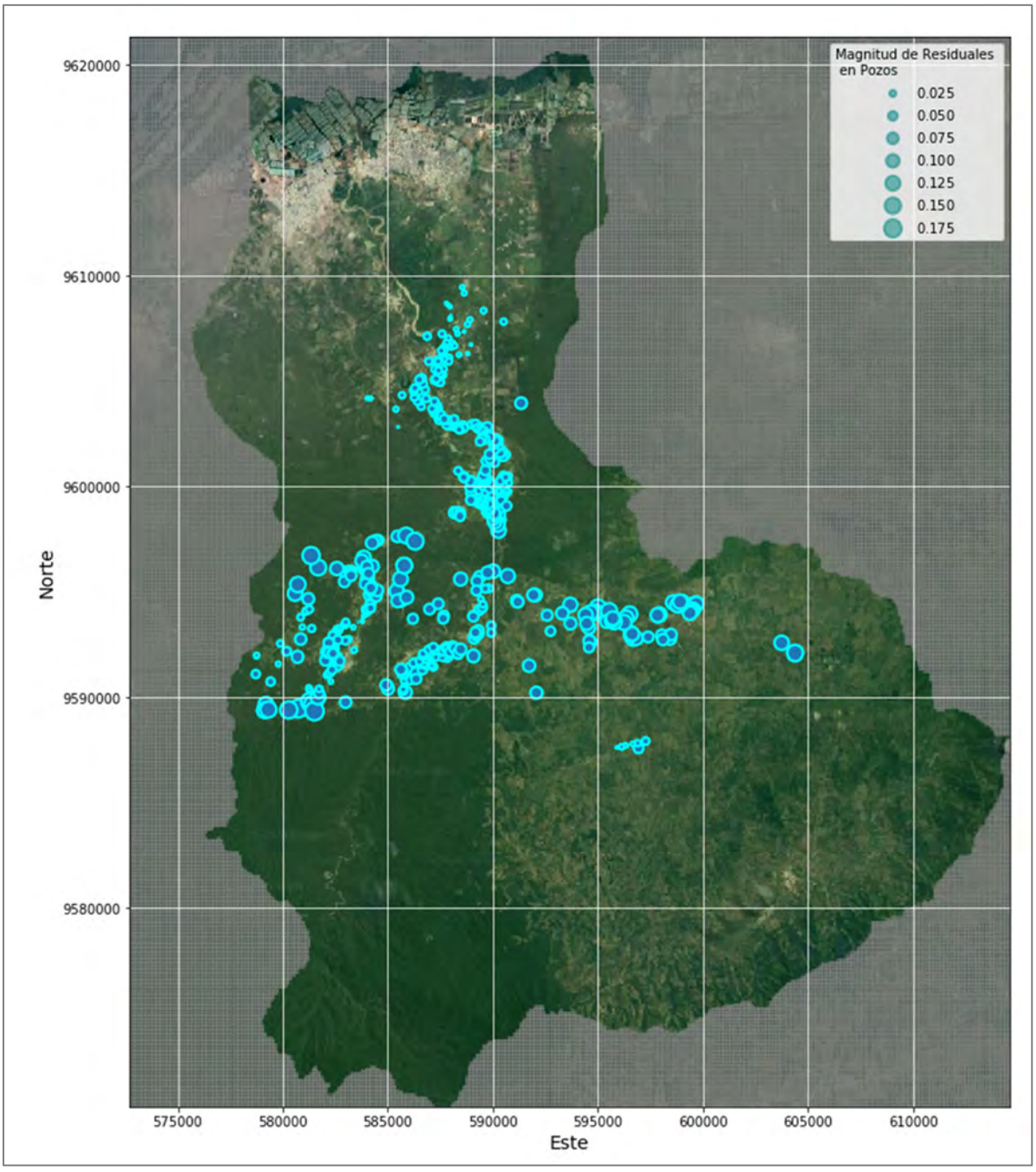
Estadísticos	Valor
Raíz del error cuadrático medio	6.29
Error cuadrático medio	8.08
R2	0.92
Error absoluto promedio	4.88
Error absoluto medio	3.50

Figura 12-31: Comparación Valores Observados y Simulados en el Modelo Numérico



Los residuales absolutos (calculado-observado) van desde un valor máximo de 19.31 m a un valor mínimo de -8.53 m. Una representación espacial del residual absoluto en los puntos de observación activos se muestra en la Figura 12-32.

Figura 12-32: Vista en Planta de Valores Residuales en los Pozos de Observación del Modelo Numérico



12.4 SIMULACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

De acuerdo con el modelo calibrado se realizó la simulación del modelo numérico estacionario usando el código de modelamiento MODFLOW tiene un excelente control de flujo en las celdas, es por eso que la diferencia entre las cantidades totales de ingreso y de salida.

12.4.1 Distribución de la Napa Freática Calibrada

La napa freática es la parte superior del reservorio de aguas subterráneas y viene a ser el nivel al cual una perforación encuentra el agua o el nivel en los pozos anulares / abiertos. La napa representa la dinámica del flujo de aguas subterráneas y el movimiento entre las zonas de alto potencial hidráulico hacia las zonas de menor potencial o zonas de descarga.

Para este modelo numérico la napa freática varía desde un máximo de 942.56 m.s.n.m hasta un mínimo de -1.94 msnm. En la Figura 12-33 se muestra una distribución espacial de la napa freática en la extensión del modelo y la representación isométrica de la napa freática junto con la geometría del modelo numérico acoplado con la distribución de pozos, ríos y drenes se muestra en la Figura 12-34.

Figura 12-33: Vista en Planta de la Napa Freática Calibrada

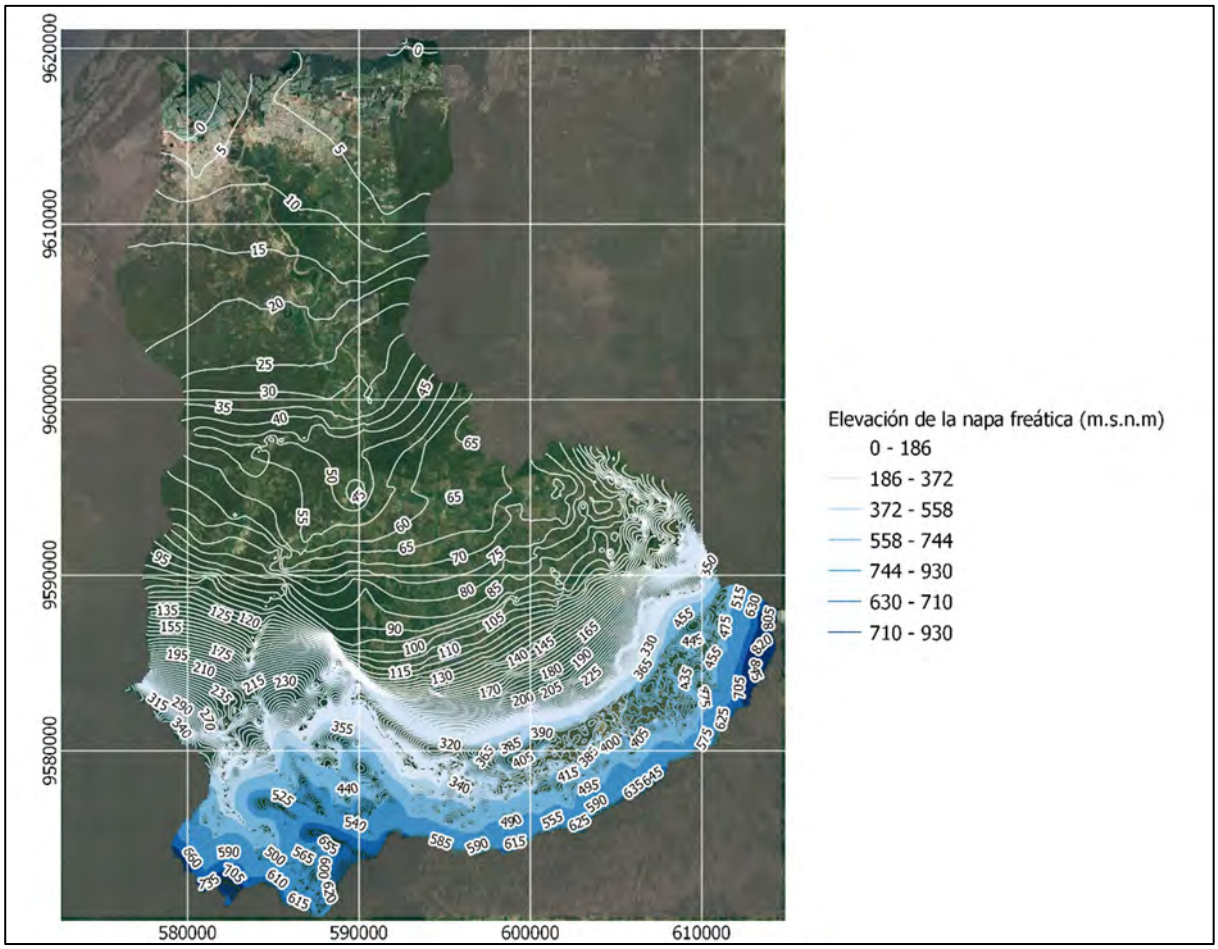
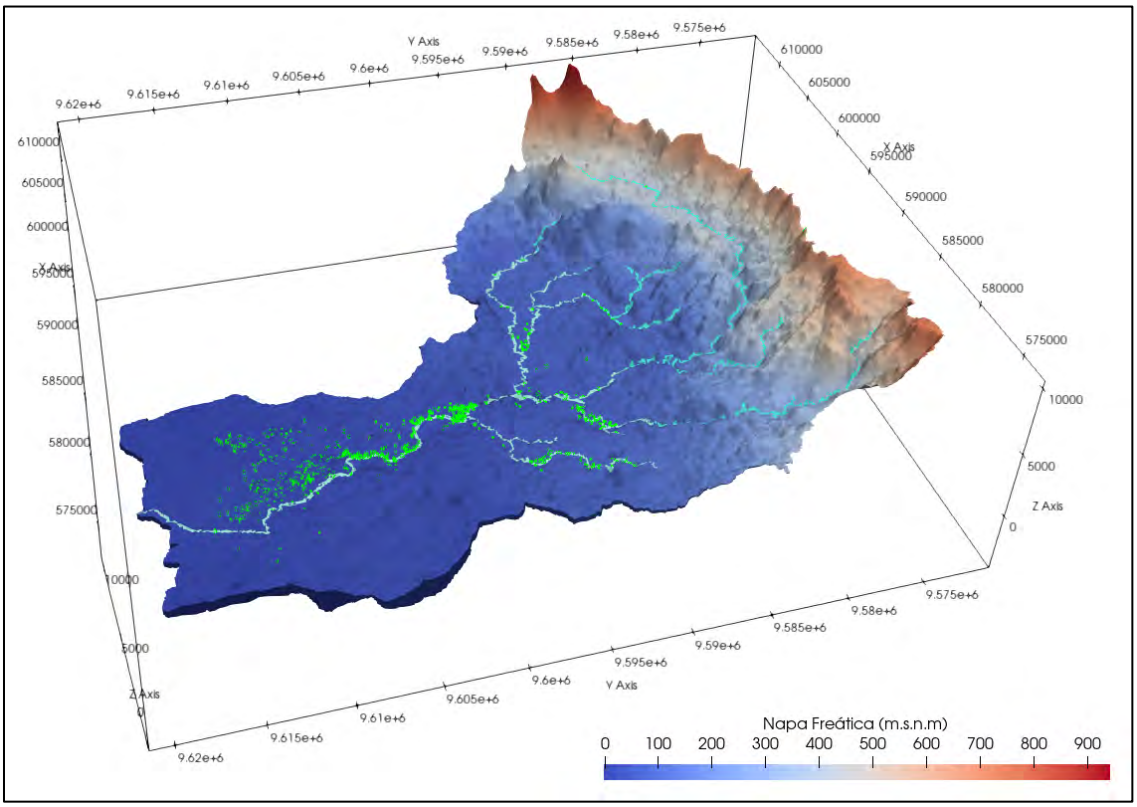


