



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**"MODELO GEOMÉTRICO DEL ACUÍFERO COSTERO DE
MANGLARALTO Y SU INCIDENCIA EN EL
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DEL AGUA, SANTA
ELENA-ECUADOR "**

PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERA EN GEOLOGÍA

Presentado por:

Ximena Yomira Quiñonez Barzola

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

Dedicatoria

Quiero dedicar este logro a los pilares de mi vida, mis madres: Laura Barzola, Cruz Sánchez y Maricela Barzola por enseñarme acerca de la constancia y perseverancia. A mi hermana Isabel Tejena por darme fortaleza. A mi padre sustituto Walter Tejena por todo su cariño. A mi familia entera. Quiero dedicarla de manera especial a mi padre David Barzola, que no alcanzó a ver el fruto de su esfuerzo porque partió antes, pero me enseñó como el amor puede hacerte una gran persona.

Este logro lo comparto con mi esposo César Toala Chancay y mi hija Aurora, ustedes son el lugar al que siempre quiero llegar. Su amor me da fortaleza.

Dedico este logro a todos quiénes de una forma u otra me ayudaron a llegar al final de esta meta y a quienes están empezando este arduo camino y piensan que no van a terminar.

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por darme la fortaleza y la capacidad para poder culminar este proyecto de vida. Sin él, nada soy.

Quiero agradecer profundamente a mis profesores, el Dr. Paúl Carrión y el Dr. Javier Montalván por su paciencia y sus enseñanzas sobre la carrera y la vida. A la Msc. Eva Rivas Pozo por su infinita paciencia y tenacidad para no dejarme desistir. Al Dr. Miguel Chávez por aceptar ser mi tutor. Y en general a todos aquellos de quienes un día aprende algo.

Quiero agradecer a mis amigos Koraima Zambrano y Roberth Pineda por su amistad y su ayuda. A todos mis amigos cercanos, en especial a mis futuros colegas por compartir conmigo tantas experiencias. A mis amigos de CIPAT por su apoyo y los del proyecto comunitario 2019 en Manglaralto. Como olvidar a mis amigos de la JAAPMAN. A todos gracias.

Agradezco al Sr. César Toala, y la Sra. Soledad Chancay por todo el apoyo y el amor hacia mi hija. En general a todos los que forman parte de mi núcleo familiar.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Ximena Quiñonez Barzola* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Ximena Quiñonez Barzola

EVALUADORES

.....
Ing. Eva Rivas, MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Miguel Ángel Chávez, PhD.

PROFESOR TUTOR

.....
Ing. Paúl Carrión Mero, PhD.

PROFESOR CO-TUTOR

RESUMEN

La parroquia rural Manglaralto presenta escasez de agua debido a que se encuentra en una zona semiárida y a la alta demanda del suministro. Esto ha llevado a la comunidad a crear una Junta de agua (JAAPMAN) que se encarga de proveer el suministro de agua, aprovechando el acuífero del río Manglaralto. Sin embargo, debido al aumento en la demanda, el acuífero ha visto comprometido su equilibrio natural. Por esto, se tiene como objetivo establecer un modelo geométrico del acuífero mediante análisis geológico y geofísico para la configuración de lineamientos de aprovechamiento sostenible del agua. La metodología consta de cuatro fases. En la fase uno se analizó y se procesó información topográfica, geológica, hidrogeológica. La segunda fase consistió en un reconocimiento de campo y campañas geofísicas. La tercera fase es la correlación de la información geológica y geofísica mediante el procesamiento de datos en el programa Geomodeller®. Esto resulta en el modelo geométrico del acuífero y un cálculo estimado del volumen. Finalmente, en la fase cuatro se analizaron los resultados para recomendar propuestas de aprovechamiento sostenible. Del modelo se obtuvo que hacia la desembocadura al mar el acuífero tiene espesores más potentes; en contraste, hacia las zonas altas de la cordillera Chongón-Colonche es más fino. Además, es más ancho hacia la orilla sur del río, esto podría deberse al cambio del meandro. Se estimó el volumen del acuífero en $13'596.000\ m^3$ que, según proyecciones del consumo de agua, podría abastecer a la población. Se concluye que el acuífero depende de la estación ya que según el modelo en la estación húmeda el volumen de agua aumenta. El aumento también es a causa del funcionamiento de diques. Mediante las campañas geofísicas se pudo identificar las zonas porosas y permeables que conforman el acuífero y conocer sus límites. Se brindó propuestas de aprovechamiento como: mejorar la distribución de los pozos, reciclar el agua mediante pretratamientos y correlacionar el modelo geométrico, las zonas vulnerables y las zonas óptimas para construir diques y mejorar el sistema de recarga.

Palabras Clave: Acuífero costero, modelo geométrico, volumen de agua, aprovechamiento sostenible.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1.....	10
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Descripción del problema	12
1.2 Justificación del problema.....	13
1.3 Delimitación de la zona de estudio	14
1.4 Estudios Anteriores.....	18
1.4.1 Volumen	18
1.4.2 Modelo	18
1.5 Objetivos.....	19
1.5.1 Objetivo General	19
1.5.2 Objetivos Específicos	20
1.6 Metodología de la investigación.....	20
CAPÍTULO 2.....	23
2. MARCO TEÓRICO	23
2.1 Definiciones conceptuales	23
2.1.1 Red hidrográfica	23
2.1.2 Hidrogeología	24

2.2	Estado del arte.....	28
2.2.1	Estudios Anteriores	28
2.2.2	Descripción Geológica	29
2.2.3	Hidrometeorología.....	35
2.2.4	Red Hidrográfica	37
2.2.5	Hidrogeología.....	38
2.3	Demanda de agua	43
2.3.1	Suministro de agua	43
CAPÍTULO 3.....		47
3.	METODOLOGÍA	47
3.1	RECONOCIMIENTO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN 47	
3.1.1	CAMPAÑAS GEOELÉCTRICAS.....	48
3.2	PROCESAMIENTO DE DATOS	51
3.2.1	Sondeos Eléctricos Verticales.....	51
3.3	Modelamiento del acuífero.....	56
CAPÍTULO 4.....		59
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
4.1	Modelo geométrico	59
4.2	Volumen estimado mediante el modelo	67
1.1	Volumen de extracción	69
1.2	Aprovechamiento sostenible.....	70
CAPÍTULO 5.....		72
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
	Conclusiones	72
	Recomendaciones	73

BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXOS.....	79

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
JAAPMAN	Junta Administradora de Agua Potable Regional de Manglaralto
CIPAT	Centro de Investigaciones Proyectos Aplicados a Ciencias de la Tierra
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censo
SIG	Sistema de Información Geográfica
SEV	Sondeos Eléctricos Verticales
PSE	Provincia de Santa Elena
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrogeología

SIMBOLOGÍA

Km	Kilómetro
m	Metro
mm	Milímetro
m ³	Metro cúbico
m/s	Metro por segundo
°C	grados centígrados
ohm (Ω)	Ohmio
N, S, E, W	Puntos cardinales

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Distribución de agua en el planeta Tierra. Fuente: Centro Virtual de Información del Agua, 2017.	10
Figura 2.1 Circulación del agua subterránea. Fuente: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), 2001.	24
Figura 2.2 Distribución vertical del agua. Fuente: (Collazo & Montaña, 2012) Manual de agua subterránea. Montevideo.	25
Figura 2.3 Acuífero libre, confinado y semiconfinado. Fuente: IGME, 2008. Capítulo 2. Libro 8. http://aguas.igme.es	26
Figura 2.4 Acuífero fisurado y acuífero poroso. Fuente: (Collazo & Montaña, 2012). Manual de agua subterránea. Montevideo.....	27
Figura 2.5 Intrusión salina debido a explotación intensa de agua. Fuente: Pérez, A. PPT Aguas Subterráneas. Universidad Autónoma Metropolitana. México D. F.	27
Figura 2.6 Perfil O-E de la cuenca Manglaralto. Fuente: (CIPAT-ESPOL, 2015)	30
Figura 2.7 Bioestratigrafía y paleoambiente del Grupo Ancón y Grupo Azúcar. Fuente: Ordoñez et al, 2006	31
Figura 2.8 Mapa de las formaciones geológicas de la cuenca del río Manglaralto. Fuente: Merino, 2014.....	33
Figura 3.1 Zonas montañosas de Manglaralto. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.	47
Figura 3.2 Zonas boscosas de Manglaralto. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.	47
Figura 3.3 Dique técnico artesanal ubicado cerca del pozo 1. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.....	48
Figura 3.4 Arreglo de los materiales usados en los SEV. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.....	49
Figura 3.5 Conexión de electrodos con lagartos para la toma de datos. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.	50
Figura 3.6 Curva de ajustes de valores realizada con ipi2win con datos del SEV 1. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.	52
Figura 3.7 Tabla de resultados del sondeo 1 obtenida con ipi2win. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.....	53

Figura 3.8 Esquema de la creación de un modelo en Geomodeller.	55
Figura 3.9 Creación de un proyecto en Geomodeller.	56
Figura 3.10 Pasos para la importación de sondeos.	57
Figura 3.11 Importación de imagen en Geomodeller.....	58
Figura 3.12 Importación de contactos geológicos.....	58
Figura 4.1 Relación entre las unidades hidrogeológicas.....	63
Figura 4.2 Vista hacia el mar del acuífero.....	64
Figura 4.3 Vista Lateral Este-Oeste.....	65
Figura 4.4 Vista parcial Este-Oeste.	66
Figura 4.5 Volumen bruto de las unidades modeladas. Fuente: Quiñonez, 2019.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Población aproximada de comunas adscritas a la Junta de Agua Potable Regional de Manglaralto. Fuente: Herrera, G. 2015.....	13
Tabla 2.1 Sistema Hidrográfico Zapotal dividido en cuencas y subcuencas. Fuente: División Hidrográfica del Ecuador. Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002....	29
Tabla 2.2 Datos del acuífero costero del río Manglaralto. Elaboración: Propia.....	35
Tabla 2.3 Espesores de la unidad semiconfinante y unidad acuífera respecto a la cuenca. Modificado de Merino, 2014.....	36
Tabla 3.1. Materiales utilizados en los SEV.....	45

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta está compuesto de tres cuartas partes (3/4) de agua. Sin embargo, aunque puede sonar abundante, no toda esta agua está disponible para consumo humano ya que la mayoría de esa proporción es agua salada. Del agua dulce disponible, aproximadamente el 1% corresponde al agua superficial y 30% al agua subterránea. (Véase figura 1.1)

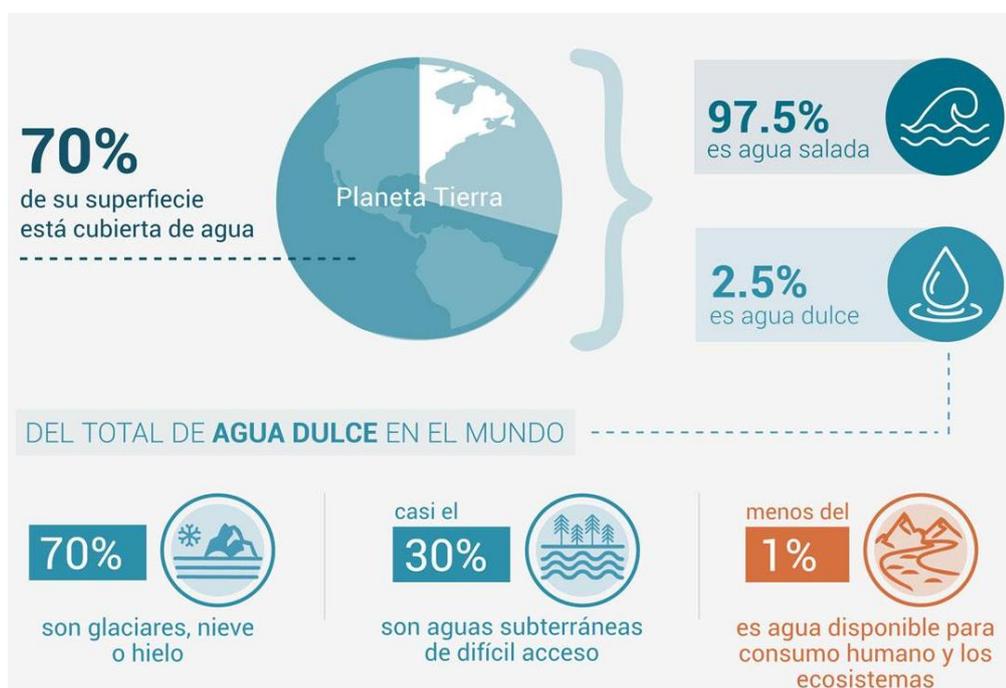


Figura 1.1 Distribución de agua en el planeta Tierra. Fuente: Centro Virtual de Información del Agua, 2017.

Debido a que existe un mayor porcentaje de aguas subterráneas, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura en inglés Food and Agriculture Alimentation of United States, FAO (2010), aproximadamente el 50% de la población mundial se abastece de agua potable a través de estas.

Sin embargo, en Ecuador, el abastecimiento de agua es mayoritariamente por aguas superficiales debido a sus buenas condiciones climáticas. Según el Instituto Nacional de Energía y Recursos Hídricos, INERHI en 1989 en su Plan Hidráulico, la

disposición del agua superficial varía en un promedio de 430.000 Hm³ durante las épocas de lluvia, y 146.000 Hm³ en las épocas más secas del año. Estos promedios abastecerían a todas las regiones, pero el agua no está distribuida homogéneamente desde el punto de vista espacial.

Según Galárraga-Sánchez (2000), el 14% de esta agua se distribuye en la costa donde además reside el 80% de la población. En contraste, la Amazonía cuenta con el 86% del agua y solo reside el 20% de la población.

Además, la costa cuenta con una de las zonas más áridas del Ecuador, la provincia de Santa Elena, cuya precipitación anual según Cornejo (2006), está entre 200 a 300mm. Su aridez sumada a la alta demanda poblacional ha provocado déficit del suministro de agua especialmente en las zonas rurales.

Algunas de estas zonas rurales, viéndose beneficiadas por zonas acuíferas, han creado juntas de agua que extraen el suministro a través de pozos. Los acuíferos son capas del subsuelo capaces de almacenar agua y dejarla fluir entre sus poros. Para ello Cabe destacar que según ESPOL TECH & CIPAT, (2014) en la Costa se distribuye el 50% de la extracción de agua por pozos.

Una de estas juntas es, la Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), que se encuentra extrayendo agua del acuífero del río Manglaralto desde 1979. Es en este acuífero donde se centra este estudio. Ya que debido a la alta demanda por parte de las siete comunas que suministra la junta, más población turística, se ha visto afectado el equilibrio natural de la cuenca hidrográfica. En afán de mejorar el aprovechamiento del acuífero, el estudio se basa en conocer el modelo geométrico del mismo.

1.1 Descripción del problema

En la provincia de Santa Elena, la encargada del abastecimiento del agua es la empresa pública municipal mancomunada (AGUAPEN-EP). Pero, debido al incremento exponencial en la demanda y el carácter limitado del agua, presenta deficiencias de cobertura. La empresa suministra agua a los cantones: La Libertad, Santa Elena y Salinas, pero sus redes de distribución no cubren gran parte de las zonas rurales. Entre estas, las comunas, que deben recurrir a otras fuentes, convirtiéndose las aguas subterráneas en estratégicas.

Las comunas cubrían, parcialmente, su suministro de agua por medio de tanqueros que repartían agua a los sectores desabastecidos. Pero, las tarifas eran altas y había desabastecimiento durante las épocas de mayores tasas de turismo. Otra solución, es el suministro directo del río, pero esto sólo es viable en época húmeda donde el cauce tiene caudal. Esta condición dura tres meses, más dos meses como riachuelo debido al agua filtrada por las lluvias; los 7 meses restantes el río no tiene caudal. También, existen pozos excavados de forma artesanal que se rellenan de agua proveniente del subsuelo, pero muchas veces se encuentran distantes a los hogares. Es así, que la gestión más sólida, la ofrecen las juntas de agua. Estas captan agua desde el subsuelo por medio de pozos controlados, la potabilizan y la distribuyen hacia los sectores aledaños, convirtiéndose en la red pública de agua de las zonas rurales desabastecidas.

La JAAPMAN se encarga de gestionar la obtención y suministro del agua desde el acuífero del río Manglaralto desde hace 40 años. Esto, mediante 13 pozos distribuidos en la parte sur del río. Pero, al ser mayor la fuente de consumo y debido al aumento en la demanda, se han dado problemas de sobreexplotación del acuífero.

Es por esto por lo que, un estudio en la zona para conocer de mejor forma el acuífero se muestra viable. Para ello, se requiere saber si ¿es posible delimitar los horizontes de un acuífero mediante datos geológicos, topográficos y geofísicos para realizar su modelo geométrico? ¿es posible calcular el volumen aproximado

de agua de un acuífero mediante su modelo geométrico para proponer recomendaciones sobre su aprovechamiento sostenible?

1.2 Justificación del problema

La JAAPMAN es administradora comunitaria del agua, es decir, cobra el servicio para llevar el agua a cada hogar, por lo que el abastecimiento de agua a los hogares, restaurantes, hoteles, hostales y demás negocios ligados al sector turístico se convierten en un émbolo comercial, que dinamiza, el comercio y la economía del agua ligada al turismo en la parroquia Manglaralto. La junta suministra agua a siete comunas en constante crecimiento: Montañita, Nueva Montañita, Manglaralto, Río Chico, Cadeate, San Antonio y Libertador Bolívar (véase tabla 1.1). Además de abastecer al 51% de la parroquia Manglaralto, debe abastecer a la población flotante que aumenta especialmente en época de playa en Montañita y Olón.