Figura 12-34: Vista Isométrica de la Distribución de la Elevación de la Napa Freática Calibrada (m.s.n.m.) del Modelo Numérico



12.4.2 Balance Hídrico del Modelo Calibrado

El modelo inicial fue calibrado en régimen uniforme mediante la comparación de los niveles simulados por el programa con los niveles freáticos de los pozos aledaños de la cuenca transfronteriza de Zarumilla.

De acuerdo con el balance hídrico del modelo se está considerando la capacidad actual del bombeo de todos los pozos que nos permite analizar los flujos principales de ingreso y de salida del sistema de aguas subterráneas en la cuenca Zarumilla. El código de modelamiento MODFLOW nos permite exportar balances hídricos del período de simulación.

Los flujos del balance se han separado en dos tablas: Flujos de ingreso y Flujo de Salida.

El principal aporte al sistema hídrico lo constituye la infiltración producida por el rio (RIV) con un aporte de 5.87 m^3/s que representa el porcentaje igual a 74.1 % del total de ingreso. El siguiente aporte corresponde a la recarga (RCH) aplicada a la extensión del modelo, la cual aporta 2.04 m^3/s que representa el 25.7 % del total.

El ultimo y menor aporte al sistema de agua subterránea modelado corresponde a los ingresos del flujo regional correspondiente a la condición de borde (GHB), la cual presenta un aporte de 0.01 m^3/s que representa el 0.2%.

En la Tabla 12-5 se representa el balance hídrico de entrada para los escenarios simulados. En la Tabla 12-7 y Gráfico 12-1 se presentan el resumen del balance hídrico.

Tabla 12-5: Caudales de Ingreso al Régimen de Aguas Subterráneas

Condiciones	Escenario 1
GHB	0.01
WEL	0.00
DRN	0.00
RIV	5.87
ET	0.00
RCH	2.04
Total	**7.92**

La principal salida del sistema hídrico simulado corresponde a la variable evapotranspiración de la cuenca (EVT), la cual representa salidas equivalentes a 3.82 m^3/s que representa el 48.42%. La siguiente salida es producida por el flujo base de los ríos (RIV), la cual representa salidas equivalentes a 2.61 m^3/s que representa el 33.08%.

Finalmente se tienen las salidas producidas por las quebradas que fueron implementadas como drenes (DRN), las quebradas representan salidas equivalentes a 0.02 m^3/s que representa el 0.25 % mientras que las salidas de agua por los pozos (WEL) representan salidas equivalentes a 1.44 m^3/s que representa el 18.25% del total de salidas.

En la Tabla 12-6 se representa el balance hídrico de salida para los escenarios simulados, y en la Tabla 12-7 y Gráfico 12-1 se presentan el resumen del balance hídrico.

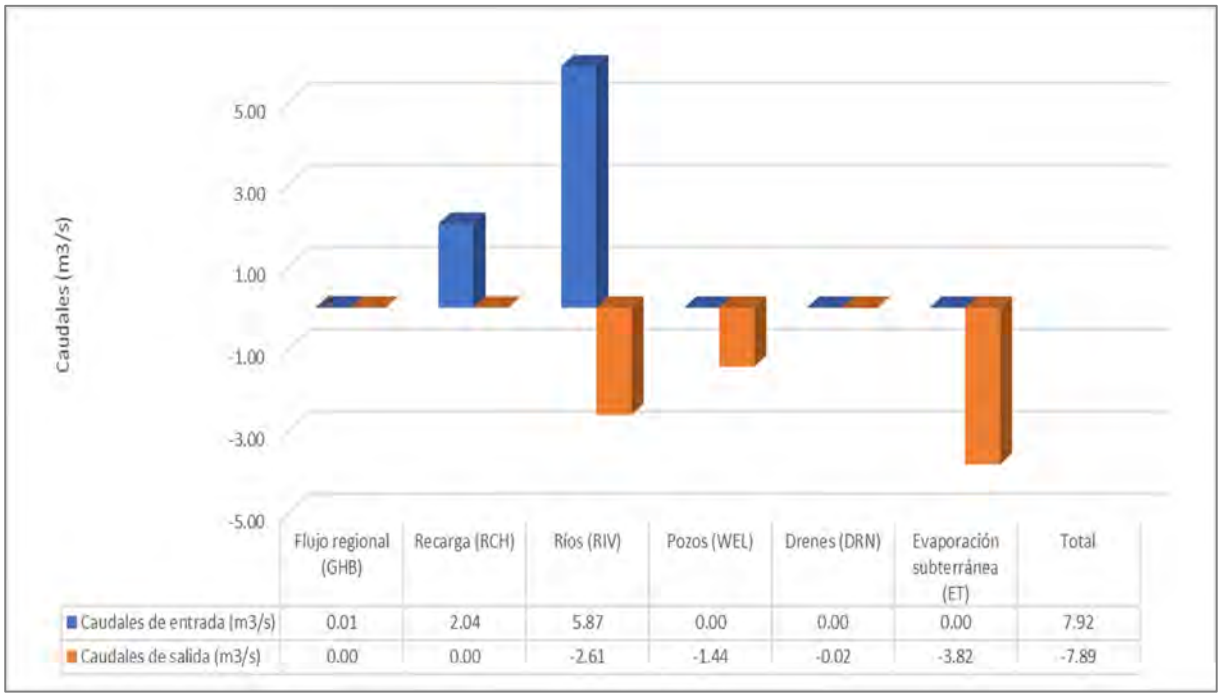
Tabla 12-6: Caudales de Descarga del Régimen de Aguas Subterráneas

Condiciones	Escenario 1
GHB	0.00
WEL	1.44
DRN	0.02
RIV	2.61
ET	3.82
RCH	0.00
Total	7.89

Tabla 12-7: Balance Hídrico de Aguas Subterráneas

Condiciones	Entrada		Salida	
	m^3/s	L/s	m^3/s	L/s
Flujo regional (GHB)	0.007	6.941	0.0042674	4.2674
Recarga (RCH)	2.043	2043.300	0	0
Ríos (RIV)	5.874	5873.800	2.6118	2611.8
Pozos (WEL)	0.000	0.000	1.4353	1435.3
Drenes (DRN)	0.000	0.000	0.01786	17.86
Evaporación subterránea (ET)	0.000	0.000	3.8206	3820.6
Total	**7.924**	**7924.041**	**7.890**	**7889.827**
Porcentaje de discrepancia	**0.43**			

Gráfico 12-1:Tasas del balance Hídrico



	Flujo regional (GHB)	Recarga (RCH)	Ríos (RIV)	Pozos (WEL)	Drenes (DRN)	Evaporación subterránea (ET)	Total
Caudales de entrada (m3/s)	0.01	2.04	5.87	0.00	0.00	0.00	7.92
Caudales de salida (m3/s)	0.00	0.00	-2.61	-1.44	-0.02	-3.82	-7.89

12.5 DISPONIBILIDAD HÍDRICA

La estimación del volumen de agua almacenado en un acuífero es de suma importancia dentro de los esquemas de gestión del agua. Ante esto, se requiere conocer la disponibilidad hídrica y la reserva explotable del agua.

La disponibilidad hídrica permite conocer la reserva total del acuífero y sus posibilidades de explotación; sin embargo, hay que considerar que el agua presente en un acuífero no es completamente disponible para su explotación, por lo que se podría considerar como una reserva no renovable de agua.

En contraste, la reserva explotable está asociado a la cantidad de agua que ingresa al sistema de aguas subterráneas y que puede ser utilizada de manera sostenible, por lo que se podría considerar como una reserva renovable y que comúnmente es obtenido mediante los resultados del modelo numérico de aguas subterráneas.

12.5.1 Reserva Total de Agua Subterránea

Con el propósito de tener mayor detalle y a la vez confiabilidad en la estimación de las reservas totales de agua subterránea, se recomienda asociarlo con el rendimiento especifico (Sy), producto de las pruebas de bombeos realizadas en campo.

El cálculo del volumen de agua estimado se ha realizado para cada una de las mallas de la extensión del acuífero, en este caso se ha discretizado para mallas cuadradas dando en su conjunto un área total de 1090.98 Km^2.

En cada malla cuadrada se tiene datos del espesor de horizonte saturado, profundidad del nivel estático del agua, área y el coeficiente de almacenamiento asumido. El espesor saturado

del acuífero varía de 1.7 a 54.8 m y el coeficiente de almacenamiento asumido es de 0.12 para acuíferos libres. La reserva total fue calculada mediante la siguiente expresión:

$$Rt = \sum [\, Ac \times Ec \times Sy \,]$$

Donde:
Rt = Reservas totales del acuífero en m^3
Ac = Área de cada malla en m^2
ec = Espesor promedio del acuífero saturado de cada malla en m
Sy = Coeficiente de almacenamiento

La estimación de la reserva total de agua almacenada en el acuífero es de 4841.33 hm^3/año, el mismo que corresponde a la sumatoria de los volúmenes calculados en cada una de las 110273 mallas cuadradas en que fue discretizado todo el acuífero Zarumilla.

En la Figura 12-35 se observa el mapa de reservas totales almacenadas en el acuífero.

12.5.2 Reserva Explotable de Agua

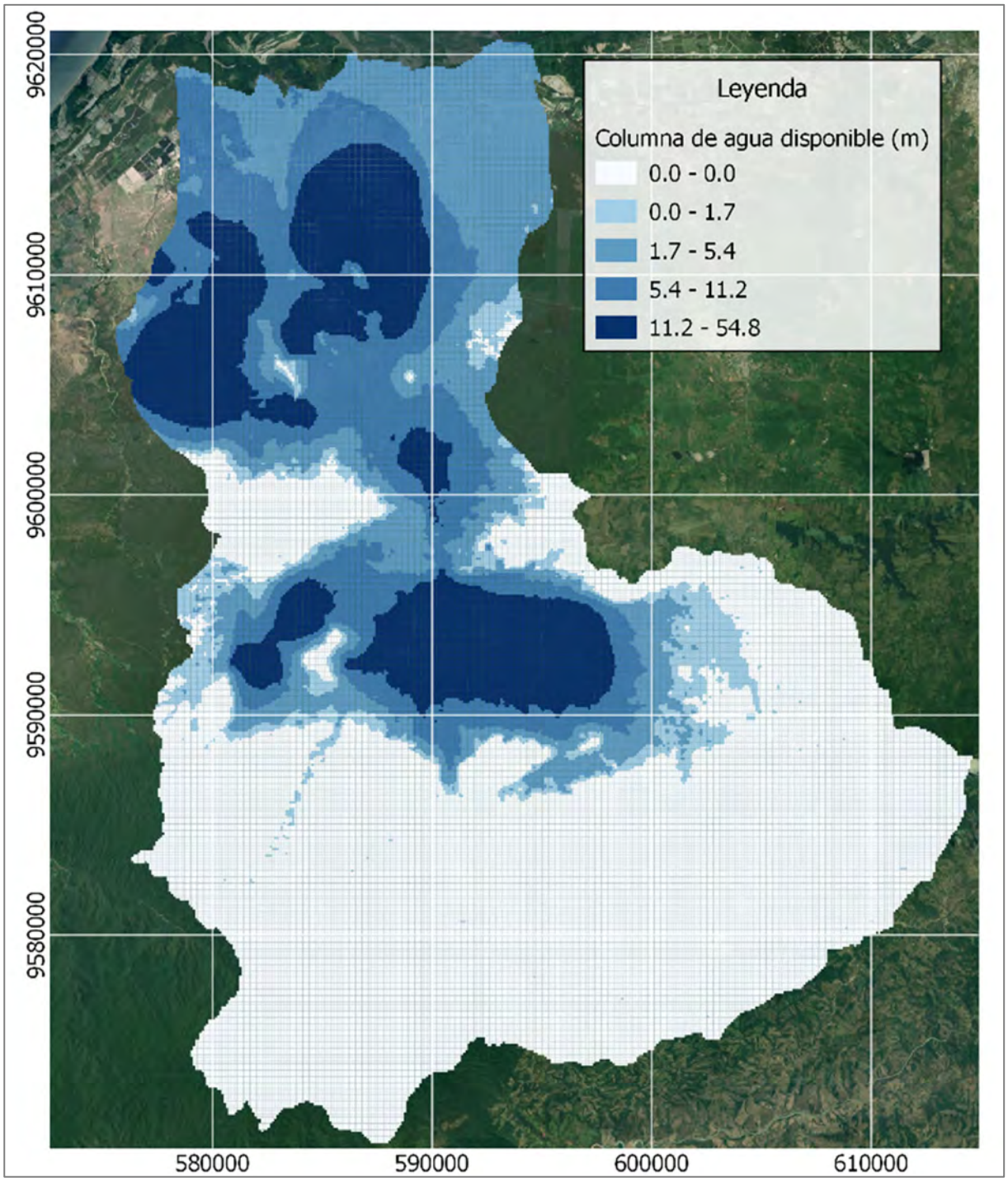
La reserva explotable del agua se estima de acuerdo a los resultados del balance hídrico del modelo numérico de aguas subterráneas, donde el volumen del acuífero corresponde a 7.89 m^3/s, que representan 247.87 hm^3/año, que abarca la cantidad explotable de agua subterránea para el consumo global, incluida la biota, donde una mayor explotación por parte de los pozos conllevaría a tener una mayor disposición de los ecosistemas.

Es necesario precisar que esta interpretación está basada en la información recopilada durante el inventario del 2019 y considera principalmente al acuífero somero, compuesto por el Horizonte 1. Sin embargo, se conoce que a mayor profundidad es posible hallar mayor cantidad de agua subterránea, pero para su cuantificación se requerirá de estudios hidrogeológicos más detallados y localizados.

En la Figura 12-35 se muestra la disponibilidad hídrica en la cuenca Zarumilla, en base a la columna de agua disponible. En ésta se aprecia que las zonas media y baja de la cuenca concentran la mayor disponibilidad hídrica, con columnas de agua disponible que varía entre 11.2 m y 54.8 m (véase Anexo VIII-G, sólo en digital).

En el Anexo VIII-F (sólo en digital) se presenta la tabla de cálculo de la disponibilidad hídrica.

Figura 12-35: Vista de la Disponibilidad Hídrica en la Cuenca Zarumilla



13 PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE CONTROL DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS

13.1 CRITERIOS

Tomando en consideración la delimitación del potencial acuífero identificado en la cuenca transfronteriza Zarumilla, compuesto principalmente por dos horizontes, uno somero y otro profundo, y considerando la existencia de una red piezométrica vigente (sector peruano) e información histórica (sector ecuatoriano), así como la profundidad actual de los pozos registrados en la actualización del inventario, se procedió a la identificación de los pozos que podrían servir para optimizar la red de control piezométrica actual (vigente) establecida en el sector peruano y establecer una red completa para el sector ecuatoriano.