Tabla 1.1 Población aproximada de comunas adscritas a la Junta de Agua Potable Regional de Manglaralto. Fuente: Herrera, G. 2015.

COMUNAS	2005	2010	2015
Montañita y Nueva Montañita	556	4.887	6.554
Manglaralto	655	5.760	7.225
Río Chico	42	367	492
Cadeate	201	1.765	2.367
San Antonio	220	1.936	2.596
Libertador Bolívar	327	2.872	3.852
TOTAL	2.000	17.587	23.586

Esta necesidad creciente del suministro de agua alrededor de la población local y flotante produce sobreexplotación del acuífero. Esto se traduce en un descenso del nivel de agua porque se extrae más de la que se recarga. Una de las soluciones a este problema, es recargar el acuífero, ya sea mediante la infiltración

de agua por precipitación o artificialmente, por medio de diques. Pero, debido a la localización del acuífero en una zona árida, el régimen de recarga por lluvia es deficiente. Y, para optimizar el método de recarga por diques, es necesario conocer la geometría del acuífero.

Se debe controlar el descenso del nivel freático, ya que debido a que el acuífero está ubicado en la costa (acuífero costero), es propenso a la intrusión de agua de mar. Esta intrusión salina, provoca la contaminación del agua dulce subterránea, volviéndola no apta para consumo.

Este descenso en el nivel freático, además, afecta al río Manglaralto, ya que es la fuente de alimentación del acuífero. Y, de haber sobreexplotación, se afecta el equilibrio del ecosistema del río.

Así, la JAAPMAN está obligada a regular su actividad extractiva. Siguiendo a la Constitución (2008) en su Sección Sexta, artículo 411 se detalla que “se debe regular toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua”.

Por ello, obtener un modelo geométrico del acuífero mediante datos geológicos, topográficos y geofísicos se muestra relevante. Ya que, el cálculo estimado del volumen de agua y su análisis, podrían ayudar en la propuesta de recomendaciones para el máximo aprovechamiento sostenible del acuífero.

1.3 Delimitación de la zona de estudio

La provincia de Santa Elena se ubica en la región litoral del Ecuador y acoge al cantón Santa Elena, donde al norte se ubica la parroquia rural Manglaralto. Esta se divide en comunas que se mencionan de norte a sur en la tabla 1.2. Véase figura 1. 2

Tabla 1.2 Esquema de la división política de la PSE referente a la parroquia Manglaralto.

Provincia	Cantones	Parroquias		Comunas
		Urbanas	Rurales	
Santa Elena	St. Elena (cabecera cantonal)	St. Elena	Manglaralto	La entrada
				San Francisco de las Núñez
				San José
				Curia
				Olón
				Montañita
				Dos mangas
				Pajiza
				Manglaralto
				Río Chico
				Cadeate
				San Antonio
				Libertador Bolívar
				Sitio Nuevo
				Valdivia
				San Pedro
	Sinchal-Barcelona			
	Colonche			
	Chanduy			
	Atahualpa			
	Simón Bolívar			
	San José de Ancón			
	La Libertad			
	Salinas			

La parroquia Manglaralto, pertenece al área rural y según el INEC en el censo 2010, cuenta con una extensión de 497.4 km², es decir, 13,21% del territorio de la PSE, y una población de 29.512 habitantes (9,58% de la PSE).

Mapa de Ubicación de la Parroquia Manglaralto

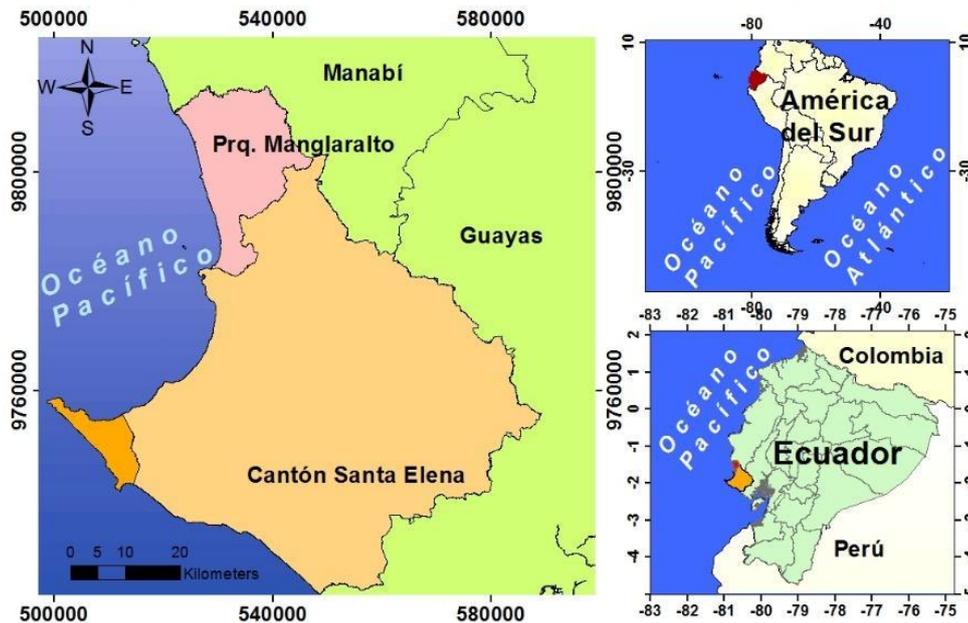


Figura 1.2 Mapa de ubicación de la parroquia Manglaralto.

Esta parroquia se divide geográficamente en dos sectores: el borde costero y la zona interna en donde se encuentra el Bosque Protector Chongón-Colonche que cubre aproximadamente el 40% del territorio. (GAD Parroquia Manglaralto, 2015). Según su hidrografía, se localiza en las cuencas de los ríos: Olón (Ayampe), Manglaralto y Valdivia.

Dentro de cada cuenca existe un acuífero administrado por una Junta de agua, que distribuyen agua a las comunas de la parroquia. Estas son: Junta Administradora de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), Junta Regional de Agua de Olón (JRAO) y la Junta de Agua Regional de Valdivia (JARV), que extraen agua de los acuíferos de los ríos Manglaralto, Olón y Valdivia, respectivamente. Véase figura 1.3.



Figura 1.3 Mapa de ubicación de los acuiferos de la parroquia Manglaralto. Fuente: CIPAT-SENAGUA-AECID, 2014. Obtenido de Valencia, 2017.

Sin embargo, en el presente estudio la zona de interés es la cuenca del Río Manglaralto. (Véase figura 1.4) De forma más precisa, el acuífero presente en esta cuenca.

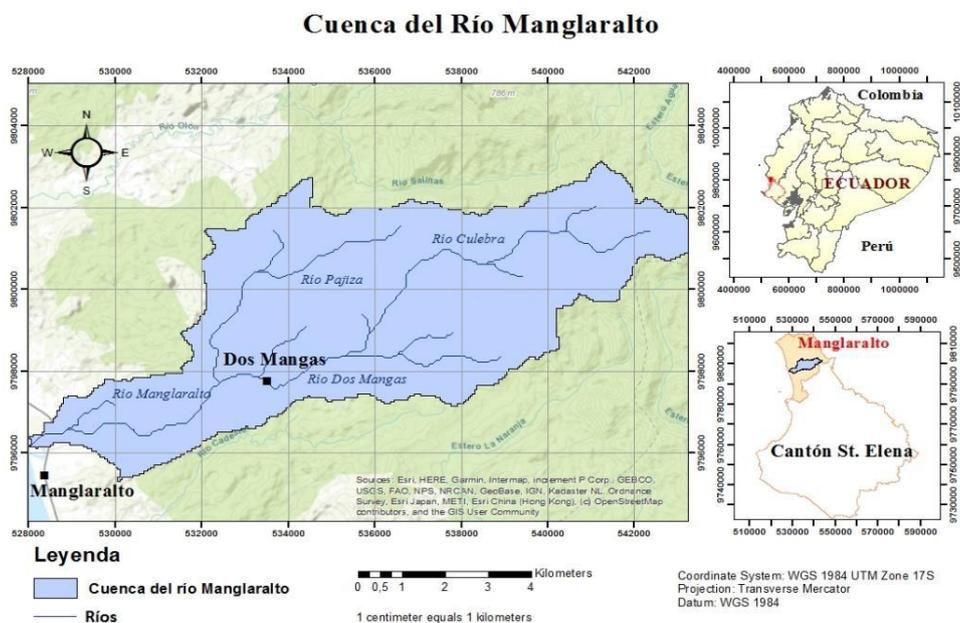


Figura 1.4 Mapa de ubicación de la cuenca del Río Manglaralto.

1.4 Estudios Anteriores

En este apartado, se muestran los estudios que presentan contextos similares respecto a la problemática. Se los ha dividido en dos partes para comprender el contexto del proyecto: aquellos que indican como podríamos calcular el volumen de agua del acuífero y en aquellos que indican la metodología para crear un modelo 3D.

1.4.1 Volumen

Hernández, M. et al en su estudio *“Aproximación de volúmenes de agua subterránea disponibles para riego en las cuencas de los ríos Areco y Arrecifes (Buenos Aires)”* fijan un caudal de explotación sustentable mediante un balance hídrico para aproximar la infiltración y el cálculo de reservas mediante mapas piezométrico e isopáquico.

Manzano, M. (2008) en su informe *“Cuantificación de las Reservas de Agua Subterránea en un Acuífero Mediante Métodos Geométricos”* cuantifica el volumen de terreno saturado en un acuífero de geometría tipo sinclinal mediante métodos gráficos. Para ello, usa mapas de isohipsas (cotas absolutas) de base-techo y espesores del estrato saturado.

Rueda, R y Hernández, L. (2010) en su estudio *“Determinación de las Reservas Hídricas Subterráneas de los Acuíferos Barrancones y Voltes (Alicante)”* analizan varios métodos para comprender el comportamiento de los acuíferos. Para ello, recomiendan la modelación del flujo subterráneo en régimen transitorio, ya que permite analizar las reservas en diferentes situaciones.

1.4.2 Modelo

Bacca et al (2010) en su artículo *“Determinación de la geometría del Acuífero de Morrosquillo y geología detallada del Acuífero de Tolviejo, Sucre”* modelaron los acuíferos del noroccidente colombiano mediante cartografía geológica detallada, resistividad eléctrica, líneas sísmicas y datos de perforación. Usaron 28 sondeos eléctricos y secuencias estratigráficas.

Moral et al (2013) en su estudio “*Modelo Geológico 3D del Acuífero de Mediodía y Evaluación de sus Reservas Totales de Agua Subterránea*” evaluaron el volumen de agua y establecieron relaciones geométricas del acuífero libre español, mediante datos geofísicos, 7 columnas litológicas e información estructural, procesados con los softwares **Geomodeller® y Gocad®**.

Lechado et al (2013) en su estudio “*Modelo Geológico 3D Del Acuífero De Carrascal-Ferrer y Evaluación de sus Reservas Totales de Agua Subterránea*” analizan el volumen de agua y la relación geométrica del acuífero confinado al 75%, mediante datos geofísicos como perfiles sísmicos, 28 columnas litológicas y abundante información estructural procesados con los **softwares Geomodeller® y Gocad®**.

Lechado, C. et al. SIAGA (2018) en su artículo “*El Modelo Geológico 3D del Acuífero de la Loma De Úbeda*” muestra la geometría tabular del acuífero. El modelo se obtuvo a partir de 188 medidas estructurales, la interpretación de 26 perfiles sísmicos y la información litológica de 195 sondeos; analizados en los programas Geographix, Gocad y GeoModeller.

Calcagno, P. et al (2007) en su estudio “*Geological modelling from field data and geological knowledge, Part I – Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules*” explica la combinación de campos con reglas geológicas. Con esto obtienen la geometría de un cuerpo geológico mediante datos estructurales y de campo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Establecer un modelo geométrico del acuífero de Manglaralto mediante análisis geológico-geofísico para la configuración de lineamientos de aprovechamiento sostenible del agua.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar la información geológica-geofísica mediante revisión de publicaciones y visitas de campo para la obtención de un modelo referencial.
- Realizar campañas geoelectricas mediante Sondeos Eléctricos Verticales para la delimitación de los horizontes del acuífero.
- Correlacionar los datos bibliográficos y los datos obtenidos de campo mediante un SIG para la deducción de un modelo geométrico del acuífero.
- Proponer recomendaciones para el aprovechamiento sostenible del agua mediante el análisis del cálculo estimado del volumen de agua del acuífero.

1.6 Metodología de la investigación

La Junta Administradora de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN) es la encargada de suministrar agua en Montañita, Manglaralto, Río Chico, Cadeate, Libertador Bolívar y San Antonio, lugares potencialmente turísticos, por ello, requieren conocer el máximo aprovechamiento de su fuente de agua que es el acuífero. Se entrega como resultado el modelo geométrico del acuífero; para poder calcular las reservas de agua y dar recomendaciones para su aprovechamiento sostenible. Esto podría ayudar a la comunidad a conocer sus posibilidades en cuánto a la futura gestión del acuífero.

Para ello, se utilizó la metodología resumida en la figura 1.5, que sigue cuatro fases descritas a continuación en el texto:

Fase I

Obtención de datos bibliográficos e información geológica de la zona; tales como: estudios anteriores, geología, topografía, red hidrográfica, hidrometeorología y los estudios geofísicos previos de Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografías. Cabe destacar que, la información se presenta en mapas para facilitar la interpretación. Y, que la geofísica previa, solo había sido realizada en la parte sur del río Manglaralto.

Fase II

Se basa en el trabajo de campo y el procesamiento de los datos. El trabajo de campo busca cubrir las deficiencias de información, mediante visitas de campo y geofísica (Sondeos Eléctricos Verticales), en la parte norte del río Manglaralto y en la parte sur. Una vez obtenida toda la información de la zona, se correlacionaron los datos geológicos y geofísicos, y se procesó la información en el programa GeoModeller.

Se escogió el programa GeoModeller, debido a que otros programas de modelamiento, tales como, Leapfrog o ArcGis tienen costos elevados de licencia. Sin embargo, GeoModeller concedió al proyecto dos meses de licencia gratuita para su realización. Además, cuenta con tutoriales en línea sobre el uso del programa, algo muy útil debido al poco tiempo que se disponía. Se revisaron otros programas de licencia abierta pero el resultado final no era satisfactorio en la parte visual.

Fase III

En esta fase se analizó los datos de volumen de agua. Para ello, se comparó el volumen estimado de agua obtenido del modelo geométrico del acuífero con el volumen de agua que se infiltra y recarga el acuífero y el volumen de agua que se extrae mediante bombeo de los pozos. Con esto, se obtuvo el volumen estimado de agua que se puede aprovechar del acuífero de forma sostenible.

Fase IV

En esta fase se muestra una síntesis de la ejecución de los objetivos, mediante conclusiones y recomendaciones, acerca del método y el aprovechamiento sostenible del agua.

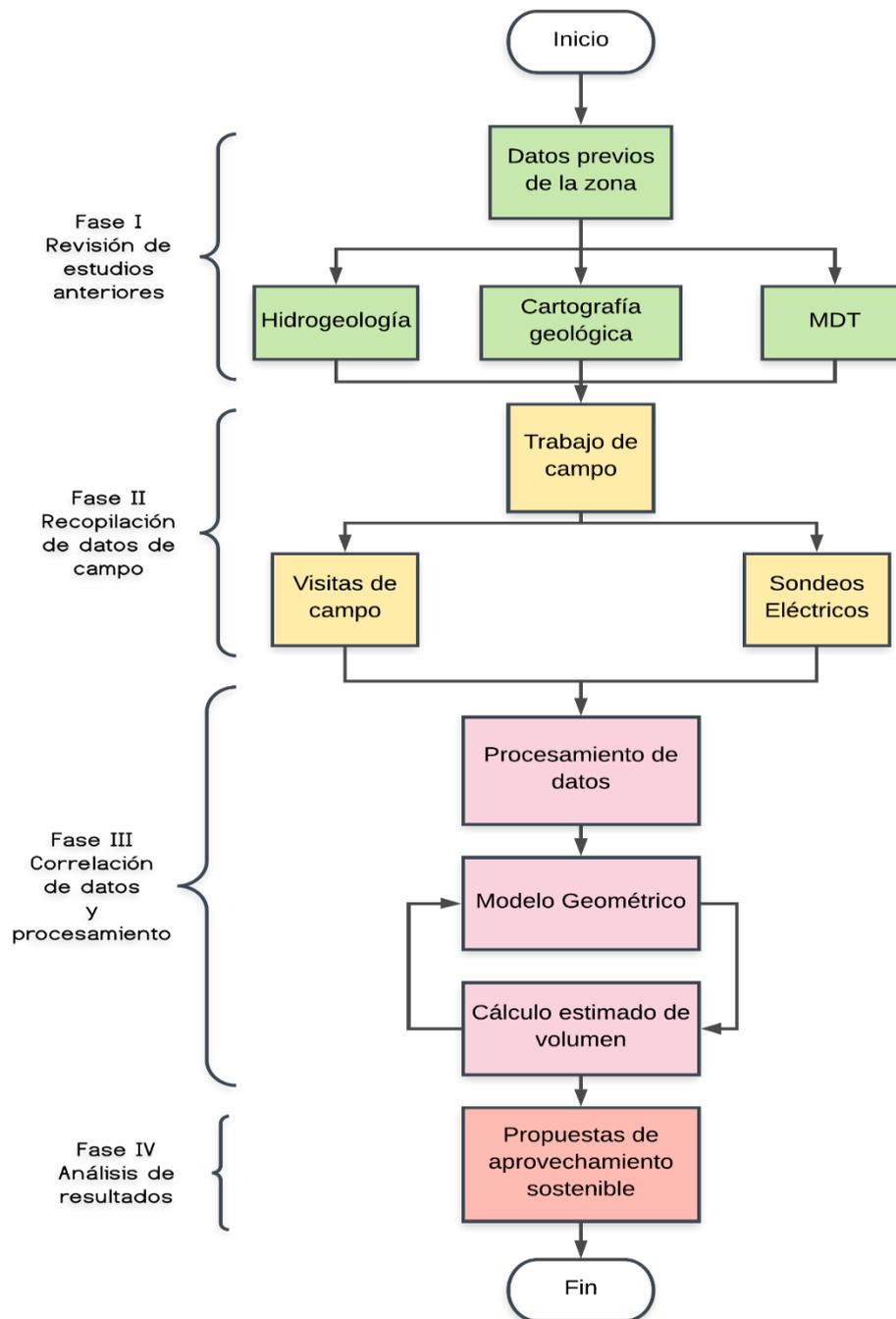


Figura 1.5 Esquema de la metodología de investigación.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Definiciones conceptuales

2.1.1 Red hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial en la que el agua que cae por precipitación se agrupa y escurre a un punto común. Es una zona de convivencia entre animales, plantas y personas. (Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002) A su vez, un Sistema Hidrográfico es el conjunto de cuencas que desembocan en un punto común.