La optimización de la red consideró la eliminación de pozos que no presentan actualmente las condiciones adecuadas para la medición de los niveles freáticos/piezométricos, y la adición de nuevos pozos que cumplen con las características adecuadas para la medición y que hayan sido nivelados.

13.2 JUSTIFICACIÓN

Los pozos identificados para la red piezométrica tuvieron en consideración la profundidad de su instalación, siendo un primer grupo el de pozos menores a 60 m de profundidad para representar al horizonte somero del acuífero, que generalmente se encuentran instalados en materiales cuaternarios compuesto por materiales aluviales y macizos rocosos altamente fracturados. El segundo grupo de pozos considera a los instalados a profundidades mayores a los 60 m, que representan al horizonte profundo del acuífero, instalado principalmente en macizos rocosos levemente fracturados de diferentes formaciones litológicas.

El monitoreo piezométrico diferenciado con los pozos someros y profundos servirá para determinar la existencia de uno o dos acuíferos. En caso, tanto los pozos someros como profundos muestren niveles piezométricos muy similares, será un indicativo de la existencia de un solo acuífero; en cambio, si es que se tuviera una diferencia en los niveles piezométricos, sería un indicio de la existencia de dos acuíferos. Para la corroboración de la interpretación sobre la definición del acuífero se apoyará adicionalmente con la red de monitoreo de calidad de agua.

13.3 RED DE CONTROL PIEZOMÉTRICO OPTIMIZADA PROPUESTA

La Tabla 13-1 muestra el detalle de los pozos que conforman la red control piezométrico propuesta (optimizada); mientras que la Figura 13-1 presenta la distribución espacial de los pozos que conforman la red propuesta en el área de estudio.

Con el fin de mantener el registro de datos con el que ya se cuenta, en principio, se ha tratado de mantener la red de control piezométrica actual (sector Peruano); sin embargo, se han excluido los pozos que se encontraban en un estado que no permitía su muestreo (sellados, enterrados, contaminados, entre otras razones), y otros que han sido identificados como No Utilizables en el inventario (Inventario 2019) que forma parte del alcance de la presente consultoría.

Se propone efectuar un monitoreo periódico de los pozos seleccionados, con la finalidad de confirmar la existencia de los dos (02) horizontes del acuífero interpretado y la existencia de una interconexión entre ambos. Se ha establecido una frecuencia de monitoreo de forma mensual, trimestral y semestral; aunque en la actualidad existen instrumentos de mediciones de niveles de agua automáticos (*transducer* o *datalogger*) que podrían utilizarse de manera óptima en los pozos de frecuencia mensual, las cuales podrían ser establecidas inclusive con una frecuencia horaria o diaria. Con estos instrumentos automáticos, aparte de tener una mejor y robusta data, se optimiza la falta de personal para su medición periódica.

Tabla 13-1: Red de Control Piezométrico Optimizada Propuesta

N°	Código de Pozo*	Código IRHS	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)		Acuífero Objetivo	Profundidad Actual (m)	Estado del Pozo	Distrito	Sector	Propietario del Pozo	Frecuencia de Medición		
			Este (m)	Norte (m)							Mensual	Trimestral	Semestral
Sector Peruano													
1	IRHS-9-ZAR	9	577320	9616463	Somero	8.24	**	Zarumilla	Nueva Esperanza	Grupo de Regantes "Nueva Esperanza"			X
2	IRHS-11-ZAR	11	575455	9613507	Somero	9.00	**	Zarumilla	Nueva Esperanza	Leonardo Barrero Núñez			X
3	IRHS-14-ZAR	14	575288	9615295	Somero	5.46	**	Zarumilla	Nueva Esperanza	Julio Vivas		X	
4	IRHS-18-ZAR	18	574764	9614786	Somero	5.30	**	Zarumilla	Nueva Esperanza	Agustín Vargas	X		
5	IRHS-24-ZAR	24	573472	9613969	Somero	7.29	**	Zarumilla	Nueva Esperanza	Demetrio Monja Hernández	X		
6	PER-831	27	581073	9612113	Profundo	120.00	Utilizado	Zarumilla	Zarumilla	Aguas de Tumbes - Pozo Nº 02	X		
7	PER-844	30	580208	9612465	Profundo	120.00	Utilizado	Zarumilla	Zarumilla	Agua potable N° 4-8 de la localidad de Zarumilla, administrado por OTASS	X		
8	IRHS-36-ZAR	36	574423	9607559	Somero	8.40	**	Zarumilla	Quebrada Grande	Aureliano Villegas Calderón	X		
9	IRHS-42-ZAR	42	573269	9607974	Profundo	130.00	**	Zarumilla	El Santuario	German Gaspar Quiroz Severino	X		
10	IRHS-45-ZAR	45	579278	9612456	Profundo	88.00	**	Zarumilla	Zarumilla	Cuartel Zarumilla - BIM-05	X		
11	PER-285	49	586767	9611599	Somero	5.84	Utilizable	Aguas Verdes	Dornajo	Segundo Infante Canales	X		
12	PER-364	57	586360	9612484	Somero	7.30	Utilizado	Aguas Verdes	Loma Saavedra	Abad Morán Baca		X	
13	IRHS-70 AGV	70	586201	9612140	Profundo	12.20	**	Aguas Verdes	Loma Saavedra	Maximiliano Moreno Abad		X	
14	PER-645	90	584257	9611880	Somero	5.00	Utilizable	Aguas Verdes	Pocitos	Balerio Sanjinez Peña		X	
15	PER-473	104	585801	9611535	Somero	4.83	Utilizado	Aguas Verdes	Cuchareta	Saúl Carrasco Infantes	X		
16	IRHS-110 AGV	110	584007	9610265	Somero	6.35	**	Aguas Verdes	Nueva Esperanza	Gerardo Camizan Neyra		X	
17	PER-751	137	582861	9612758	Somero	6.39	Utilizable	Aguas Verdes	Pocitos	Rafael Guerrero Peña	X		
18	IRHS-151 AGV	151	585247	9613277	Somero	6.70	**	Aguas Verdes	Loma Saavedra	Juana Ines Socola Moran			X
19	IRHS-192 AGV	192	583954	9613212	Somero	6.00	**	Aguas Verdes	Pitaya	Hermelinda Guerrero Gonzáles			X
20	PER-746	209	582937	9614109	Profundo	110.00	Utilizado	Aguas Verdes	Canario I	Comité de Regantes Cruz - Canario I	X		
21	IRHS-224 AGV	224	581859	9614442	Profundo	98.00	**	Aguas Verdes	Complejo	Aguas de Tumbes - Pozo Nº 05	X		
22	PER-452	279	585942	9612106	Somero	23.00	Utilizado	Aguas Verdes	Loma Savedra	Grupo Regante "Ortencia Barrientos"		X	
23	IRHS-317 AGV	317	584446	9613968	Somero	15.65	**	Aguas Verdes	La Pitaya	David Murillo Chanta			X
24	IRHS-319 AGV	319	583691	9613828	Somero	14.00	**	Aguas Verdes	La Pitaya	Eladio Cedillo	X		
25	IRHS-320 AGV	320	584680	9610813	Somero	16.13	**	Aguas Verdes	Cuchareta	Población " Cuchareta Baja"			X
26	PER-02	03	590188	9598419	Somero	6.07	Utilizado	Papayal	Pueblo Nuevo	Carmen Cruz de López	X		
27	PER-27	10	589650	9599101	Somero	3.65	Utilizado	Papayal	Pueblo Nuevo	Manuel Francisco Dioses Cruz	X		
28	PER-63	12	589058	9599388	Somero	3.58	Utilizado	Papayal	Pueblo Nuevo	Carlos Germán Correa Mogollón			X
29	PER-28	24	589648	9600771	Somero	4.72	Utilizado	Papayal	Lechugal	María López Torres	X		
30	PER-30	31	589616	9602261	Somero	4.75	Utilizado	Papayal	Los Limos	Enrique Núñez Ramírez			
31	PER-88	36	588442	9602700	Somero	5.68	Utilizable	Papayal	La Coja	Comité de Riego "La Coja"	X		
32	PER-264	39	586844	9603977	Somero	5.92	Utilizado	Papayal	El Mariano	Peregrino Campaña García	X		
33	PER-392	45	586259	9604268	Somero	15.55	Utilizable	Papayal	Baldarrago	Herederos Medina Arica		X	
34	PER-348	47	586441	9604634	Somero	4.35	Utilizado	Papayal	El Huaco	José Cisneros Retete			
35	PER-565	52	585024	9605525	Profundo	87.00	Utilizado	Papayal	Papayal	Aguas de Tumbes - Papayal	X		
36	PER-257	65	586883	9607137	Somero	4.20	Utilizable	Papayal	La Palma	Victor García Preciado		X	
37	PER-418	78	586109	9607042	Somero	5.45	Utilizable	Papayal	La Palma	José Chocán Correa	X		
38	PER-110	82	587922	9607273	Somero	6.00	Utilizable	Papayal	Las Delicias	Comité Agrario Las Delicias			X
39	IRHS-101 PPY	101	587868	9607978	Somero	4.59	**	Papayal	Palo Santal	Silverio Espinoza Sorrozas			X
40	PER-172	117	587381	9609087	Somero	6.78	Utilizado	Papayal	Dos Bocas	Calixto Marchán Silva		X	
41	PER-341	133	586467	9608668	Somero	3.25	Utilizable	Papayal	Uña de Gato	Manuel Marchán Lupú		X	
42	PER-295	134	586693	9608935	Somero	4.25	Utilizable	Papayal	Uña de Gato	Oswaldo Alvarez Marchan		X	
43	PER-239	160	586939	9609723	Somero	4.00	Utilizado	Papayal	Palo Santal	Ricardo Clavijo Cornejo	X		
44	PER-96	201	588266	9601947	Somero	1.41	Utilizable	Papayal	La Coja	Pablo Oviedo Mogollón		X	
45	PER-150	210	587546	9609843	Somero	12.42	Utilizado	Papayal	Dos Bocas	Benito Véliz Moreno		X	
46	PER-727	07	583249	9595779	Somero	7.20	Utilizable	Matapalo	Refugio	Beato Cuello Zurita		X	
47	PER-683	15	583997	9594041	Somero	4.32	Utilizable	Matapalo	Los Maderos	Raúl García Portocarrero		X	
48	PER-799	39	581991	9590846	Somero	5.65	Utilizado	Matapalo	Tutumo	Lino Farfán Ramirez		X	
49	IRHS-46-MAT	46	582996	9592678	Somero	5.00	**	Matapalo	Nuevo Progreso	Octavio León Timaná			X