La provincia de Santa Elena (PSE) está conformada por el sistema hidrográfico Zapotal que cubre todo su territorio y drena 5738 km² a la vertiente del Pacífico. El Sistema Hidrográfico Zapotal está formado por 9 cuencas hidrográficas Y 9 subcuencas. Véase tabla 2.1

Tabla 2.1 Sistema Hidrográfico Zapotal dividido en cuencas y subcuencas. Fuente: División Hidrográfica del Ecuador. Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002.

Sistema Hidrográfico	Cuencas	Área de drenaje (Km ²)	Subcuencas
Zapotal	Río Manglaralto	132	Río Manglaralto
	Río Valdivia	165	Río Valdivia
	Río Viejo	141	Río Viejo
	Río Javita	813	Río Javita
	Río Grande	260	Río Grande
	Río Salado	341	Río Salado
	Río La Seca	93	Río La Seca
	Río Zapotal	1035	Río Zapotal
	Estero del Morro	829	Estero del Morro
	Río Daular	1336	Río Daular
Río Chongón	593	Río Chongón	

Las cuencas hidrográficas según su vertido son de tres tipos: exorreicas cuando vierten al mar, endorreicas cuando no vierte en el mar y arreicas cuando sus aguas se evaporan o se infiltran en el suelo.

2.1.2 Hidrogeología

La UNESCO (2002) en su glosario de hidrología define a la cuenca hidrogeológica como una unidad fisiográfica en la que se localiza un gran acuífero o varios interconectados, cuyas aguas fluyen a un desagüe común, cuyo límite son las divisorias de aguas subterráneas.

El agua subterránea es aquella que se infiltra en el subsuelo proveniente de las precipitaciones o zonas de aguas superficial como ríos o lagos. Otro tipo de recarga de agua en el subsuelo es la recarga artificial, dada por el exceso de riego, filtración de canales y la inyección directa de agua para recargar el acuífero. Véase figura 2.1

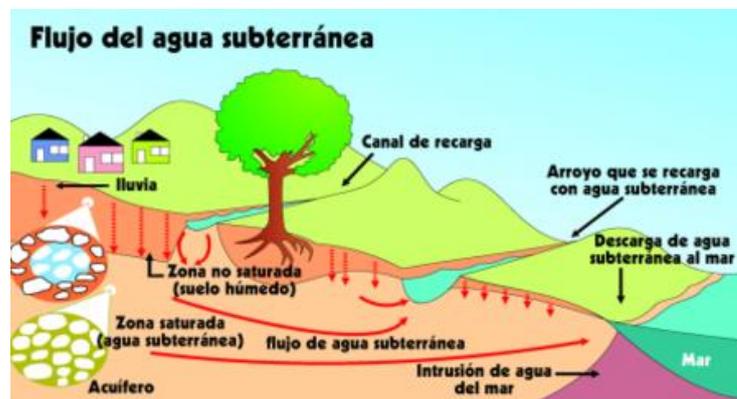


Figura 2.1 Circulación del agua subterránea. Fuente: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), 2001.

El agua en el subsuelo se clasifica en dos zonas: zona saturada cuando el agua rellena los poros vacíos del estrato geológico permeable y zona no saturada o de aireación donde los poros se llenan de agua y aire. La zona no saturada comprende tres franjas: una zona de evapotranspiración donde existe abundancia de materia orgánica y actividad biológica, la zona intermedia donde existe

aireación y capilaridad del agua, y la zona capilar que comprende el límite de tránsito de agua hasta el nivel freático. Véase figura 2.2

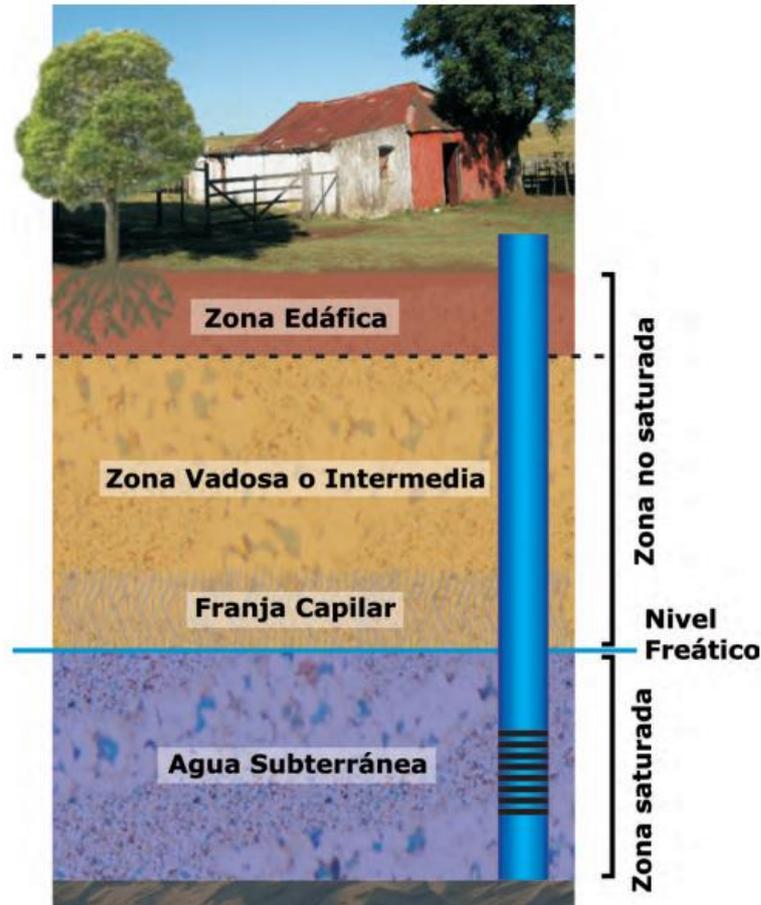


Figura 2.2 Distribución vertical del agua. Fuente: (Collazo & Montaña, 2012) Manual de agua subterránea. Montevideo.

Al estrato poroso y permeable en el que se encuentra la zona saturada de agua se le conoce como acuífero. Estos se clasifican según su estructura en acuíferos libres, semiconfinados y confinados. Los libres son aquellos que constan de una zona permeable saturada y encima terreno permeable. Los semiconfinados son aquellos que tienen una capa semipermeable que deja pasar poca agua, Esta capa semipermeable se denomina acuitardo ya que almacena agua, pero no la deja circular libremente. Los confinados son aquellos cuya capa saturada o acuífera, se encuentra entre dos capas impermeables. Véase figura 2.3

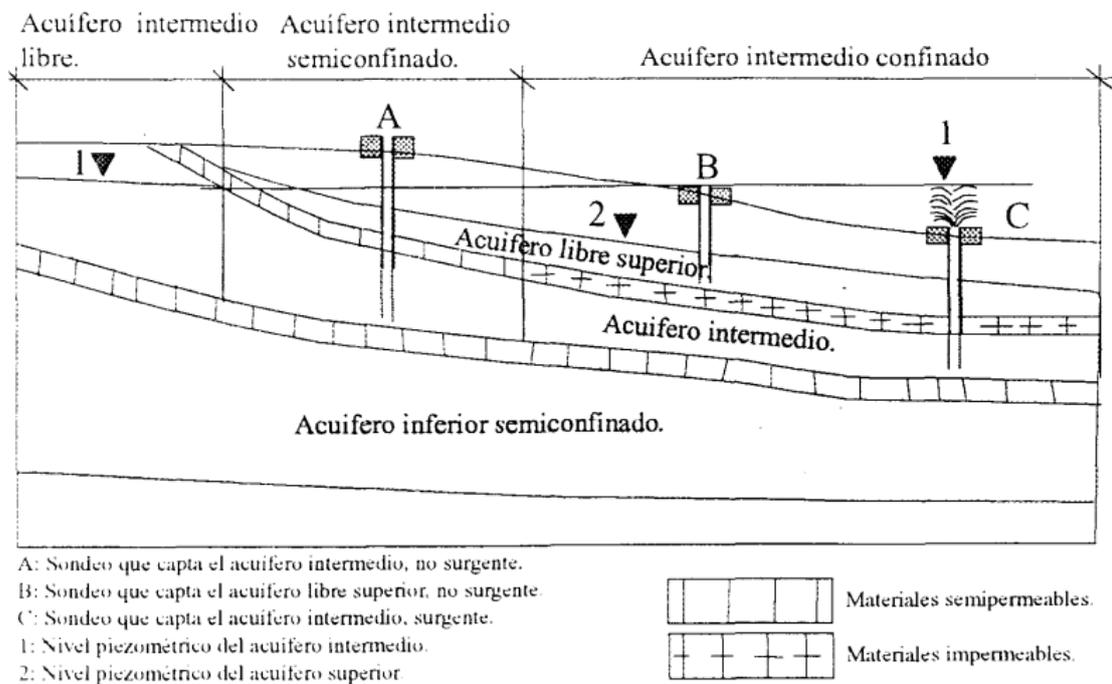


Figura 2.3 Acuífero libre, confinado y semiconfinado. Fuente: IGME, 2008. Capítulo 2. Libro 8. <http://aguas.igme.es>

Atendiendo a su textura los acuíferos se clasifican en poroso y karstificado y/o saturado. Los porosos son aquellos que almacenan el agua en el espacio intergranular de su material suelto constitutivo, que puede ser grava, arena, etc. Los karstificados y/o saturados son aquellos que tienen numerosas grietas, fracturas y oquedades. Esto se puede dar por disolución de los materiales, como ocurre con las calizas, dolomías, yesos; o por fracturación en materiales insolubles. Véase figura 2.4



Figura 2.4 Acuífero fisurado y acuífero poroso. Fuente: (Collazo & Montaña, 2012). Manual de agua subterránea. Montevideo.

Además, según su ubicación geográfica los acuíferos se clasifican en interiores y costeros. Los interiores son aquellos que se ubican alejados del mar. Los costeros son aquellos que se ubican en cercanía al mar. Estos acuíferos son propensos a intrusión salina, que se da por efecto del gradiente hidráulico, y se define como la intrusión del agua de mar en la zona de costa. Véase figura 2.5

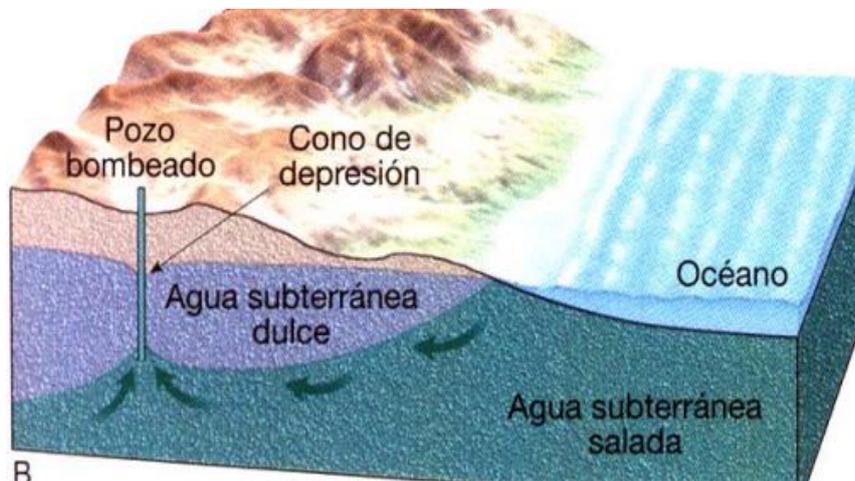


Figura 2.5 Intrusión salina debido a explotación intensa de agua. Fuente: Pérez, A. PPT Aguas Subterráneas. Universidad Autónoma Metropolitana. México D. F.

2.2 Estado del arte

2.2.1 Estudios Anteriores

Amado (1990) en su tesis de grado "*Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Baja del Río Manglaralto*" a través de investigación geoeléctrica y geosísmica caracterizó el acuífero ubicado en la cuenca, que él denominó baja, del río Manglaralto.

Quinteros (2013) en su proyecto de maestría "*Propuesta De Gestión Del Recurso Agua Mediante La Utilización De Conocimientos Ancestrales En La Parroquia Manglaralto*" mediante datos de encuestas realizó un análisis de la gestión del acuífero del río Manglaralto.

Merino (2014) en su tesis de grado "*Evaluación De La Intrusión Salina En Un Acuífero Costero Y El Impacto Al Suministro De Agua Potable En Manglaralto Provincia De Santa Elena*" obtuvo los espesores de las unidades semiconfinante y acuífera, mediante la correlación de datos del proyecto OIEA-ESPOL y la caracterización de la cuenca realizada por Amado (1990).

Herrera, G. (2015) en su tesis doctoral "*Estudio para un Modelo de Gestión de un Acuífero Costero, mediante Metodologías Participativas y Análisis Geoestadístico en el marco del Desarrollo Local. Manglaralto, Ecuador.*" calculó el **volumen ideal del acuífero** mediante la multiplicación del área del Acuífero, altura promedio del Acuífero y la relación de poros del estrato de arena-grava en **26'424162.4 m³** y el **volumen** restando el **nivel freático** del acuífero en el 2015 en **8'533734.2 m³**. Obtuvo como resultado que para el año 2015 el acuífero se encontraba al **32,3%** de su capacidad.

Valencia (2017) en su proyecto de grado "*Análisis Hidrogeológico De La Cuenca del Río Manglaralto para la Caracterización de sus Sistemas Acuíferos*" mostró mediante mapas las zonas más probables de presentar acuíferos, en las cuencas

de los ríos Manglaralto, Cadeate y Simón Bolívar. Además, realizó una estimación de la cantidad de agua de los acuíferos.

Herrera, P (2018) en su proyecto de grado *“Análisis de la Construcción de un Dique como Solución para el Problema de Abastecimiento de Agua de la Parroquia Manglaralto”* calculó la capacidad de almacenaje del suelo del cauce del río Manglaralto en 295.3lt/m³. Para ello, usó una muestra de grava gruesa con bajo porcentaje de finos, obtenida de la excavación del cauce. Con esto calculó el volumen de agua retenido por el suelo debido al dique en 5207.99 m³

Morante et al (2019) obtuvo un modelo conceptual de la cuenca y evaluó el agua del acuífero para analizar las proveniencias de las salinidades del agua. Concluye que en la parte baja de la cuenca que está cercana al mar, el agua salina se podría deber a intrusión salina y que, hacia lo alto de la cuenca en dirección a la Cordillera Chongón Colonche, la salinidad podría deberse a la deposición de esos estratos debajo del mar.

2.2.2 Descripción Geológica

El Cantón Santa Elena presenta: en la cordillera Chongón-Colonche rocas cretácicas de tipo volcánico y vulcano sedimentarias como basamento, superpuestas por rocas variadas de edad terciaria; rocas sedimentarias terciarias de origen marino continental superpuestas por sedimentos marinos de edad cuaternaria; y en las zonas bajas, formando el medio aluvial, se encuentran depósitos de sedimentos cuaternarios.

Wolf T. (1892) indica que las formaciones cuaternarias del Ecuador son las más jóvenes. En la región Costa en las partes llanas, existe un alto porcentaje de sales debido a la evaporación de lagunas salinas, dado desde el levantamiento del terreno o por la acumulación de aguas salobres en la época invernal. La escasez de lluvias ha disminuido el endulzamiento de las aguas subterráneas; así, el agua obtenida mediante pozos tiene un sabor salobre.

1.2.2.1 Geología local

La parroquia Manglaralto está formada por cuencas de antearco emergidas, cuyos rasgos tectónicos más sobresalientes son la falla transversal Chongón-Colonche. El relleno de las cuencas está dado por sedimentos de la Formación Cayo y el grupo Azúcar, en un depósito profundo tipo turbidítico (Flysch) con edad Cenomaniano Superior hasta el Eoceno Superior en la Cordillera Chongón-Colonche. (GESTIONADMI CÍA. LTDA., 2014) (Nuñez del Arco & Dugas, 1986)

Siguiendo el modelo de la cuenca, según CIPAT (2015) el basamento de esta, lo constituyen los estratos arcillosos de la Fm. Zapotal y de la Fm. Socorro. Véase figura 2.6

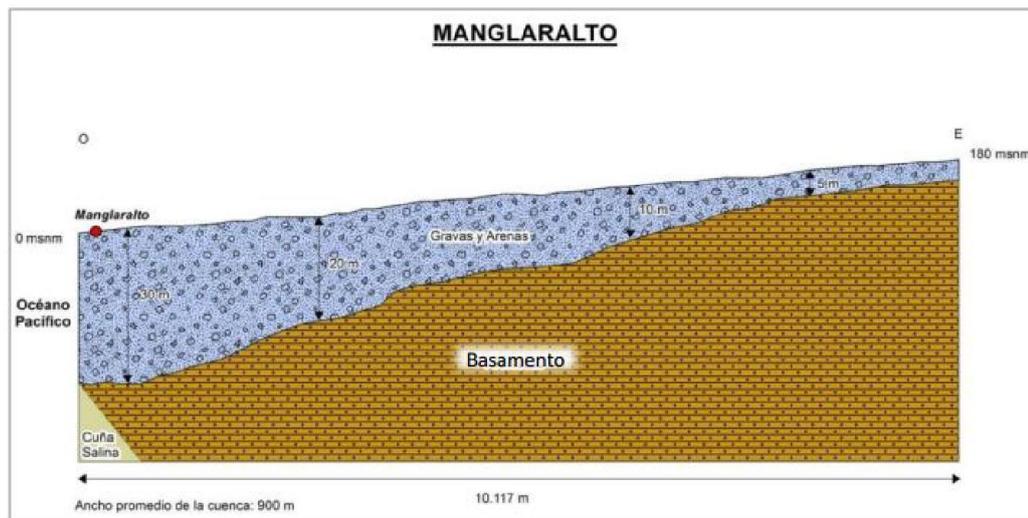


Figura 2.6 Perfil simplificado O-E de la cuenca Manglaralto. Fuente: (CIPAT-ESPOL, 2015)

1.2.2.2 Evolución geológica

Formación Cayo (k3y)

En el cretácico superior ocurrió un desplazamiento del piso oceánico que inició una fase compresiva y con ello se acumularon sedimentos de aguas medias o cercanas a la superficie en un medio turbidítico. Se presenta en relieves colinados y con diaclasamientos intensos.

Grupo Azúcar (E2-3Az)

Benítez (1983), Moreno (1983, 1984) y Marksteiner y Alemán (1991) indican que estas rocas fueron acarreadas por corrientes turbidíticas en un ambiente posiblemente abisal. Este grupo se divide en tres formaciones: Estancia Chanduy y Engabao. Se presenta en relieves ondulados colinados.

Grupo Ancón (E3An)

De edad Eoceno medio a superior, agrupa a las formaciones Clay Pebble Beds, Socorro, Seca y Punta Ancón. Presenta geofomas de acantilados, disectaciones, cuestras, chevrones y colinados.

FORMACIONES	LITOESTRATIGRAFÍA	EDADES RELATIVAS Y ZONAS BIOESTRATIGRÁFICAS	PALEOAMBIENTES
Grupo Ancón	Punta Ancón	Eoceno Medio medio - Eoceno Medio tardío. Zonas: P13 - P14; N P16; <i>Podocyrtris mitra</i>	Marino de salinidad normal, plataforma externa, mezcla de aguas cálidas y frías.
	Seca	Eoceno Medio medio. Zonas: P12; N P15 - N P16; <i>Podocyrtris ampla</i>	
	Socorro	Eoceno Medio temprano - Eoceno Medio medio. Zonas: P11 - P12; N P14 - N P15; <i>Thyrsocyrtis triacantha</i>	
	Clay Pebble Beds	Eoceno Temprano - Eoceno Medio. Pisos: Ypresiano - Lutetiano. Zonas: P8 - P10; N P12 - N P13; <i>Dictyoprora mongolfieri</i>	
Grupo Azúcar		Paleoceno. Pisos: Daniano superior - Thanetiano superior.	Marino profundo, abisal de 2000 a 3000 m de profundidad

Figura 2.7 Bioestratigrafía y paleoambiente del Grupo Ancón y Grupo Azúcar. Fuente: Ordoñez et al, 2006

1.2.2.3 Estratigrafía

Según Amado (1990) en la cuenca se presentan las unidades litoestratigráficas:

Formación Cayo (Cretácico Superior)

Aflora en la parte montañosa. Está constituido por afloramientos potentes de lutitas arcillosas, tobáceas y silicificadas de coloración verde oscuro a gris verdoso; areniscas conglomeráticas de color pardo y grauvacas verduzcas.

Fm. San Eduardo (Caliza Javita) (Eoceno Medio)

Calizas arrecifales de potencia aproximada 60 m. Es una intercalación de calcarenitas de grano grueso y conglomerados o brechas. Se ubica sobre la Fm Cayo en el cerro Llovedores.

Grupo Ancón (Fm. Socorro) (Miembro San Pablo) (Eoceno Superior)

Areniscas Grauvaquicas de coloración verduzca, semi duras, bien fracturadas y cementadas por calcita o argilita Su cementación impide la permeabilidad, además por ser zonas altas se da el proceso de escurrimiento de aguas (escorrentía).

En el sureste de la cuenca se haya una alternancia de areniscas grises, calcáreas y conglomeráticas con lutitas y limolitas a la que reconoce como la base de la Fm Socorro o Miembro San Pablo.

Formación Tosagua (Miembro Dos Bocas) (Mioceno Inferior- Medio)

Lutitas de coloración marrón oscuro con concreciones. Se presenta muy fracturado con relleno de yeso secundario, lo que produce bajo almacenamiento de agua e improbabilidad de acuífero. En el Cerro Colorado, en el noroeste, se muestra de coloración rojiza.

Formación Tosagua (Miembro Zapotal) (Oligoceno superior)

Areniscas de grano medio endurecidas de espesores decimétricos a centimétricos, se muestra como agrupaciones de conglomerados.

Aluvial

Está conformado por la alternancia de limos y gravas, haciéndose potente hacia el tope los limos. Presenta clastos como fragmentos provenientes de la parte alta de hasta 40cm. Son materiales con buena capacidad de almacenamiento debido a su alta porosidad y permeabilidad.

Según Duque (2000) y Romero (2013) se añaden las siguientes unidades:

Formación San Pablo (Tablazo medio) (Cenozoica-Cuaternario-Pleistoceno)

Aflora en Colonche en una altura entre 9 y 15 m. Se compone de terrazas marinas con fósiles sugestivos de zona salobre. Son areniscas conglomeráticas con intercalaciones de lutitas y limolitas en zonas calcáreas.

Debris Flow

Indicado como flujos de escombros. Es una mezcla de agua y fango que acarrea el transporte de grandes clastos.

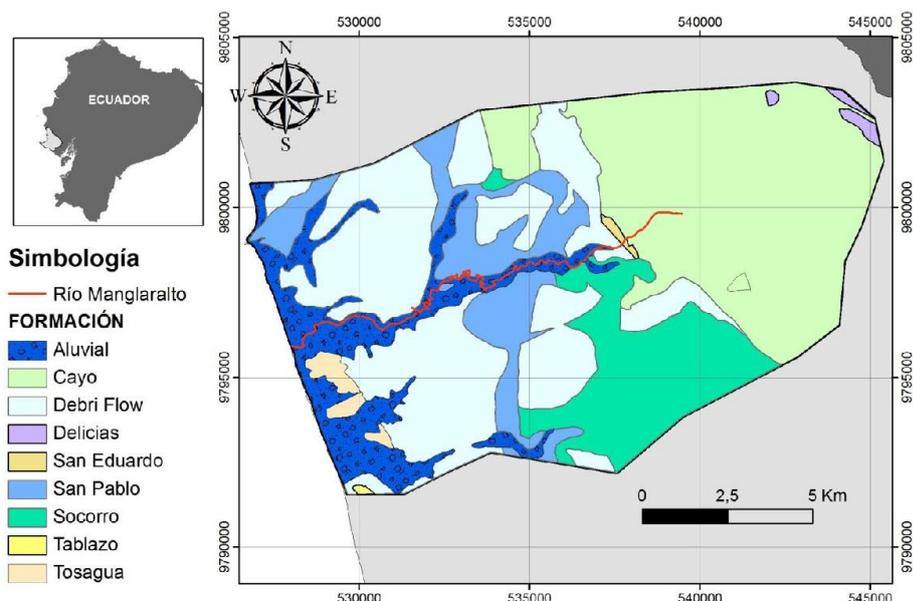


Figura 2.8 Mapa de las formaciones geológicas de la cuenca del río Manglaralto.

Fuente: Mapa geológico de Manglaralto.

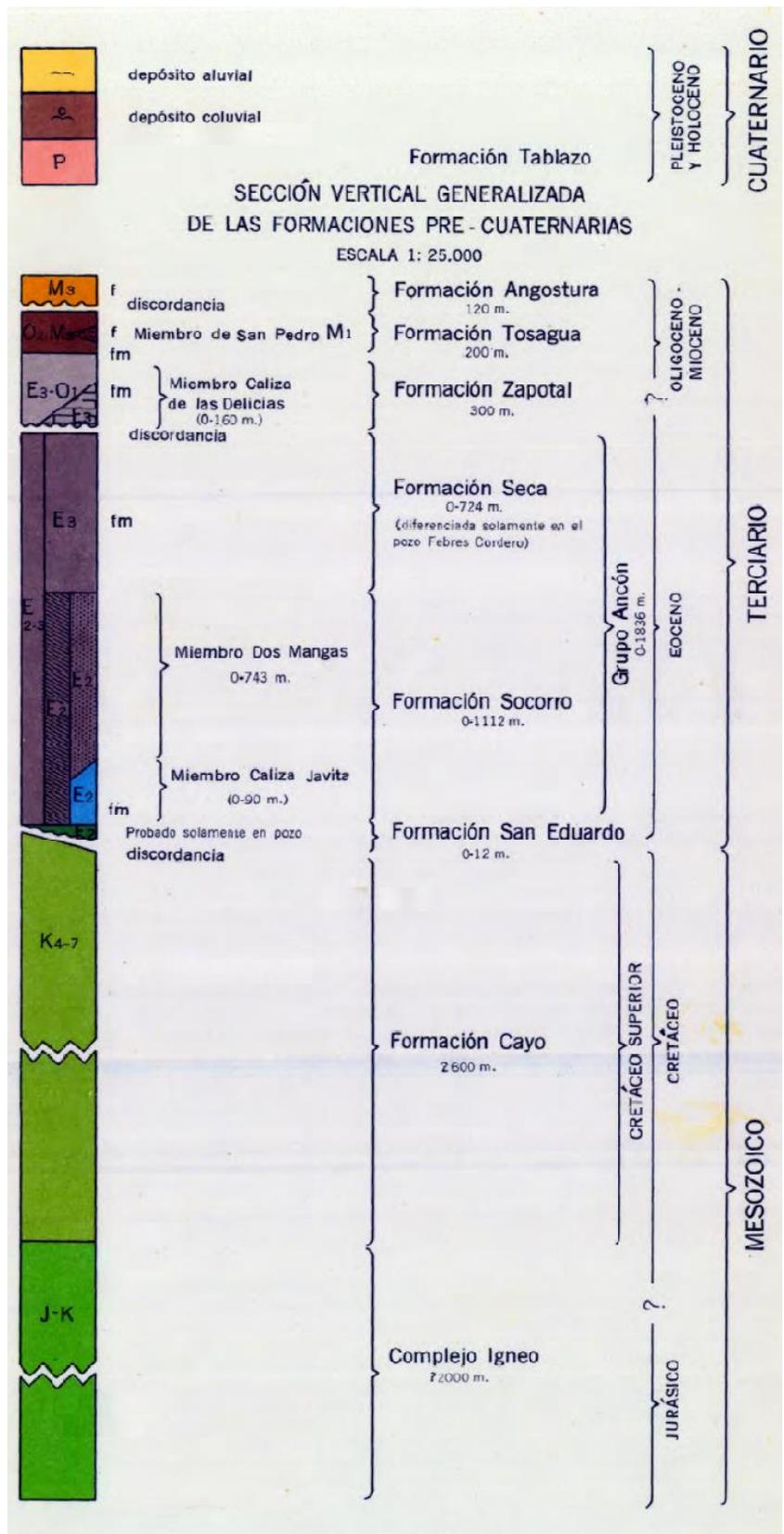


Figura 2.9 Columna litoestratigráfica de la parroquia Manglaralto. Fuente: Hoja geológica Manglaralto. IGM, 1968

2.2.3 Hidrometeorología

Según la clasificación de Koppen en la provincia de Santa Elena se diferencian tres zonas climáticas: Clima Tropical Húmedo en la cordillera Chongón Colonche, Clima Tropical Seco en la faja costera, y, Clima Tropical Sabana la mayor porción de la provincia como partes baja y valles. Véase figura 2.10

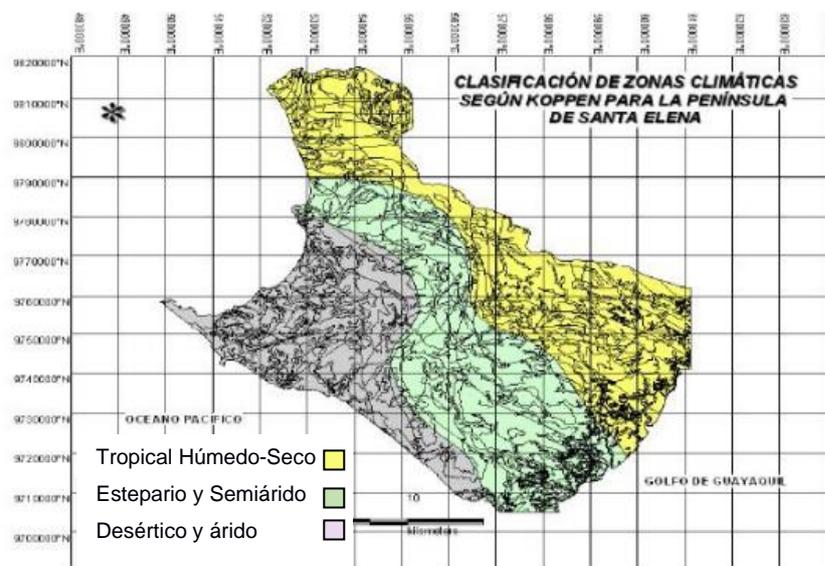


Figura 2.10 Clasificación de zona climáticas de la PSE según Koppen. Fuente: Proyecto SICA. Modificado de (Molina, 2013)

Debido a sus bajas precipitaciones y a que la temperatura media supera los 23°C, Nuñez del Arco (1986) clasifica el clima como Tropical Megatérmico Semiárido desde Ayangué y Manglaralto hasta el cabo de San Lorenzo. Con precipitaciones fuertes y de baja duración de enero a mayo y precipitaciones débiles llamadas garúas de junio a octubre. Véase figura 2.11

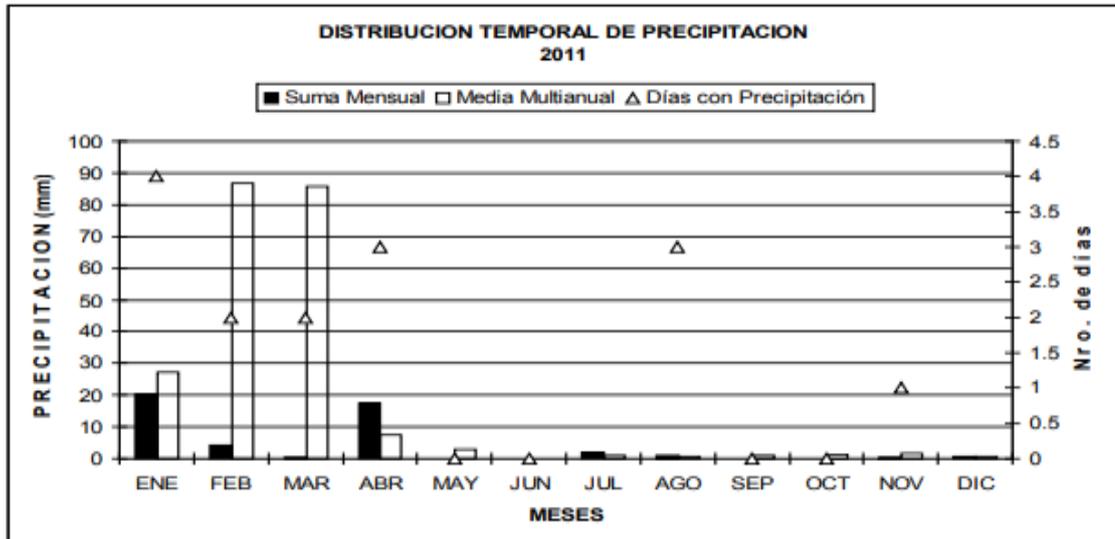


Figura 2.11 Distribución temporal de precipitaciones. Estación Santa Elena Universidad (M1170). Fuente: INAMHI. Anuario Meteorológico N° 51-2011

La región se ve afectada por la presencia de factores como la corriente fría de Humbolt, la corriente cálida del Niño y el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical. La presencia marcada de la corriente de Humbolt en la faja costera provoca temperaturas y densidades de lluvias bajas. (Molina, 2013)

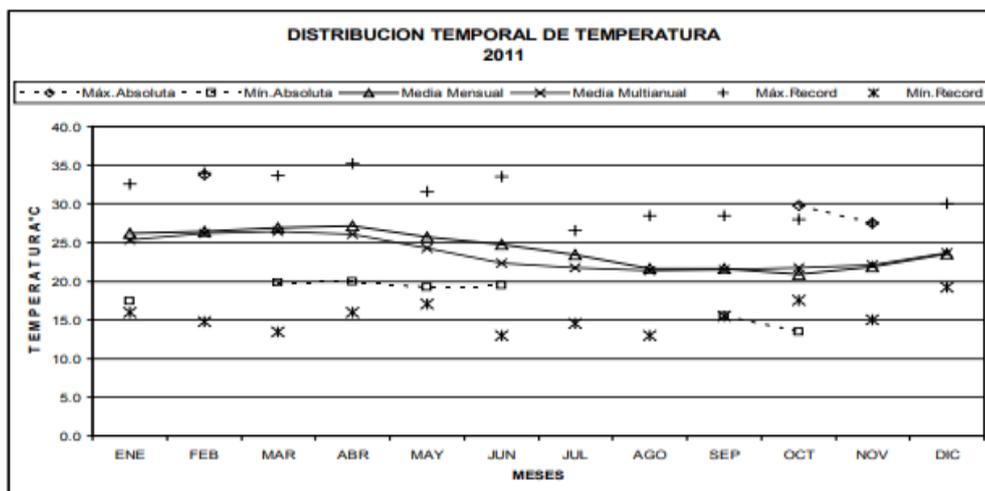


Figura 2.12 Distribución temporal de temperatura. Estación Santa Elena Universidad (M1170). Fuente: INAMHI. Anuario Meteorológico N° 51-2011

Amado (1990) calculó la precipitación media anual de la cuenca de Manglaralto en 508.4 mm, la evapotranspiración real en 474.9 mm y la cantidad para infiltración y arroyamiento en 33.50mm.