N°	Código de Pozo*	Código IRHS	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)		Acuífero Objetivo	Profundidad Actual (m)	Estado del Pozo	Distrito	Sector	Propietario del Pozo	Frecuencia de Medición		
			Este (m)	Norte (m)							Mensual	Trimestral	Semestral
50	PER-749	48	582923	9591895	Somero	45.00	Utilizable	Matapalo	Nuevo Progreso	Población Nuevo Progreso	X		
51	PER-723	50	583357	9593319	Somero	2.40	Utilizable	Matapalo	Nuevo Progreso	Manuel Sandoval Núñez		X	
52	IRHS-61-MAT	61	585736	9590320	Somero	6.70	**	Matapalo	Las Peñitas	Felicio Ramírez Prado	X		
53	PER-481	63	585764	9591015	Somero	8.00	Utilizado	Matapalo	Las Peñitas	Domingo Baca FarÍas		X	
54	PER-212	71	587098	9591525	Somero	3.40	Utilizado	Matapalo	Isla Noblecilla	Josefa Carrillo Ramirez		X	
55	IRHS-76-MAT	76	586408	9591684	Somero	10.07	**	Matapalo	Leandro Campos	Gerardo Jiménez Zapata			X
56	PER-579	96	584915	9590594	Somero	7.00	Utilizable	Matapalo	Las Peñitas	Rosario Correa Chanta		X	
57	PER-46	103	589368	9595721	Somero	3.57	Utilizable	Matapalo	Quebrada Seca	Melitón Palacios Granda		X	
58	PER-16	105	589809	9595166	Somero	0.85	Utilizado	Matapalo	Quebrada Seca	José Rosas Álvarez		X	
59	PER-34	110	589527	9594416	Somero	22.00	Utilizable	Matapalo	Quebrada Seca	Raymundo López Martínez		X	
60	PER-48	116	589341	9593809	Somero	4.50	Utilizado	Matapalo	Quebrada Seca	Filemón Melendez Huaman			X
61	PER-64	122	589012	9592665	Somero	35.37	Utilizable	Matapalo	Matapalo	Población Matapalo	X		
62	IRHS-124 MAT	124	582450	9592866	Somero	5.10	**	Matapalo	Tutumo	Rosa Febres Merino			X
63	PER-214		587089	9591440	Somero	40.24	Utilizado	Matapalo	I. Noblecila	Agua potable de la localidad de Isla Noblecilla	X		
64	PER-803		581795	9607016	Profundo	80.20	Utilizado	Papayal	El Pasayo	José Zupu	X		
65	PER-66	194	588982	9600274	Somero	25.25	Utilizado	Papayal	Lechugal	Población Lechugal		X	
66	PER-772		582470	9591446	Profundo	65.00	Utilizado	Matapalo	Tutumo	Municipio Matapalo	X		
67	PER-21	185	589737	9598791	Somero	3.46	Utilizado	Papayal	Pueblo Nuevo	Comité de Riego 27 de Mayo			X
68	PER-465		585870	9597689	Somero	40.00	Utilizable	Matapalo	Algarrobal	7 usuarios	X		
69	PER-87	218	588443	9598728	Somero	4.50	Utilizado	Papayal	Quiñones	Antonio Cruz Chinchay			X
70	PER-544		585250	9613280	Somero	9.00	Utilizado	Aguas Verdes	Loma Saavedra	Zocola Jose		X	
71	PER-428		586076	9612790	Somero	46.03	Utilizable	Aguas Verdes	Loma Saavedra		X		
72	PER-865		575183	9615118	Profundo	100.00	Utilizado	Zarumilla	El Bendito		X		
73	PER-743		582983	9605899	Profundo	200.00	Utilizado	Papayal	El Pasayo		X		
74	PER-744		582980	9605898	Profundo	80.00	Utilizado	Papayal	El Pasayo				
75	PER-805		581791	9607014	Profundo	96.00	Utilizado	Papayal	El Pasayo		X		
Sector Ecuatoriano													
1	ECU-25		599364	9594005	Profundo	60.50	Utilizado	Palmales	06 de Noviembre			X	
2	ECU-251		590437	9594901	Somero	55.70	Utilizado	Carcabón	Qda. Seca	Comunidad	X		
3	ECU-505		587255	9604130	Profundo	83.25	Utilizado	Chacras	Balsalito	Junta de Balsalito		X	
4	ECU-420		588794	9607698	Profundo	126.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Junta Agua Chacras	X		
5	ECU-515		585111	9615003	Profundo	183.00	Utilizado	Huaquillas	Huaquillas	Junta Agua Huaquillas	X		
6	ECU-55		596926.99	9587712.05	Profundo	65.00	Utilizado	Palmales	Manabi el Oro	Junta Agua Manabi El oro	X		
7	ECU-46		597536	9593020	Somero	18.00	Utilizado	Palmales	San Pedro	Jimmy Riera	X		
8	ECU-327		589981	9599827	Somero	9.95	Utilizado	Carcabón	Carcabón	Enrique Medina		X	
9	ECU-261		590386	9598998	Somero	4.86	Utilizable	Carcabón	Carcabón	Uruzungo	X		
10	ECU-235		590536	9605024	Profundo	120.10	Utilizado	Chacras		Francisco Ramón Rodriguez	X		
11	ECU-335		589909	9605006	Profundo	120.57	Utilizado	Chacras		Amelia Borja Ochoa	X		
12	ECU-407		588992	9611082	Profundo	102.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Junta Agua Huaquillas		X	
13	ECU-144		591470	9611453	Profundo	140.20	Utilizado	Chacras		Rolando Mora	X		
14	ECU-228		590586	9612960	Profundo	103.80	Utilizado	Huaquillas		Eliseo Castillos		X	
15	ECU-214		590719	9613422	Somero	54.95	Utilizado	Huaquillas		Julia María Rodríguez		X	
16	ECU-382		589357	9612136	Somero	40.00	Utilizado	Huaquillas		Oviedo Benito		X	
17	ECU-375		589415	9608002	Profundo	61.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Camarón El Oro		X	
18	ECU-432		588495	9608936	Profundo	63.64	Utilizable	Chacras	Chacras	Finca Tres Marías		X	
19	ECU-470		587772	9609745	Profundo	60.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Aronte		X	
20	ECU-428		588546	9609466	Somero	31.50	Utilizable	Chacras	Chacras	Finca Tres Marías	X		
21	ECU-155		591384	9610300	Profundo	100.00	Utilizado	Chacras		Jimmy Romero	X		
22	ECU-219		590686	9612028	Profundo	80.00	Utilizado	Chacras		Francisco Jaramillo		X	
23	ECU-331		589933	9611964	Profundo	70.00	Utilizado	Chacras		Luz Lavanda	X		
24	ECU-399		589154	9611971	Profundo	70.00	Utilizado	Huaquillas		Fausto Fijo		X	
25	ECU-425		588619	9612742	Profundo	73.00	Utilizado	Huaquillas		Julio Guaycha Cuenca	X		
26	ECU-381		589372	9612590	Profundo	80.00	Utilizado	Huaquillas		Humberto Ortiz		X	