2.2.4 Red Hidrográfica

La cuenca de la parroquia Manglaralto es alimentada por el río Dos Mangas. Y vierte sus aguas hacia el océano Pacífico, lo que la convierte en exorreica.

La red hidrográfica de la parroquia Manglaralto se compone de ríos y esteros de régimen permanentes e intermitentes. Los de régimen permanente tienen agua todo el tiempo mientras que los intermitentes sólo en época de lluvias. En los valles como Manglaralto y Valdivia, los depósitos aluviales son permeables y potentes, por tanto, una gran cantidad de agua se infiltra en el suelo. Esto disminuye sensiblemente el flujo en los cauces de aguas abajo hasta que se saturan los acuíferos superficiales. (GESTIONADMI CÍA. LTDA., 2014)

Según Valencia (2017) el río Manglaralto tiene orden cuatro y es de régimen estacionario permanente. Sus afluentes nacen en la cordillera Chongón-Colonche y son los ríos Pajisa y Culebra. Véase figura 2.13

que no tenga acuíferos. La zona sur sí posee acuífero, pero este no se recarga con facilidad. Por ende, según estudios de isótopos de CIPAT, su agua es vieja (aproximadamente más de 100 años) y de ser usada se agotaría con facilidad por la falta de recarga. Véase figura 2.14



Figura 2.14 Distribución de los acuíferos de la PSE por zonas. Fuente: CIPAT-ESPOL. 2015.

En la zona norte se encuentra el acuífero del río Manglaralto. La JAAPMAN inició la extracción de agua del acuífero con 2 pozos y en la actualidad cuenta con 12 pozos de agua distribuidos a lo largo del río como se muestra en la figura 2.15

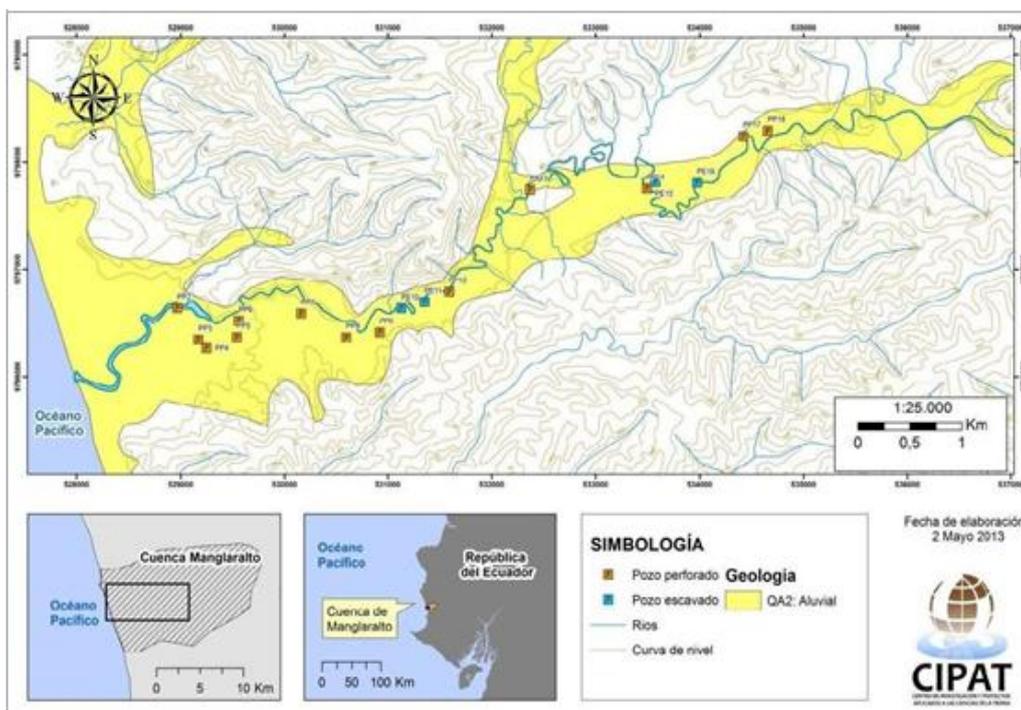


Figura 2.15 Ubicación de los pozos de la comuna Manglaralto.

Fuente: CIPAT-ESPOL, 2013

2.2.5.1 Acuífero Manglaralto

Este acuífero se encuentra en los depósitos aluviales de la zona, constituidos por grava y arena. Se considera que tiene porosidad primaria y permeabilidad alta. En la tabla 2.2 se muestra las características del acuífero obtenidas del análisis de los pozos de agua perforados. La información fue recopilada de JAAPMAN (2016) y CIPAT (2015)

Tabla 2.2 Datos del acuífero costero del río Manglaralto. Fuente: Datos de JAAPMAN (2016) y CIPAT (2015)

Datos del acuífero costero del río Manglaralto	
Área del acuífero	5, 08 km ²
Nivel freático	de 9 a 17 m
Nivel estático	de 1, 2 a 9, 7 m
Zona Saturada Promedio	20 m

Porosidad estrato arena-grava promedio	22%
Porosidad	20-30%
Permeabilidad de Darcy (“real”)	1,59 – 5,15 m/día
Caudal promedio	7 l/s

Según los datos de Merino (2014) los espesores de la capa semiconfinante que contiene la zona saturada, serían los de la tabla 2.3. Los valores indican que el mayor espesor de las capas semiconfinante y acuífera se encuentra en la cuenca baja donde existe alta densidad de pozos. Estos espesores disminuyen hacia la subida de la cuenca, sin embargo, la unidad acuífera presenta disminución y aumento de espesor.

Tabla 2.3 Espesores de la unidad semiconfinante y unidad acuífera respecto a la cuenca. Elaborado a partir de datos de Merino, 2014

Unidad/ Cuenca	Zona baja	Zona media	Zona alta
Unidad Semiconfinante	6 a 22 m	6 a 12 m	2 m promedio
Unidad Acuífera	14 a 30 m	18 a 3 m (disminuye hasta Pajiza)	3 a 18 m (aumenta cerca de Dos Mangas) < 3 m (disminuye lejos Dos Mangas)

2.2.5.2 Niveles piezométricos

El nivel piezométrico es la altura de presión del agua en el pozo, cuando la presión del pozo se equilibra con la presión atmosférica.

En la figura 2.16 se puede observar las variaciones del nivel piezométrico debido a la recarga artificial del acuífero mediante tapes. Es de fijarse que los pozos 2, 6 y 5 son los que tienen una mayor variación. Siendo estos los pozos más

cercanos a tapes y conociendo que la recarga no fue natural ya que la estación seca ocupa de mayo a diciembre con precipitaciones casi nulas, se puede decir que las variaciones positivas corresponden a la recarga artificial del tape. Sin embargo, también se puede notar que los pozos 3 y 4 decaen hasta casi cero, esto se da debido a la continua extracción de agua y la lejanía de la recarga; esto provoca intrusión salina. (Carrión et al, 2016)

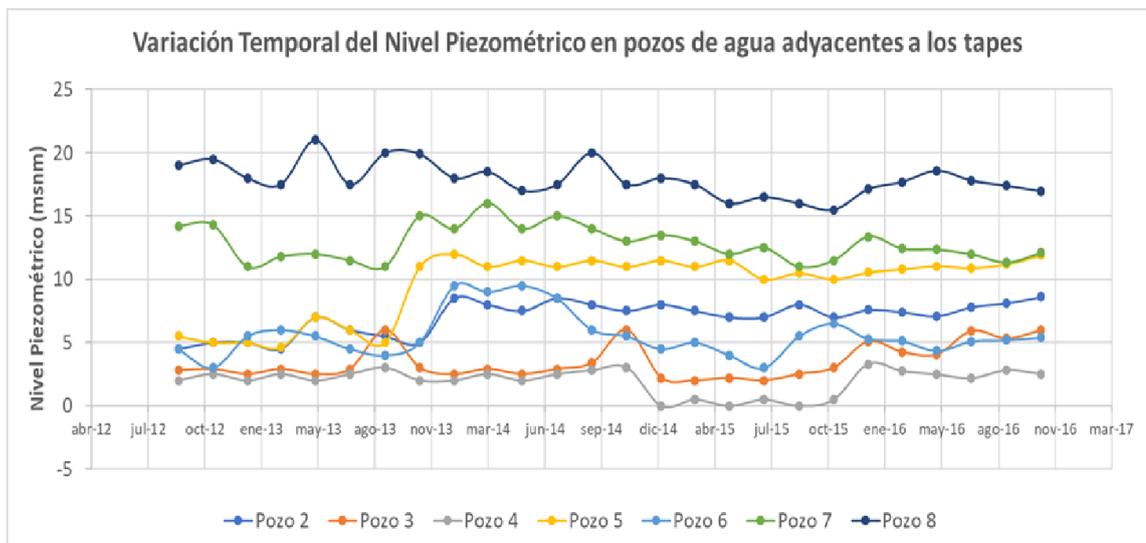


Figura 2.16 Variación temporal del piezométrico de pozos de agua cercanos a tapes. Fuente: (Carrión et al, 2016)

Herrera, G (2015) en diciembre 2013 obtuvo los niveles piezométricos del acuífero dando como resultado que los pozos 2, 3 y 4 tienen los niveles de agua más bajos, incluso por debajo del nivel mar, lo que podría provocar una intrusión salina y deterioro de la calidad del agua.



Figura 2.17 Mapa de nivel piezométrico del Acuífero Manglaralto. Fuente: Herrera, G. 2015

2.3 Demanda de agua

2.3.1 Suministro de agua

El volumen de agua extraído del acuífero ha tenido una demanda creciente para la JAAPMAN debido a diversos factores. En la figura 2.18 se muestra el incremento en el periodo 2008-2016, siendo el mayor consumo en 2015 y existiendo una baja para el 2016 debido a la concienciación sobre la posible sobreexplotación del acuífero.

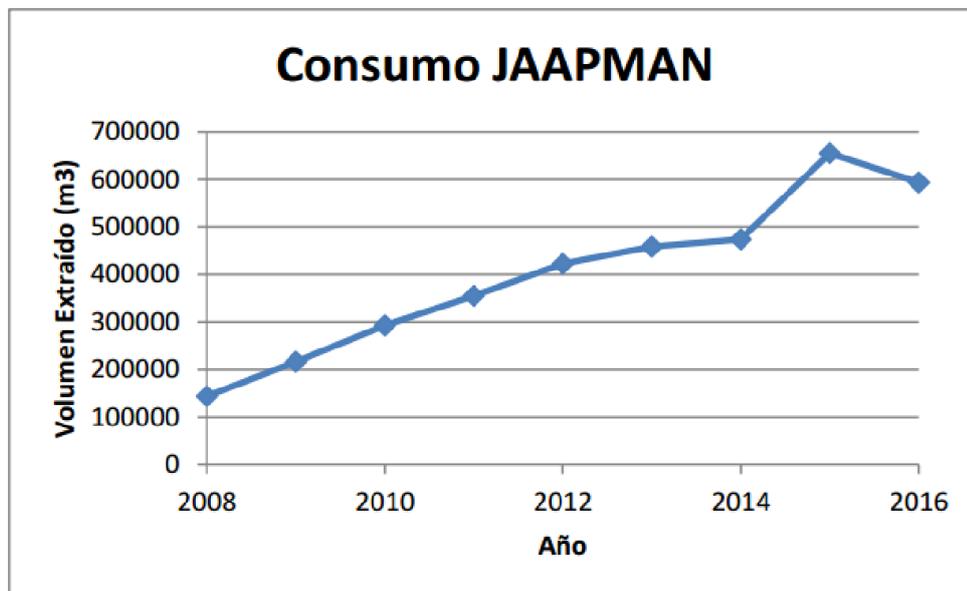


Figura 2.18 Tendencia de extracción de agua por JAAPMAN. Fuente: Valencia, 2017.

El consumo de agua está ligado a la temporada playera en los meses de enero a abril, ya que es cuando más aumenta la población flotante; además de agosto que son vacaciones para el régimen Sierra. Esto implica una sobreexplotación del acuífero. Sin embargo, estos meses corresponden a la época húmeda donde hay mayor cantidad de precipitaciones. Saeteros (2014)

Quinteros (2013) por medio de encuestas a una muestra de 132 beneficiarios, con una confiabilidad del 95%, obtuvo como resultado que la época lluviosa de enero a marzo es la que presenta mayores problemas de suministro de agua. Véase figura 2.19

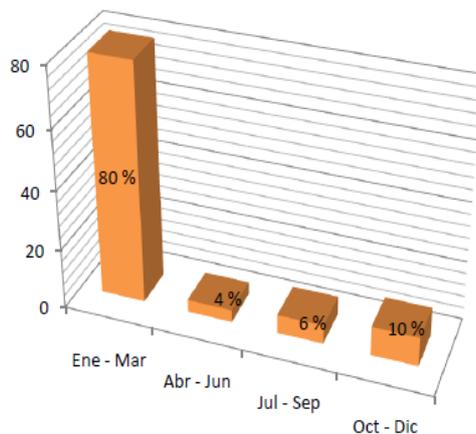


Figura 2.19 Afectación del suministro de agua de acuerdo con la época del año.

Fuente: Quinteros, 2013.

En la figura 2.20 se puede observar que las comunidades con mayor consumo son Montañita, Manglaralto y Libertador Bolívar. Que, además, según Herrera, (2015) son las zonas de mayor densidad de establecimientos hoteleros.

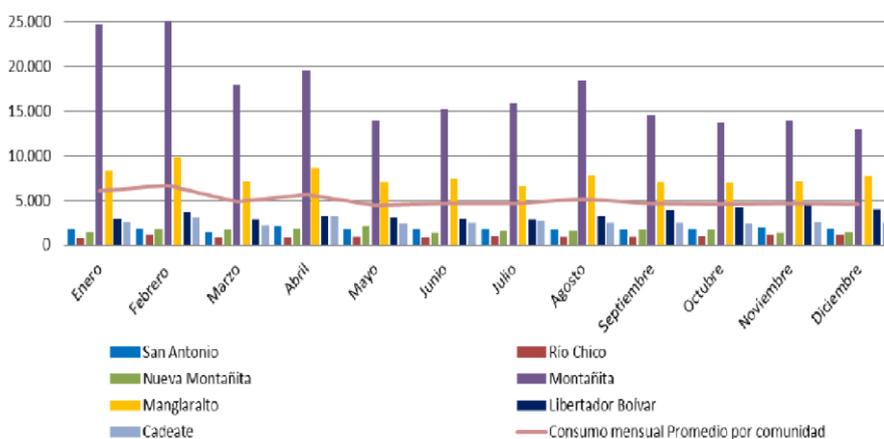


Figura 2.20 Comparación del consumo mensual por comunas. Fuente: Saeteros,

2014

Según la figura 2.21 el mayor consumo de agua es para alimentación y aseo, de esto solo el 5% es para turismo. Sin embargo, es el turismo el que provoca desbalance en la explotación acuifera, debido al incremento significativo de la población flotante.

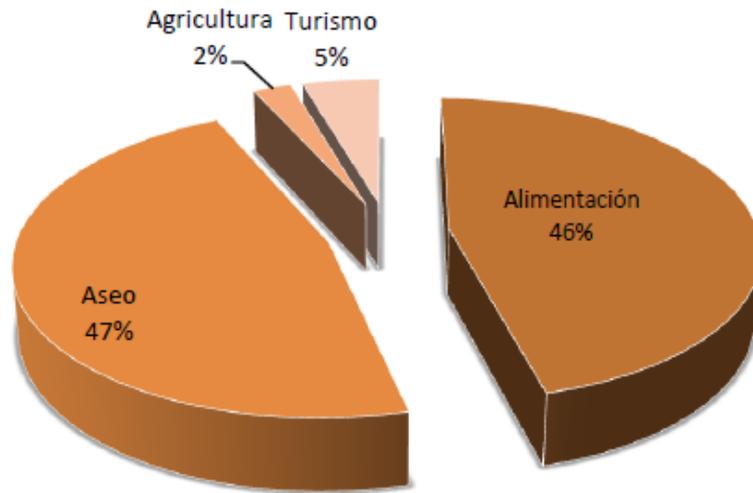


Figura 2.21 Usos del agua extraída del acuífero. Fuente: Quinteros, 2013.

Arévalo (2017) obtuvo un mapa de vulnerabilidad mediante el método GOD (G: grado de confinamiento hidráulico, O: ocurrencia del sustrato suprayacente, D: distancia al nivel del agua subterránea) cuyo resultado indica que el acuífero estaría en riesgo medio a extremo de contaminación. Véase figura 2.22

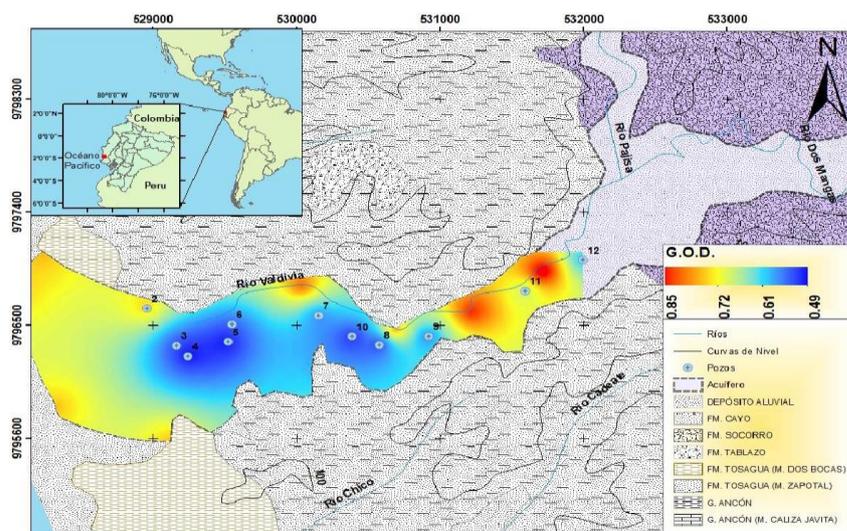


Figura 2.22 Mapa de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto. Zonas más propensas a contaminación en rojo. Fuente: (Arévalo et al, 2017)

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 RECONOCIMIENTO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Para la realización del modelo y las campañas geoelectricas fue necesario realizar un reconocimiento del terreno. El aluvial se encuentra localizado entre zonas boscosas, por lo que se realizaron las campañas buscando zonas en las que pudiese extenderse el sondeo lo mayor posible. En la figura 3.1 se muestra la zona plana en la que se realizó el sondeo rodeada por montañas en la parte posterior y en la figura 3.2 se nota la abundante vegetación de la zona.



Figura 3.1 Pie de Monte de Manglaralto. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.



Figura 3.2 Zonas boscosas de Manglaralto. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.

También se visitaron los diques ubicados en la zona. En la figura 3.3 se muestra el nivel de agua del río en el mes de abril y el dique de fabricación técnico artesanal ubicado por la zona del pozo 1.



Figura 3.3 Dique técnico artesanal ubicado cerca del pozo 1. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.

3.1.1 CAMPAÑAS GEOELÉCTRICAS

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) realizados por otros autores cubrían la orilla sur del río, por ende, se realizaron SEVs del lado norte para cubrir una mayor área y poder relacionar mejor los datos entre sí.

Se realizaron SEVs con una abertura de los electrodos externos (AB/2) de 215m y de los electrodos internos (MN/2) de 20m, mediante el método Schlumberguer, para obtener los valores de resistividad de las capas del subsuelo. En la tabla 3.1 se muestran los materiales utilizados en la realización de los sondeos.

Tabla 3.1. Materiales utilizados en los SEV

Equipo	Cantidad
Terrameter System	1
Batería	1
Pinzas de lagarto	2
Carretes de cable con pinza	4

Cinta métrica	2
Electrodos	41
Combos	4
GPS	1

Para realizar el sondeo se coloca un centro, es decir, se clava un electrodo en el centro de las cintas y se extienden las cintas 215 m hacia cada lado. Se clavan los electrodos según la distancia requerida para las aberturas ($AB/2$ y $MN/2$). Se ubican dos carretes de cable por cada abertura; el par de carretes para $MN/2$ delante del de $AB/2$. Se estiran los cables hasta el primer punto para la toma de datos.

Luego, se conecta el equipo a los carretes mediante cables, cuidando de conectar correctamente los carretes internos y externos.

Finalmente, se conecta el equipo Terrameter System mediante pinzas a la batería. Este equipo es el encargado de inyectar corriente por los electrodos externos y recopilar los valores de resistividad por los electrodos internos. Ver figura 3.4 y 3.5



Figura 3.4 Arreglo de los materiales usados en los SEV. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.



Figura 3.5 Conexión de electrodos con lagartos para la toma de datos. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.

En la tabla 3.2 se muestra la plantilla usada, con las aberturas internas (MN/2) y externas (AB/2). Además, se detallan los valores obtenidos para el primer punto de sondeo.

Tabla 3.2 Plantilla usada para los SEV y datos del sondeo 1. Fuente: CIPAT, 2019.

CODIGO	SEV-01-MC
FECHA:	12/03/2019
NOMBRE DEL SONDAJE:	SEV-43
COORDENADAS X:	529004
COORDENADAS Y:	9796539
COORDENADAS Z:	7m

Estación	Abertura	Abertura	Constante	Resistencia (ohm)		Resistividad	
Punto	AB/2	MN/2	K	R		ρ	
1	1	0.2	7.54	3.7242	Ω	28.08	Ωm
2	1.47	0.2	16.66	1.693	Ω	28.21	Ωm
3	2.15	0.2	35.99	679.01	m Ω	24.44	Ωm
4	3.16	0.2	78.11	273.95	m Ω	21.40	Ωm
5	4.64	0.2	168.78	93.5885	m Ω	15.80	Ωm
6	4.64	0.5	66.85	207.51	m Ω	13.87	Ωm
7	6.81	0.2	363.92	31.392	m Ω	11.42	Ωm

8	6.81	0.5	144.91	68.948	mΩ	9.99	Ωm
9	10	0.5	313.37	22.738	mΩ	7.13	Ωm
10	14.7	0.5	678.08	8.0133	mΩ	5.43	Ωm
11	14.7	2	166.58	31.969	mΩ	5.33	Ωm
12	21.5	0.5	1451.42	3.3036	mΩ	4.79	Ωm
13	21.5	2	359.91	12.9	mΩ	4.64	Ωm
14	31.6	2	781.13	6.1258	mΩ	4.79	Ωm
15	46.4	2	1687.79	3.1291	mΩ	5.28	Ωm
16	46.4	5	668.52	8.4429	mΩ	5.64	Ωm
17	68.1	2	3639.24	4.94	mΩ	17.98	Ωm
18	68.1	5	1449.1	3.867	mΩ	5.60	Ωm
19	100	5	3133.75	1.6685	mΩ	5.23	Ωm
20	100	10	1555.09	3.4867	mΩ	5.42	Ωm
23	215	10	7245.3	0.6418	mΩ	4.65	Ωm
24	215	20	3599.09	1.2898	mΩ	4.64	Ωm

3.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

3.2.1 Sondeos Eléctricos Verticales

Se realizaron 28 sondeos eléctricos verticales (SEVs) a lo largo de la ribera del río, en especial en la ribera norte ya que los datos de sondeos anteriores se hicieron solamente en la ribera sur.

Se obtuvieron los datos con el equipo Terrameter System para lo cual se usó el método Schlumberger con una distancia AB/2 de 215m. Para el posterior análisis de los datos, se usó el software ipi2win, con el cual se obtuvieron las curvas de resistividad para cada sondeo. A partir de las curvas de resistividad, se pudo realizar una interpretación de la litología probable del subsuelo, en la zona donde se realizó el sondeo.

3.2.1.1 Ipi2win

El programa ipi2win procesa los datos de resistividad obtenidos en campo y genera una curva de ajuste de resistividad. Todas las curvas generadas tienen menos del 6% de error, lo que hace fiable los datos. Sin embargo, la interpretación de los datos está ligada a errores subjetivos por parte del interpretador y debido a la litología. Existen varias posibilidades para un mismo rango de resistividades, ya que la roca puede estar seca, contener agua dulce o

salada o estar fracturada. La interpretación más fiable se debe basar en la geología del sector. Lo que representa otro inconveniente, ya que el sector en el que se realizaron los sondeos es un aluvial, donde debido a los cambios del cauce del río, existe cambios litológicos; es decir no existe una continuidad exacta en la geología del sector.

La curva de valores obtenida por medio de los datos ingresados se muestra en la línea roja y la de ajuste de valores en la línea negra. Para el caso de este estudio, se obtuvieron en la mayoría de los sondeos cuatro capas muestreadas, según la línea azul. Véase figura 3.6

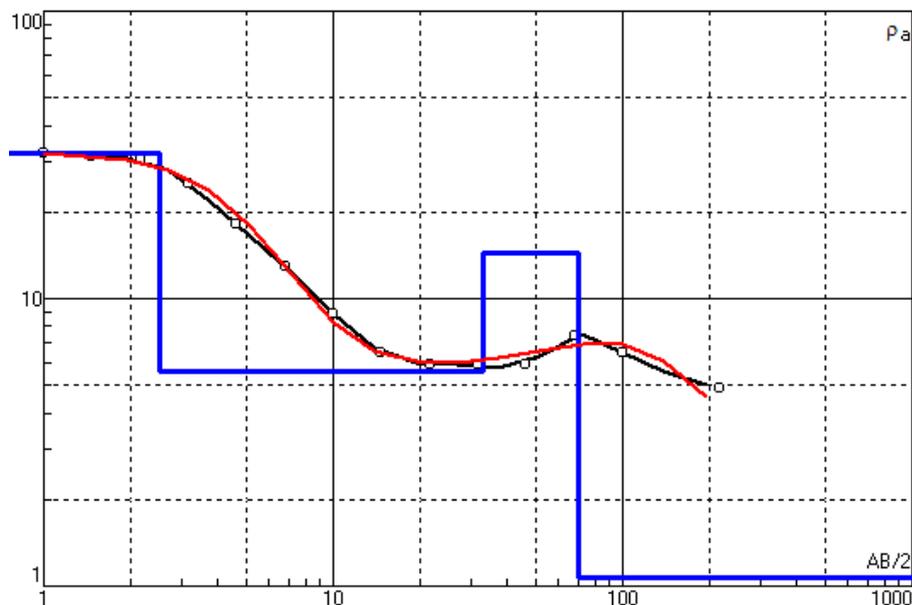


Figura 3.6 Curva de ajustes de valores realizada con ipi2win con datos del SEV 1.

Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.

Una vez ajustada la curva se obtiene una tabla de resultados con el número de capas (N), resistividad (ρ), espesor de las capas (h) y profundidad (d). Véase figura 3.7

N	ρ	h	d	Alt
1	32.2	2.5	2.5	-2.504
2	5.59	30.3	32.8	-32.8
3	14.4	37.5	70.3	-70.32
4	1.07			

Figura 3.7 Tabla de resultados del sondeo 1 obtenida con ipi2win. Fuente: CIPAT-ESPOL, 2019.

Para relacionar los rangos de resistividades con la litología del sector, se realizó una comparación con la geología de la zona y los valores obtenidos. Dando como resultado el siguiente rango de resistividades (véase tabla 3.3) para las posibles litologías muestreadas, ya que como se dijo antes, los rangos están sujetos a varios factores.

Tabla 3.3 Rango de resistividades con respecto a las litologías.

Rango de resistividades para las litologías	
Resistividad	Litología
0 - 2	Arenisca saturada
2 - 9	Arenas y gravas saturadas
9 - 18	Lutita saturada
12 - 90	Limos y arcillas
90 - 200	Basamento

Con ello se obtuvo una correlación entre la litología y las resistividades para todos los sondeos. En la tabla 3.4 se observa el resultado para el sondeo 1.

Tabla 3.4 Litología obtenida mediante análisis de las resistividades. SEV 1.

N	Espesor (m)	Profundidad (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	2.5	2.5	32.2	Limos y arcillas
2	30.3	32.8	5.59	Arenas y gravas saturadas
3	37.5	70.3	14.4	Lutita saturada
4	70.3		1.07	Arenisca saturada

3.2.1.2 Modelo geométrico

Para el modelo geométrico del acuífero costero del río Manglaralto se usaron los siguientes datos de entrada:

- Mapa geológico del Ecuador. Escala 1: 10.000: Hoja Manglaralto (3488 MIV-E)
- Modelo Digital de elevación: ASTGTM con resolución 12,5 m. Obtenido de USGS.
- Geofísica: 28 Sondeos Eléctricos en el área de estudio, realizados en época húmeda (marzo).

Para la incorporación de datos en GeoModeller es necesario convertir los datos a formatos aceptados por el software. Para ello, se usaron los siguientes programas:

Excel

Luego de interpretar los datos geofísicos, se dividió la información en tres archivos Excel. El primer archivo (collar) debe contener las coordenadas x, y, z de los puntos de sondeo. El segundo archivo (survey) debe contener los datos de rumbo, buzamiento y profundidad de sondeo. Esto sucede porque el programa procesa los sondeos como perforaciones; para cubrir estos datos se usó un rumbo y un buzamiento de estratos horizontales. En el tercer archivo (geology) se ubica la profundidad a las que se encuentra cada capa, con la formación/litología correspondiente.

ArcGis

ArcGis es una potente herramienta para el análisis de información geográfica. Se usó este programa para la digitalización de los mapas presentados se usó el programa ArcGis 10.5 Además, de la georreferenciación de imágenes y creación de shapefiles, para el posterior ingreso en el programa Geomodeller. Es importante relacionar la ubicación de los sondeos con el mapa geológico de la zona, para poder realizar una interpretación acorde a la zona de estudio.

Geomodeller®

Geomodeller® es un programa usado en el campo de la modelización, ya sea desde minas hasta geología. El programa presenta una interfaz amigable y existen varios tutoriales acerca de su uso.

Para la creación del modelo se debe empezar por crear un nuevo proyecto en el que se indican las coordenadas límites de la zona de estudio en los planos x, y, z. Posterior, el programa requiere el ingreso de una superficie topográfica, que puede ser ingresada como un plano horizontal o con un MDT, como en este caso. Con ello, el programa crea la superficie 3D en la que se presentan las interpolaciones realizadas por el usuario. Para empezar a procesar el modelo, el programa requiere el ingreso de información geológica para ello se ingresa el mapa geológico de la zona con él se crean los contactos y la descripción estratigráfica del modelo, también se requiere de estructuras como fallas, pero no son indispensables para modelar. En la parte geofísica, en nuestro caso se ingresaron los datos de sondeos eléctricos verticales mediante los tres archivos Excel descritos arriba. Pero se simplificaron los datos, especificando únicamente a las capas referidas como arenas y gravas y tomando el resto de las capas como material semipermeable. Finalmente, se procesa el modelo con esta información y de ser necesario se vuelve a procesar el modelo en busca de mejoras. Véase figura 3.8

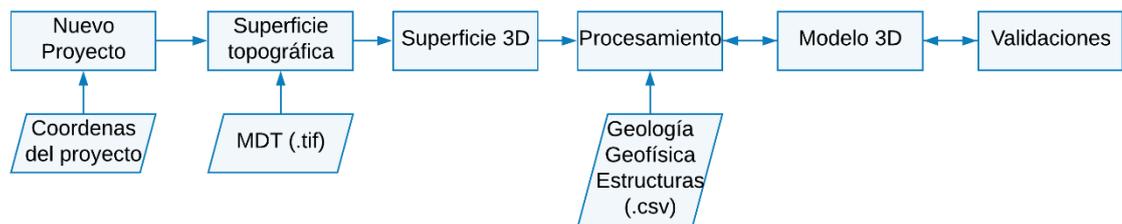


Figura 3.8 Esquema de la creación de un modelo en Geomodeller.

3.3 Modelamiento del acuífero

Fase I: Creación del proyecto

Se creó un nuevo proyecto en el que se ubicaron las coordenadas de ubicación de la cuenca del río Manglaralto, presentadas en la tabla 3.1. Se usó coordenadas WGS84/ 17S.

Tabla 3.1 Coordenadas del proyecto

Límites del proyecto	Mínimo	Máximo
Coordenadas X	528000	537000
Coordenadas Y	9795000	9800000
Coordenadas Z	-150	300

Posterior, se ingresó la superficie topográfica como un MDT en formato tif. Aunque el programa también acepta curvas de nivel en formato ascii. Véase figura 3.9

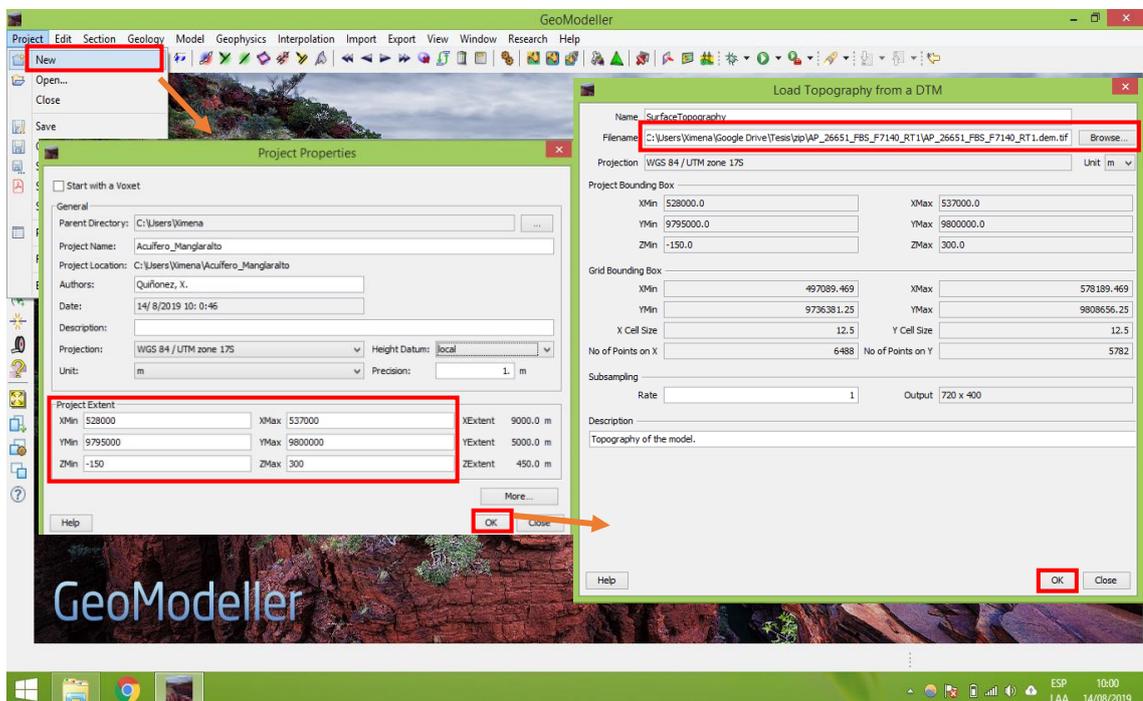


Figura 3.9 Creación de un proyecto en Geomodeller.