N°	Código de Pozo*	Código IRHS	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 s)		Acuífero Objetivo	Profundidad Actual (m)	Estado del Pozo	Distrito	Sector	Propietario del Pozo	Frecuencia de Medición		
			Este (m)	Norte (m)							Mensual	Trimestral	Semestral
27	ECU-259		590389	9612258	Profundo	100.00	Utilizado	Huaquillas		Manuel Chucrima	X		
28	ECU-133		591670	9613270	Profundo	100.50	Utilizado	Chacras		Miguel Calle		X	
29	ECU-116		591973	9614122	Profundo	80.00	Utilizado	Huaquillas		Darwin Hidalgo		X	
30	ECU-197		590818	9614600	Profundo	100.00	Utilizado	Huaquillas		Amable Paladines	X		
31	ECU-451		588050	9609629	Profundo	80.00	Utilizado	Chacras	Chacras			X	
32	ECU-446		588135	9610128	Profundo	60.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Aronte		X	
33	ECU-112		592531	9592948	Profundo	124.00	Utilizado	Palmales	El Progreso	Iñiguez	X		
34	ECU-356		589599	9603666	Profundo	105.60	Utilizado	Carcabón	Guabillo	Honores		X	
35	ECU-293		590271	9604419	Profundo	120.00	Utilizado	Carcabón	Guabillo		X		
36	ECU-419		588798	9606307	Profundo	150.00	Utilizable	Chacras	Chacras	Cordoba E	X		
37	ECU-402		589086	9607685	Profundo	120.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Eliandrade	X		
38	ECU-396		589194	9608178	Profundo	87.00	Utilizado	Chacras	Chacras	ORG Mensajeros de la Paz		X	
39	ECU-59		596658	9587784	Somero	23.00	Utilizable	Palmales	Manabi El Oro	Asociación de Riego Manabi	X		
40	ECU-06		601117	9594788	Somero	31.20	Utilizado	Palmales		Manuel Herminio Garzón	X		
41	ECU-390		589263	9599726	Somero	18.00	Utilizado	Palmales	Progreso		X		
42	ECU-212		590724	9601247	Somero	30.00	Utilizado	Carcabón	Guabillo	Florencio Flores		X	
43	ECU-307		590165	9602142	Somero	22.41	Utilizado	Carcabón	Guabillo	Asunción Guerrero	X		
44	ECU-503		587304	9605139	Somero	18.00	Utilizado	Chacras	Balsalito	Máximo Campoverde		X	
45	ECU-431		588500	9607398	Somero	40.00	Utilizado	Chacras	Chacras		X		
46	ECU-258		590397	9610466	Somero	44.63	Utilizable	Chacras		Walter Dávila		X	
47	ECU-456		587967	9610202	Somero	40.00	Utilizado	Chacras	Chacras	Aronte		X	
48	ECU-173		591066	9611302	Somero	33.00	Utilizable	Chacras		Patricio Pardo	X		
49	ECU-140		591583	9614030	Somero	23.93	Utilizable	Huaquillas			X		
50	ECU-158		591337	9614078	Somero	35.00	Utilizado	Huaquillas		José Luis Rodríguez	X		

Nota:

* El código del pozo fue el establecido en el Inventario 2019. Cuando no se identificó el pozo en el inventario, se creó un código basado en el código IRHS asignado y el distrito en el que se ubica el pozo.

** Debe ser definido en el primer monitoreo ejecutado. No se descartó debido a que:
i) Aunque no se pudo medir su profundidad actual en el inventario 2019, éste se registró en estado UTILIZADO y en algunos casos hasta trabajando durante el censo
ii) Fue monitoreado en campaña junio 2019 por la ALA TUMBES; por lo que se asume que su estado es UTILIZADO o UTILIZABLE y podría ser considerado en la red propuesta de verificarse su operatividad.
En celda gris los pozos que se mantienen de la red de control piezométrica o hidrogeoquímico actual ALA TUMBES

123 Profundidad inicial registrada en el inventario 2019, se consideró a falta de profundidad actual

123 Datos tomados de red piezométrica o hidrogeoquímica actual ALA TUMBES, se consideró a falta de profundidad actual del pozo en el Inventario 2019

123 Dato del pozo registrado en las pruebas de bombeo ejecutadas el 2019, se consideró a falta de este dato en el inventario 2019

Figura 13-1: Red de Control Piezométrico Optimizada Propuesta

14 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

14.1 CONCLUSIONES

- La información existente data de aproximadamente 17 a 20 años atrás y se carece de información litológica; es decir, no se tiene registros litológicos de las perforaciones de los pozos ni de los diseños de instalación.
- Los principales usos de agua en la cuenca Zarumilla son para abastecimiento agrario, poblacional e industrial.
- Las parroquias rurales en Ecuador (al año 2016) no contaban con el servicio de agua potable y solo disponían de un sistema de captación a través de pozos profundos. El volumen total de consumo anual de las 08 JAAPs para ese año era de 0.2 hm^3/año.
- En el territorio peruano (para el año 2016) el volumen de uso de agua para fines poblacionales dentro de la cuenca Zarumilla era de 3.10 hm^3/año.
- El principal recurso hídrico de la cuenca Zarumilla lo representa el río del mismo nombre, aunque su régimen no es permanente. El caudal calculado (para el punto de aforo Bolsico) indica que en el mes de abril es el máximo con 31.30 m^3/s y el mínimo en el mes de octubre con 0.5 m^3/s.
- La demanda teórica de agua para uso agrícola estimada para el 2017 en la cuenca Zarumilla era de 29.60 hm^3/año (939 l/s) en Ecuador y de 48.18 hm^3/año (1528 l/s) en Perú.
- La geología de la cuenca está compuesta mayormente por materiales cuaternarios en el sector de la costa y por macizos rocosos en la parte alta (naciente), y está intersectado por fallas regionales, tanto transversales como longitudinales a la cuenca, que debe jugar un papel importante en el régimen hidrogeológico.
- La prospección geofísica llevada a cabo (SEV y TDEM) indican que podría existir un (01) acuífero subregional libre, compuesto por dos (02) horizontes, uno somero (con resistividades de 2.52 a 7.99 Ω.m) y otro profundo (con resistividades de 53.57 a 105.11 Ω.m o más). El somero (Horizonte 1) podría estar compuesto mayormente por materiales cuaternarios y macizos rocosos muy fracturados, principalmente en las zonas media y baja de la cuenca; mientras que el profundo (Horizonte 2) se trataría de macizos rocosos levemente fracturados.
- El espesor del Horizonte 1 podría variar generalmente en el rango de 60 a 100 m, y en algunos sectores afectados por las fallas geológicas regionales hasta 300 m; mientras que el profundo podría tener mayormente un espesor de 200 m.
- Durante los trabajos de campo (setiembre-octubre 2019) se inventariaron un total de 1388 pozos en estado utilizado, utilizable y en perforación, de ellos un total de 516 pozos en Ecuador y 872 pozos en Perú.
- De la totalidad de pozos inventariados, 1207 pozos eran para uso agrícola (373 en Ecuador y 834 en Perú), seguido de 99 pozos para uso industrial (93 pozos en Ecuador y 6 en Perú) y 63 pozos para uso poblacional (40 en Ecuador y 23 en Perú).

- En base al inventario de pozos realizado (setiembre-octubre 2019), se ha calculado que en Ecuador se usa 12.56 MMC de agua subterránea y en Perú 41.29 MMC, lo que totaliza 53.85 MMC de explotación del acuífero Zarumilla a través de pozos.
- Casi la totalidad de los pozos inventariados, sobre todo en los terrenos agrícolas, no muestran un adecuado diseño ni instalación, lo que perjudica en su rendimiento, debido a que durante la extracción de agua se produce el ingreso de materiales finos al interior del pozo a través de los filtros de aperturas muy grandes (hasta centimétricos) originando una colmatación (arenamiento) y su consecuente disminución de la profundidad del pozo. En el peor de los casos, hasta su pérdida total.
- Debido a la falta de información de la composición litológica de los pozos no es posible determinar con mayor exactitud ni el tipo ni espesor del acuífero existente; sin embargo, en base a experiencia en proyectos con condiciones similares, se interpreta la existencia de un acuífero libre, inclusive en la zona alta de la cuenca, compuesto por macizos rocosos levemente fracturados, los que podrían satisfacer las demandas de agua para la población urbana, rural y agrícola.
- Las dimensiones del acuífero Zarumilla fueron asumidas en base al área determinado en la Tesis del Sr. Coello (Coello-Rubio, Junio 2006), con un área total del 1090.98 Km^2 (109097.75 ha); a diferencia de la cuenca hidrográfica que tiene un área de 874.72 Km^2 (87472.31 ha).
- El nivel del agua subterránea (napa freática) en la parte intermedia y baja de la cuenca del territorio ecuatoriano fluctúan mayoritariamente entre 1 y 3 m bajo superficie, y en algunos sectores aproximadamente hasta los 10 m; y esporádicos pozos superan los 100 m. Lo mismo ocurre en territorio peruano, donde los niveles freáticos fluctúan mayoritariamente entre 2 y 6 m bajo superficie y en algunos sectores entre 30 y 40 m, con muy esporádicos pozos que superan los 80 m bajo superficie.
- En base a las limitadas pruebas de bombeo ejecutadas (solo en 10 pozos en toda la cuenca), se obtuvo una transmisividad (T) de $3.7x10^{-1}$ m^2/s hasta $8.2x10^{-5}$ m^2/s, y considerando un espesor del acuífero entre 30 a 160 m en promedio, se obtuvo una conductividad hidráulica (K) de $4.1x10^{-3}$ m/s a $8.2x10^{-7}$ m/, que indica que se trata de un ***Acuífero libre***. En la zona alta de la cuenca, también se interpreta la existencia de un acuífero, aunque a mayor profundidad y con un espesor bastante reducido. Asimismo, debido a la composición litológica del área, se tomó en consideración una relación directa de la disminución de la permeabilidad con la profundidad; es decir, a mayor profundidad mayor disminución de la permeabilidad, pasando paulatinamente de Acuitardos a Acuicludos.
- De acuerdo con los análisis químicos en laboratorio de las muestras de agua de los diez (10) pozos tubulares, algunos de ellos no cumplen más de un parámetro regulado en los lineamientos establecidos tanto por la normativa ecuatoriana como por la peruana, para consumo humano y para riego de vegetales. Estas aguas, casi en su totalidad pertenecen a la familia de las bicarbonatadas sódicas, seguidas de las cloruradas sódicas.
- Al comparar, referencialmente, los resultados de calidad de agua obtenidos en las 10 muestras de los pozos analizadas, se observa que 3 de estas (P.B Lechugal, P.B. Balsalito y P.B Papayal) superan el lineamiento de la OMS para coliformes fecales (1.8