Fase II: Importación de los SEV

El presente proyecto se realizó únicamente con información geológica y geofísica. Como ya se explicó en el apartado 3.2.1 la información geofísica

corresponde a Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). Estos deben ser importados por medio de tres archivos Excel en formato CSV. En los cuales debe verificarse que la información esté ligada entre sí, pues el programa no importará datos que no existan en alguno de los tres archivos. Véase figura 3.10

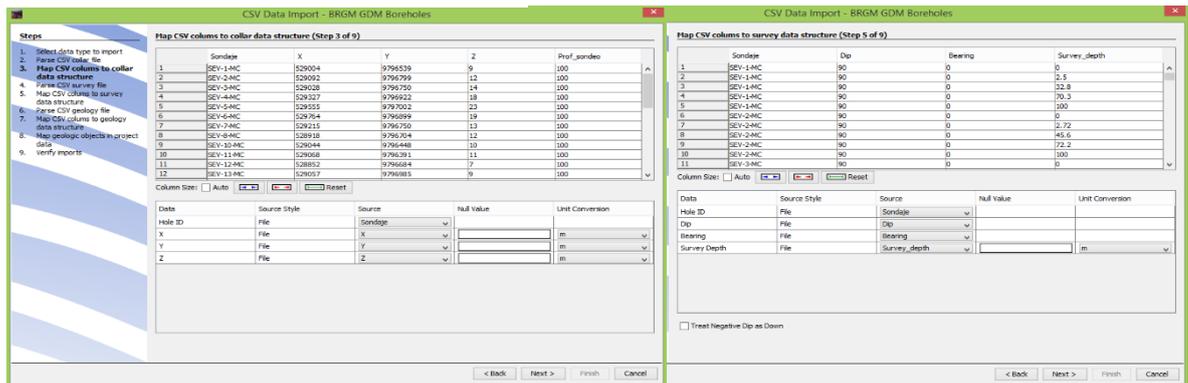


Figura 3.10 Pasos para la importación de sondeos.

↳

cargados los sondeos se debe crear una pila estratigráfica. Esto se hace para determinar grupos de unidades y la relación que existe entre ellas. Las unidades pueden tener contactos tipo “onlap” o “erode”. La primera opción predispone las unidades una encima de la otra, mientras que la segunda se usa para que la unidad corte los estratos.

Primero, se debe escoger las unidades que conforman una serie y el tipo de contacto (onlap o erode) de cada una de ellas. Una vez generadas las series, se deben ordenar ya sea desde la base (bottom) o desde el techo (top).

Fase III: Contactos geológicos y orientaciones

Geomodeller® puede importar la información de contactos en archivos como shapefile o csv y relacionarlo con las formaciones presentes. Pero, también cuenta con herramientas para la creación de los contornos dentro del programa.

Presenta dos herramientas para la generación de contornos. La primera  crea

líneas rectas, y la segunda  crea líneas suavizadas.

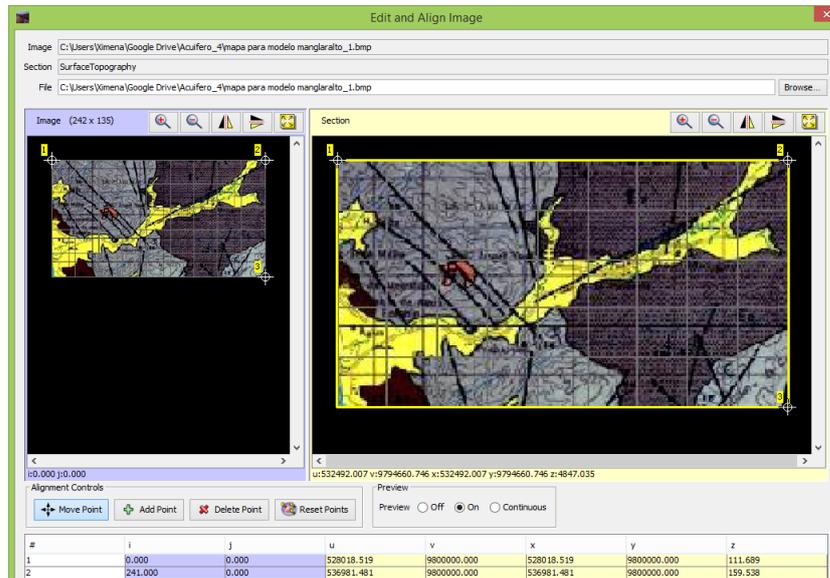


Figura 3.11 Importación de imagen en Geomodeler

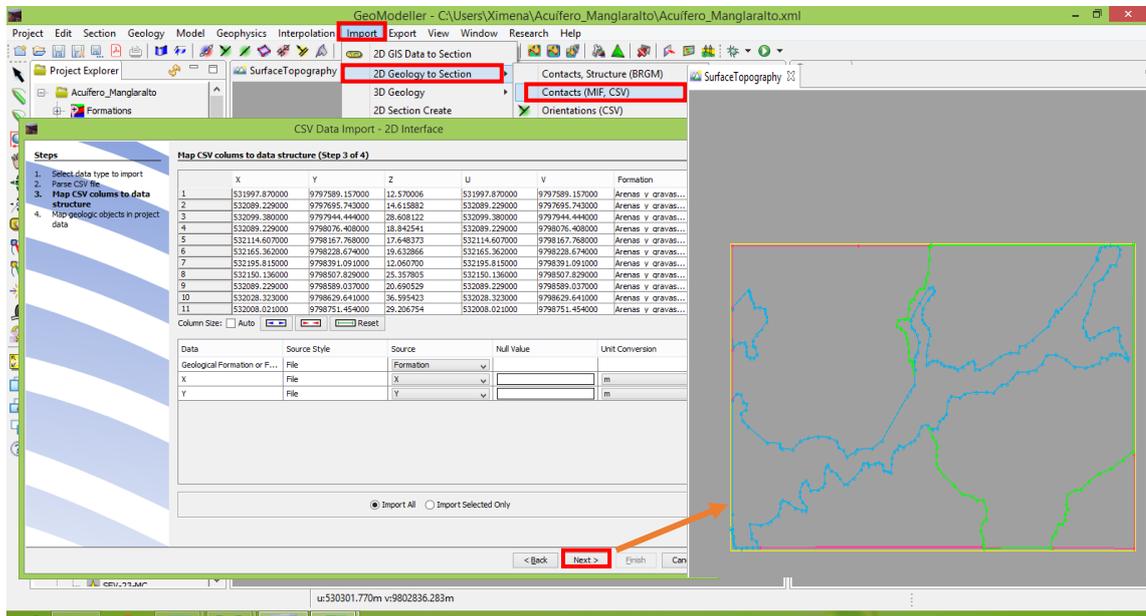


Figura 3.12 Importación de contactos geológicos

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Modelo geométrico

En general, el modelo muestra un buen acoplamiento con la realidad. Mediante correlación de información geológica y geofísica, se obtuvo como resultado un modelo de la relación entre las unidades hidrogeológicas de la zona. Véase figura 4.1. En el que se detalla el volumen 3D del acuífero costero del río Manglaralto. Véase figura 4.2, 4.3 y 4.4.

La zona cuenta con varias formaciones litológicas. Pero, para en el presente estudio solo se tomaron en consideración tres unidades: la unidad 1 que corresponde al suelo del aluvial en amarillo, unidad 2 corresponde a la zona permeable en celeste y la unidad 3 que corresponde a materiales de baja permeabilidad.

Con respecto al acuífero, se puede indicar que es un acuífero semiconfinado poroso y costero. Y, según el modelo obtenido se puede corroborar lo indicado por otros autores respecto a los espesores. En la parte baja de la cuenca disminuye su espesor hasta la zona de Dos Mangas, hacia adelante muestra un espesor fino, y en la parte alta de la cuenca, muestra un aumento de espesor. Se puede destacar que los mayores espesores corresponden a la cuenca baja. Esto se da debido a que en esta zona disminuye la turbulencia del río provocando una mayor deposición de sedimentos permeables. La zona acuífera se muestra más ancha y potente en la orilla sur del río, esto puede deberse al movimiento del meandro.

Correlacionando el modelo con los datos de pozos se puede indicar que la zona más potente también corresponde a una zona con un mayor contenido de salinidad debido a su cercanía con el mar. Esta zona también cuenta con tapes, lo que favorece la recarga del acuífero.

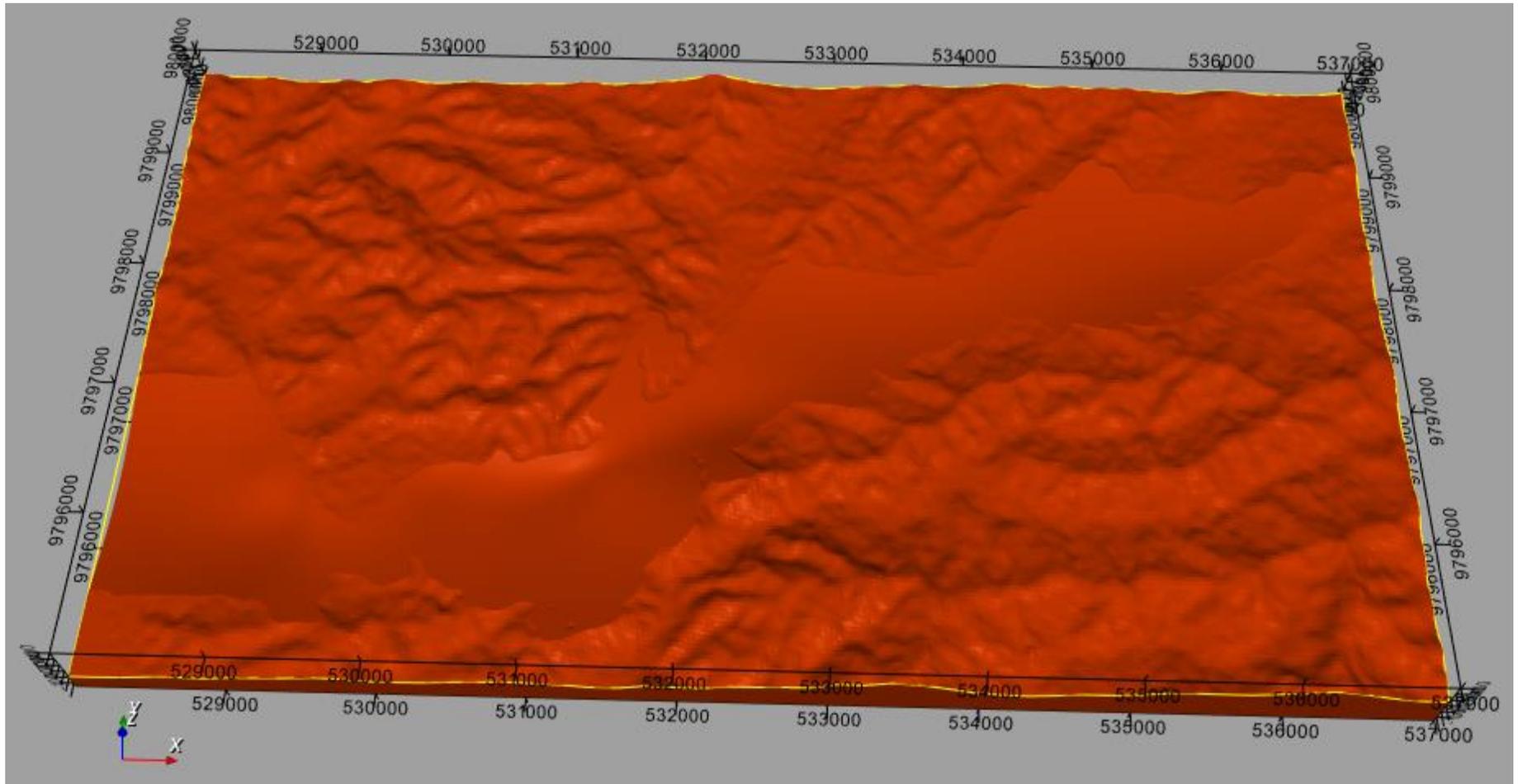
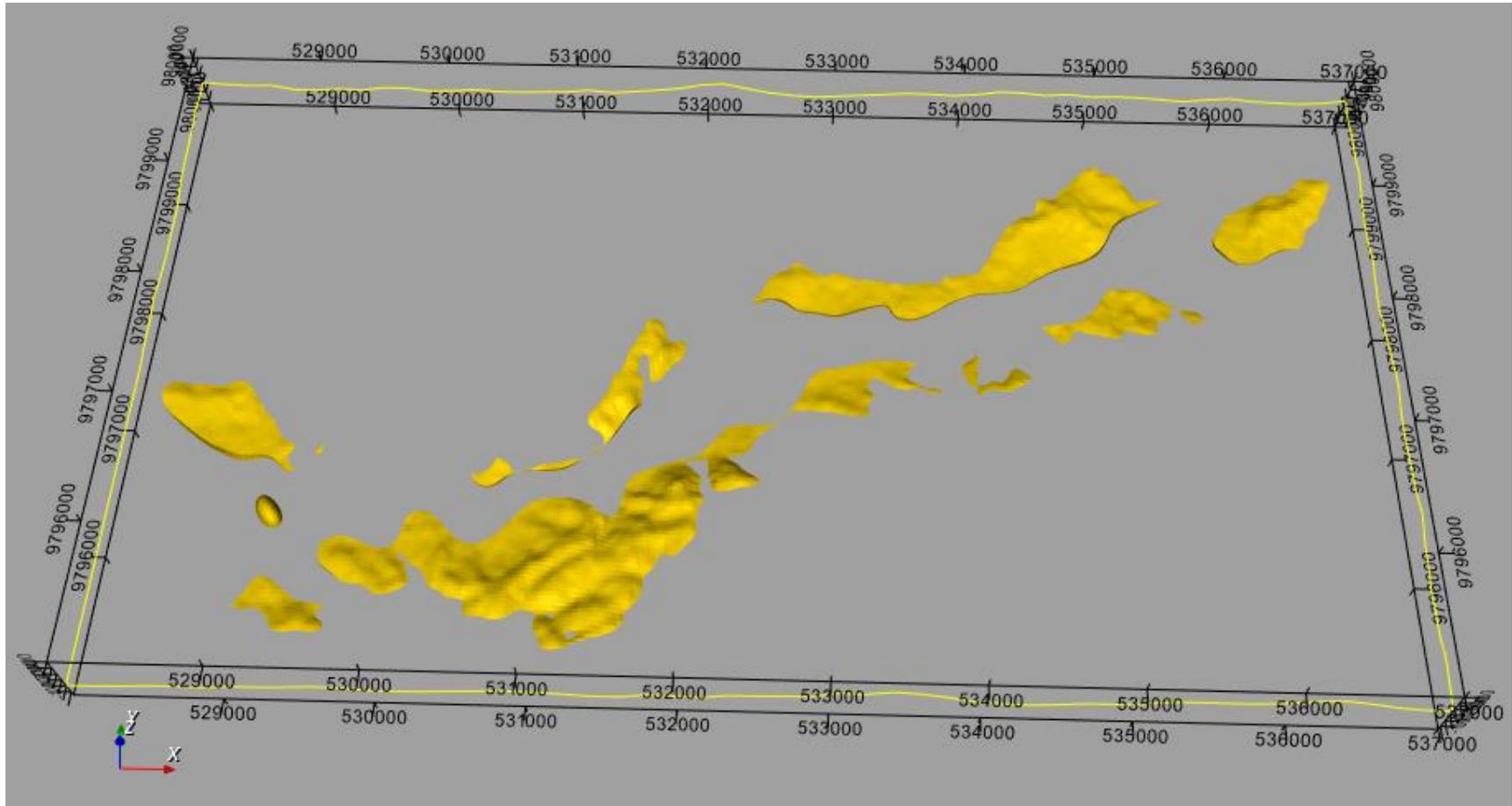
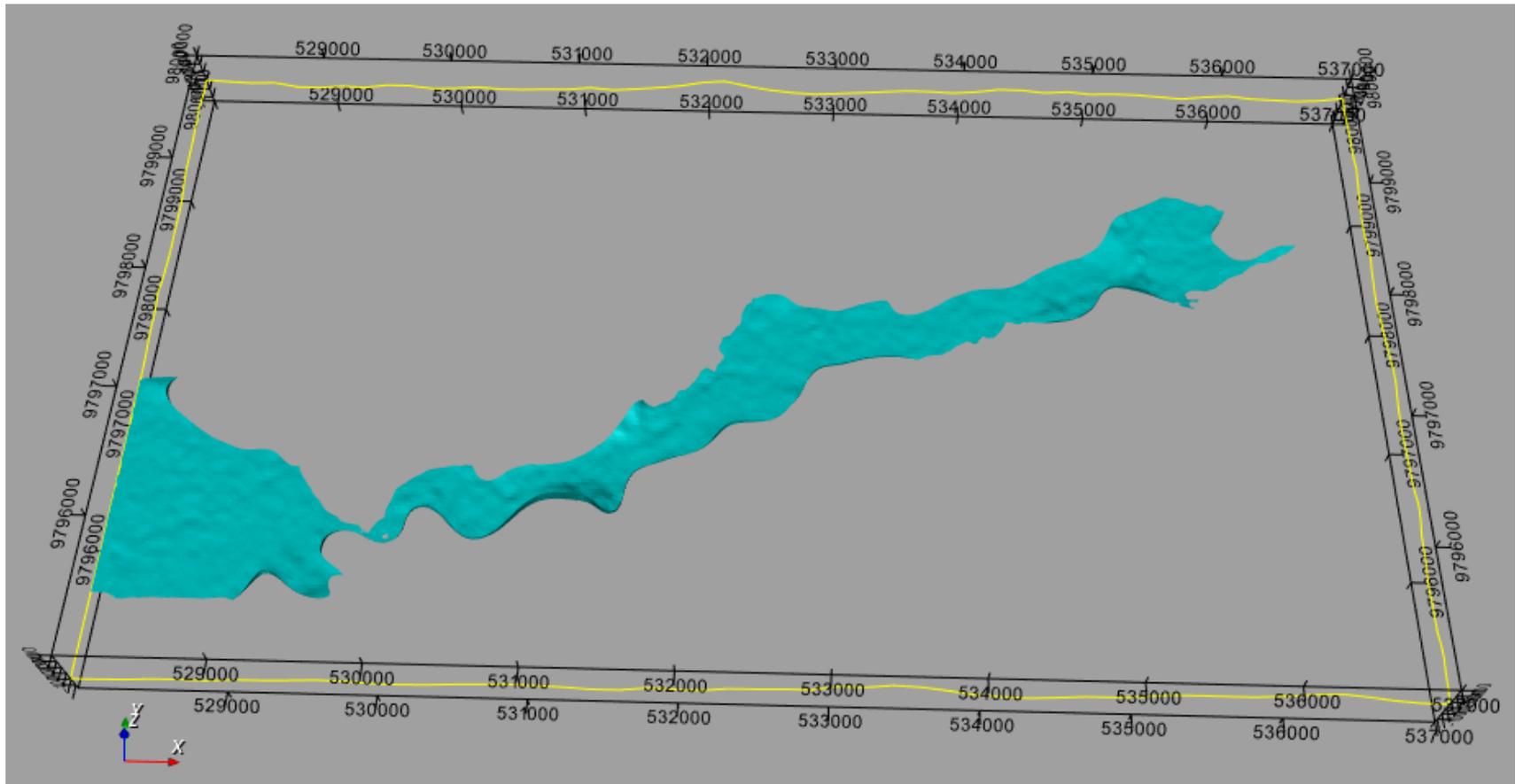


Figura 4.1 Unidad 3: Materiales de baja permeabilidad.





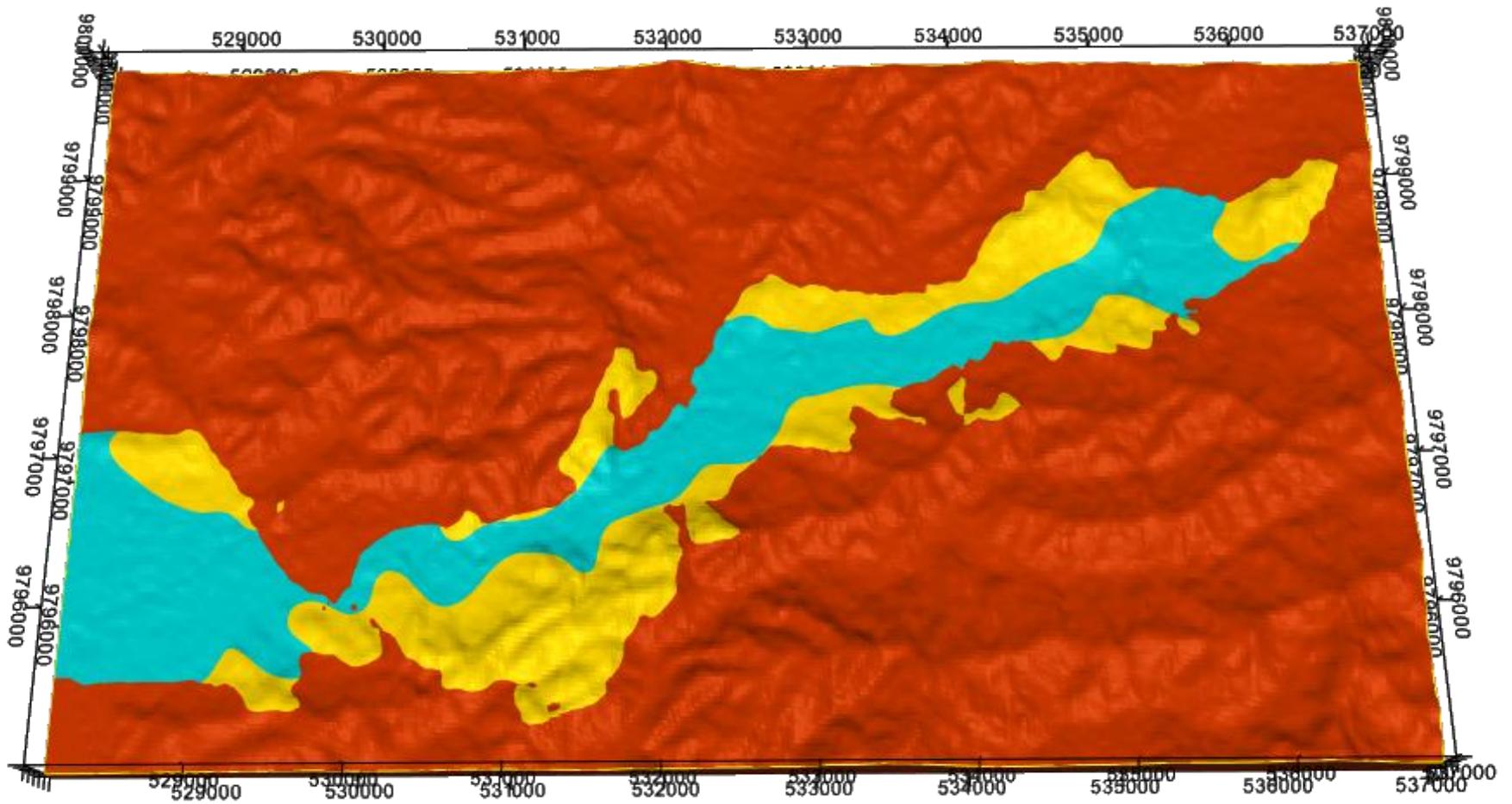


Figura 4.2 Relación entre las unidades hidrogeológicas

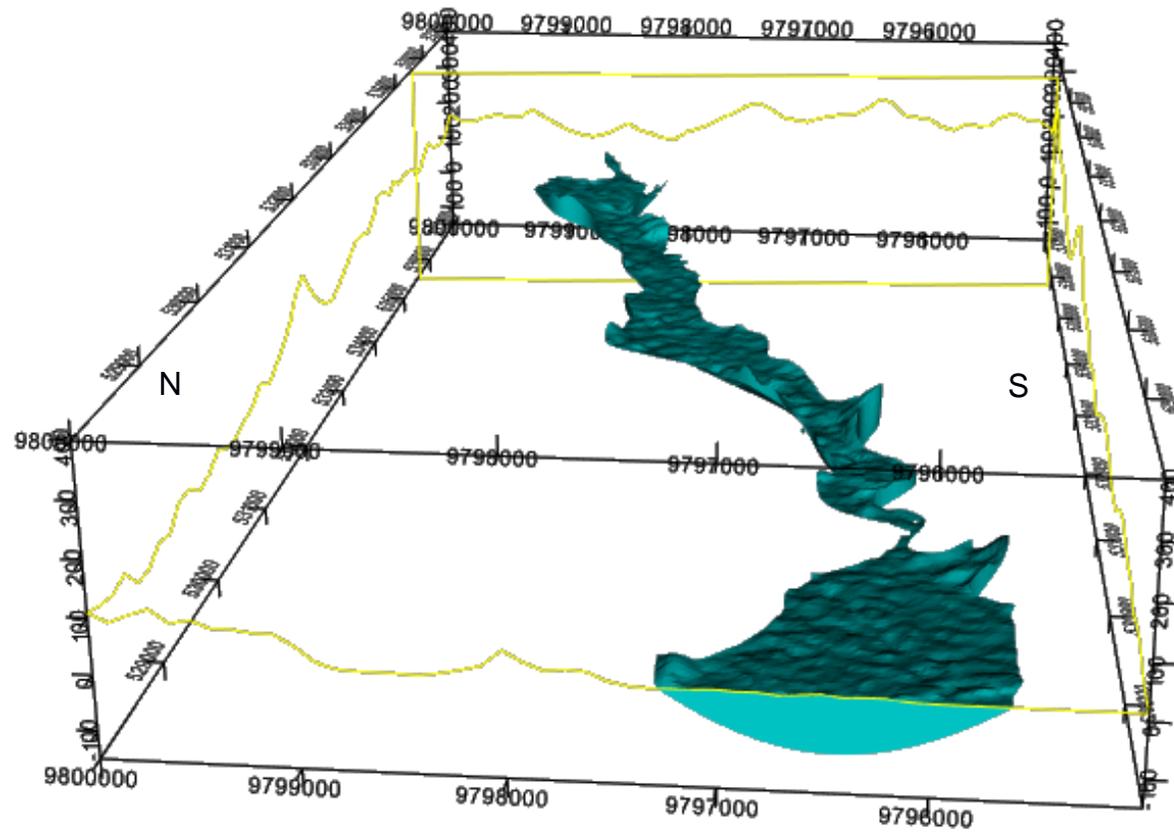


Figura 4.3 Vista desde oeste a este del modelo geométrico del acuífero.

O

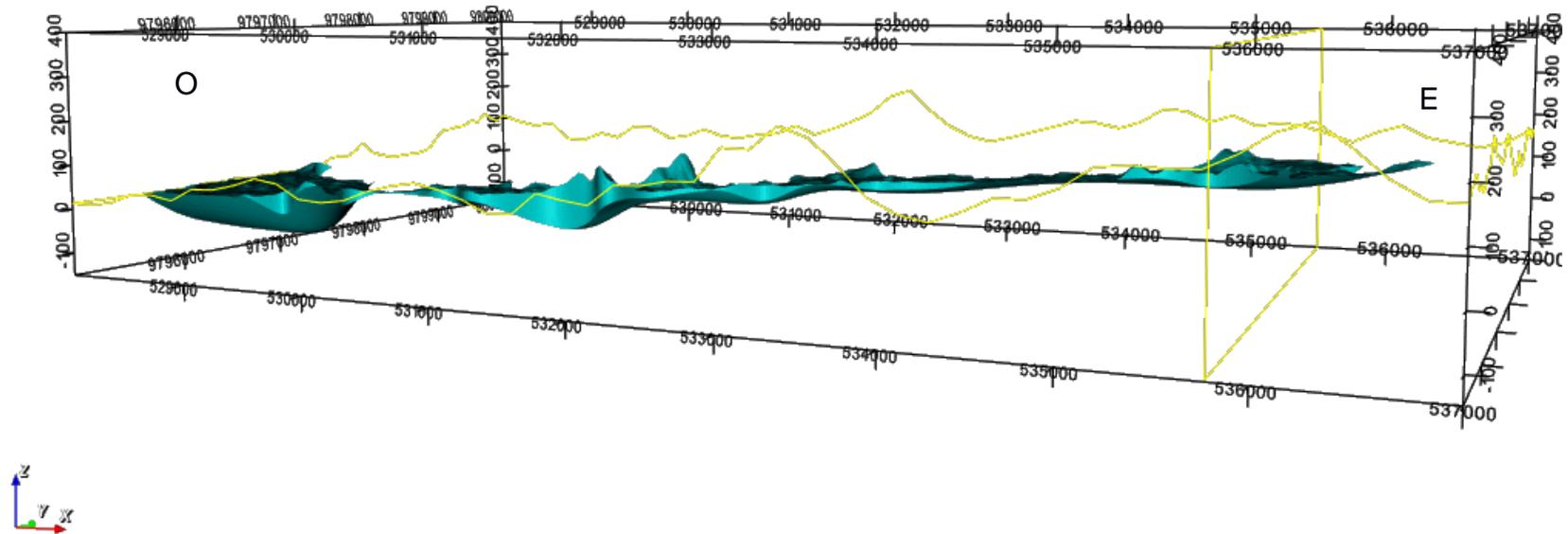


Figura 4.4 Vista Lateral este-oeste, desde la parte sur, del modelo geométrico del acuífero de Manglaralto.

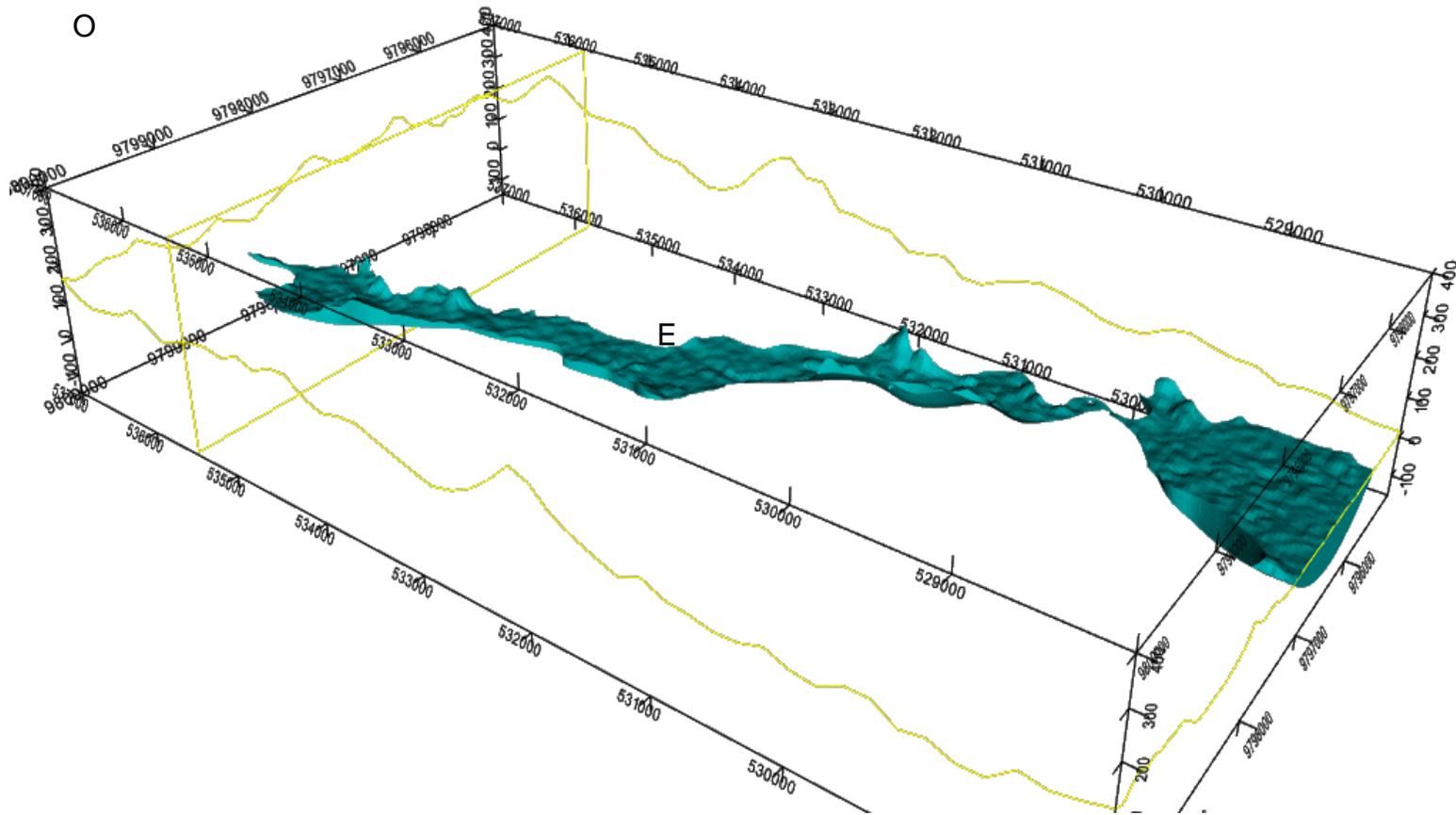


Figura 4.5 Vista parcial este-oeste, desde la parte norte.

4.2 Volumen estimado mediante el modelo

Mediante el modelo se estimó el volumen bruto de las arenas y gravas. Véase figura 4.2 Cabe destacar, que debido a que el modelo se realizó mediante interpolación de datos, está sujeto a errores. Se suma a esto, que la morfología de un aluvial es cambiante debido a la dinámica del río. Además, la interpretación de los sondeos está sujeta a varios parámetros. En vista de todo esto, el volumen obtenido mediante el modelo es una estimación, es decir, está sujeto a variaciones.