NMP/100 ml), más restrictivo que los de la normativa peruana y ecuatoriana. Asimismo, se superó en 4 de 10 muestras el lineamiento del fósforo (P.B Tutumo, P.B. Noblecilla, P.B. Lechugal y P.B Balsalito) y en una de las 10 muestras el lineamiento para boro (P.B. Qda. Seca). Las concentraciones de sodio total superaron en 6 de 10 muestras (P.B Palmales, P.B. Qda. Seca, P.B. Chacras, P.B Papayal, AA.PP Zarumilla y AA.PP Huaquillas), parámetro solo regulado por la OMS basado en el sabor, y no en aspectos de salud.

- De acuerdo con los resultados del estudio y en base al caudal de explotación actual de los pozos, principalmente someros, no existe la posibilidad de sobre explotación del acuífero. Sin embargo, esto solo podrá ser determinado con mayor detalle cuando se realicen estudios hidrogeológicos más detallados y focalizados para cada sector o área de interés.

14.2 RECOMENDACIONES

- Es importante obtener más información litológica posible, o deducir mediante mapeo más detallado de la geología en el entorno de los pozos, para poder deducir con mayor precisión las probables litologías más importantes que influyan en la hidroquímica.
- Realizar los monitoreos de los niveles de agua subterránea de manera periódica (mensual, trimestral y semestral) en los pozos indicados en la Tabla 14-1; aunque en la actualidad existen instrumentos de medición automática (*transducer o datalogger*) que podrían programarse para toma de datos horarios o diarios, lo que ayudaría a tener una información precisa de las fluctuaciones de los niveles de agua en todos los pozos, sean someros o profundos.
- Realizar los monitoreos de control hidrogeoquímico; es decir, toma de muestras de agua subterránea para análisis químico en laboratorio de los pozos indicados en la Tablas 10-11, de manera mensual, trimestral y semestral.
- Los abundantes **Coliformes Fecales y Totales** en el pozo **Papayal** sugieren que se debe analizar en todos los pozos los Coliformes preferentemente por “Tubos Múltiples” en vez de “Filtración”.
- Se recomienda analizar el isótopo de $\delta^{37}Cl$ (‰ SMOC) en:
  - Aguas subterráneas con predominio de Cl^- lixiviado de materiales de construcción en Zarumilla,
  - El propio $CaCl_2$, del mayor fabricante y distribuidor de $CaCl_2$ y otros aditivos de construcción, ubicada en el Centro industrial "Las Praderas de *Lurín*", a 6 km al sureste del mismo pueblo, en la periferia sur de Lima metropolitana, y
  - Aguas subterráneas de recarga local, particularmente aguas antiguas saladas más equilibradas con la litología en sub e intercuencas costeras.

  Esto permitirá evaluar si existe diferencia suficiente en el sello isotópica entre Cl^- lixiviado de concreto y el de las aguas saladas de subcuencas e intercuencas costeras, con similar concentración de Cl^- y Na^+, además de la proporción de otros iones también similar al mar. Si hay suficiente diferencia isotópica, se podría usar el $\delta^{37}Cl$ para discriminar entre ambas fuentes, calcular mezclas y precisar en otras zonas la fuente de ingreso de $CaCl_2$ al acuífero.

Analizar los isótopos estables deuterio y oxigeno-18 (^{2}H-^{18}O) junto con los parámetros hidroquímicos, con la finalidad de determinar el origen de muchas aguas subterráneas y de sus solutos (naturales o antropogénicos), y en los pozos en las vegas de los ríos diferenciar entre filtración del río y agua subterránea proveniente del lado terrestre, y calcular la mezcla de ambos (Mallén G. G. S., 1998) (Mallén & Barba, 2017).

- Registros mensuales de ^{18}O-^{2}H en 2 estaciones meteorológicas – una en la costa y otra en la altitud más lluviosa – durante al menos 3 años permitirían cálculos estadísticos, como:
  - Variaciones estacionales,
  - Determinar promedios ponderados que deberían reflejarse en la recarga local,
  - precisar el gradiente vertical para aproximar la zona/ altitud de recarga de agua subterránea, y
  - Precisar la curva meteórica local (LMWL), probablemente casi idéntica a la curva meteórica global (GMWL).
- Realizar un estudio hidrogeológico más detallado en los sectores más críticos o de mayor necesidad, que las Autoridades gubernamentales (ANA o SENAGUA) consideren; que incluya estudios geofísicos con el método de tomografía eléctrica hasta una profundidad de 300 m.
- Considerar la perforación e instalación de pozos tubulares profundos en los sectores agrícolas, de aproximadamente 100 a 150 m de profundidad, en vez de pozos artesanales con anillos de concreto, con la finalidad de optimizar los usos del recurso hídrico y evitar la pérdida de los pozos por colmatación como actualmente vienen ocurriendo debido a una instalación de manera artesanal y sin una orientación técnica.
- En caso el costo de las perforaciones no sea asequible a los agricultores, se podría manejar una opción de agruparse entre 5 o más propietarios para financiar una sola perforación profunda. En base a las características hidráulicas encontradas, estos pozos podrían proporcionar agua con caudales en el rango de 30 a 40 l/s, lo que podría satisfacer las necesidades de los agricultores de manera sostenible. Usualmente este tipo de pozos pueden tener una vida útil mayor a los 20 o 30 años.

15 LINEAMIENTOS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL ACUÍFERO

- Como resultado del estudio hidrogeológico realizado, se ha identificado una demanda considerable de recursos hídricos en la Cuenca Zarumilla, sobre todo en la parte media y baja de la cuenca, donde se concentra la mayoría de los usuarios de agua, que extraen agua subterránea a través de pozos someros (menores a 30 m), mayormente construidos de manera artesanal y que tienen una vida útil muy reducida (solo algunos años) debido a la colmatación del pozo con materiales finos (arenamiento).
- Estas deficiencias en el uso del agua subterránea ocasionan pérdidas económicas al usuario debido al incremento de costos por el mantenimiento de los pozos y, en el peor de los casos, por la pérdida del pozo y su correspondiente reemplazo.
- Sin embargo, por las condiciones geológicas identificadas en estos sectores agrícolas, es posible extraer agua subterránea a mayores profundidades, para lo cual se requiere de estudios hidrogeológicos detallados que puedan identificar y evaluar las características hidrogeológicas de los potenciales acuíferos, que conlleve a la instalación de pozos tubulares para un uso sostenible a largo plazo.
- En este contexto, dada la demanda creciente de usuarios de agua, principalmente por el sector agroexportador, sería recomendable establecer políticas de los gobiernos locales y regionales enfocadas a establecer los estudios hidrogeológicos focalizados para la instalación de infraestructuras adecuadas.
- Una de las formas sería estimular el desarrollo de tecnologías y enfoques innovadores, esto es promoviendo el uso, por ejemplo, de pozos tubulares con bombas sumergibles activadas con energía renovable (paneles solares). Aunque los costos capitales iniciales podrían ser altos; sin embargo, el costo beneficio a largo plazo sería considerablemente mayor.
- Debido a los altos costos capitales iniciales, sería recomendable promover políticas de utilización de pozos tubulares a través de grupos de usuarios y no de manera individual. Es decir, para la instalación de un pozo tubular profundo.
- Los estudios hidrogeológicos podrían realizarse en coordinación y participación con algunas Universidades locales, nacionales o extranjeras, así como la participación de entidades gubernamentales (ANA, SENAGUA).
- Toda acción de investigación o estudio en la Cuenca Zarumilla deberá enfocarse en determinar el acuífero local y su capacidad para el abastecimiento de agua subterránea a los usuarios. Para tal efecto, se deberá desarrollar modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos, que ayuden a desarrollar modelos de optimización de gestión de uso de agua subterránea para los usuarios de riego y poblacional.

16 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agua de Tumbes. (2010). *Plan Maestro Optimizado de la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento Aguas de Tumbes S.A. para el periodo 2010-2039 .*
- Aguilar, L., & Marquinez, J. (2001). Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas, Área Chacras - Provincia de El Oro.
- Ambiente, M. d. (2014). *Plan de Manejo de la Reserva Ecológica Arenillas.* Quito, Ecuador.
- APHA. (2017). Standard Methods for Water and Waste Water.
- Arzate, J., & Corbo, F. (Mayo 2009). *Sondeos Magnetotelúricos de Espectro Amplio (AM/MT) para el Estudio del AcuÍfero Trans-Fronterizo de Zarumilla, Ecuador-Perú - FInanciado por OIEA, PEBPT y Aisitencia de PREDESUR.* Universidad Nacional Autonoma de México, Centro de Geociencias, Querétaro, México.
- Asociación INYPSA - ICA. (Febrero 2018). Estudio Hidrogeológico en las Cuencas Transfronterizas: Zarumilla, Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira - Informe Fase I: Cuenca Binacional Zarumilla, versión 2.1-Base de Datos Cartográfica.
- Blanquer, J. M. (2002). *Taxonomía de suelos.* Valencia, España: USDA-NRCS.
- CARE. (27 de Mayo de 2005). *Estudio Hidrológico de Caudales Máximos y Levantamiento de Información Ambiental de la Cuenca Zarumilla.* Quito, Ecuador. Obtenido de https://issuu.com/inamhi/docs/estudiozarumilla
- Changjian Institute Of Survey Planning, D. a. (2016). *Plan Nacional de la Gestión Integrada e integral de los Recursos Hídricos de las Cuencas y Microcuencas Hidrográficas de Ecuador.* Ecuador.
- CLIRSEN. (2009). *Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio y Valoración de Tierras Rurales de la Cuenca del Río Guayas.* Quito-Ecuador.
- Coello, e. a. (2006). *Caracterización Hidrológica e Isotópica del Acuífero Transfronterizo Zarumilla, Ecuador - Perú.*
- Coello-Rubio, X. (Junio 2006). Characterization of the Zarumilla Transboundary Aquifer Between Peru and Ecuador, UNESCO-IHE, OIEA - Tesis de Post Grado. Delft, Netherlands.
- CON&SOL. (2019). *Estudio Geofísico Mediante Sondajes Electricos Verticales - Informe Preliminar.* Ecuador - Perú.
- Consorcio UTPL - ADEPLAN. (Abril 2018). *Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica Transfronteriza del Rio Zarumilla - Informe Fase II: 5. Diagnóstico y Evaluación de los Recursos Hídricos.* Machala, Ecuador.
- Consorcio UTPL-ADEPLAN. (2018). *Plan de Gestión Integral de los Recursos Hídricos.* Ecuador.
- Córdova, M. (30 de 04 de 2016). *PRONTUBCAM*. Obtenido de https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26
- GIRHT. (2014). Geodatabase - Informe Final de Diagnostico Transfronterizo y Definición de Sitios Piloto.

- GIRHT. (2014). *Informe Final de Diagnostico Transfronterizo y Definicipon de Sitios Piloto - 2014.* Obtenido de http://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=113202
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Carcabón, Cantón Arenillas, Provincia del oro. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Carcabón 2015-2030.*
- Gobierno Regional de Tumbes. (Octubre, 2006). *Estudio de Diagnóstico y Zonificación para el Tratamiento de la Demarcación Territorial en la Provincia de Zarumilla.*
- GORE-Tumbes. (2006). *Estudio de Diagnóstico y Zonificación para el Tratamiento de la Demarcación Territorialde la Provincia de Zarumilla.* Tumbes: Gobierno Regional de Tumbes.
- GTME-MINAM. (2016). *Propuesta de definiciones conceptuales y sistematizaciónpara los ecosistemas identificados en la leyenda preliminar del Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú.* La Molina.
- INAMHI. (2011). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador.* Quito, Ecuador.
- INAMHI. (Agosto 2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador.* Quito, Ecuador.
- INAMHI. (Mayo 2011). *Estudio de Prospección Geofísica y Levantamiento Hidrogeológico en el Cantón Zapotillo - Provincia de Loja.*
- INDECI. (2008). *Estudios de Plan de Usos del Suelo Ante Desastres y Medidas de Mitigación - Zonas I y II.* Tumbes, Perú.
- INEI. (2018). *Censo Nacional: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas 2017 (Perú) - Resultados Definitivos.* Lima.
- Integrar Coninco Cía. Ltda. (Enero, 2015). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Arenillas.*
- Kovalevsky, V. S., Kruseman, G. P., & Rushton, K. R. (2004). *Groundwater studies - An international guide for hydrogeological investigations. International hydrological program IHP-VI: series on groundwater, 3.*
- Mallén G., G. S. (1998). Contribution from carbon and sulfur isotopes to the evaluation of biogeochemical processes in groundwater systems controlled by river bank filtration. - An example from the Torgau Aquifer (Saxony/Germany). En I. A. Agency, *Isotope: Techniques in the Study of Environmental Changes.* Vienna, Austria.
- Mallén G., T. R. (1998). *Isotope investigations to characterize redox processes during river bank filtration in river valley aquifers - Paradigma area Elbe river meadow at Torgau. – BMF Final Report 8 (subprojects 02 WT 9454/0 and 9456/5 within 02 WT 9454).*
- Mallén, G., & Barba, L. (2017). Datación de aguas subterráneas con Tritio (^{3}H) y curvas representativas para Chile y Perú. *El Ingeniero de Minas, 94*, 68-71.
- Mármol, L. (2008). *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes.* Salta, Argentina.
- Mendoza, Z. A. (2012). *Especies Forestales de los Bosques Secos.* Quito, Ecuador.

- MINAGRI - ANA. (Abril 2009). *Investigaciones Geofísicas con Fines Hidrogeológicos en Sectores de las Cuencas bajas de los Ríos Tumbes y Zarumilla.* Tumbes.
- MINAGRI - ANA. (Noviembre 2009). *Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Zarumilla.*
- MINAGRI - INRENA. (1980). *Inventario y Evaluación Nacional de las Fuentes de Aguas Subterráneas en el Valle de Zarumilla - Departamento de Tumbes.*
- MINAGRI - INRENA. (1997). *Estudio Puntual de Prospección Geofísica con Fines de Investigación en Varios Sectores de Zarumilla - Tumbes.*
- MINAGRI - INRENA. (Diciembre 2003). *Estudio Hidrogeológico del Valle Zarumilla.*
- MINAM. (2017). Modificación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y disposiciones complementarias para su aplicación, D.S. Nº 004-2017-MINAM,. *El Peruano, Normas Legales, p. 10-19;* . Lima, Lima, Perú.
- MINAM. (Diciembre, 2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal - Memoria Descriptiva.* Lima, Perú: © Ministerio del Ambiente. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *(**) Corredor de Protección del Canal Internacional de Zarumilla en el Sector Huaquillas - Aguas verdes, Fronteras para el Buen Vivir, 2015.*
- Nuñez, M. A. (2000). *Manual de Técnicas Agroecológicas.* México D.F, México.
- OIEA. (Abril, 2009). *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006.* Viena, Austria.
- Pacific Consultants International. (Octubre 2002). *Estudio de Prefactibilidad para Obras Hidrológicas del Rio Puyango Tumbes TC-99111581.*
- PHI LAC-UNESCO/ DDS-OEA. (2007). *Sistemas acuíferos Transfronterizos en las Américas – Evaluación Preliminar.* Montevideo / Washington DC.
- Secretaría del Agua, Dirección de Gestión de Calidad del Agua - Gobierno de Ecuador. (2016). *Resumen de Monitoreo de Calidad del Agua de la Cuenca Binacional Zarumilla 2016.*
- SENAGUA, - UICN Sur. (2009). *Infrome del Mapa de delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador - Escala 1:250 000 - Nivel 5, Metodología Pfafstetter.* Quito.
- SENAGUA, - UICN Sur. (2009). *Mapa de delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador.* Quito.
- SENAMHI. (2016). *Modelamiento Hidrológico del RIo Zarumilla.* LIma.
- SERNANP. (2013). *Áreas de Conservación Regional.* Lima.
- SERNANP. (16 de Junio de 2020). *SERNANP*. Obtenido de https://www.sernanp.gob.pe/los-manglares-de-tumbes
- Solari, G. (2015). *Infobosques*. Obtenido de http://infobosques.com/portal/infobosques/clasificacion-de-bosques/
- Unidos, D. d. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos.* Montecillo, Mexico.

- USEPA. (2016). Guía Funcional Nacional del Programa de Contratación de Laboratorio para la Revisión de Datos Inorgánicos.
- Valdor Sudamerica SAC. (2019). *Reporte Geofísico Electromagnético - Estudio Hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Zarumilla (PNUD).* Ecuador - Perú.
- Varios. (2010). Ambientes depositacionales del Plioceno y Pleistoceno en la quebrada la Cruz y alrededores, Tumbes. *Resúmenes Extendidos del XV Congreso Peruano de Geología*, 420-423.
- WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality. – 4th ed., 564 p., Geneva. 2011.* Obtenido de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf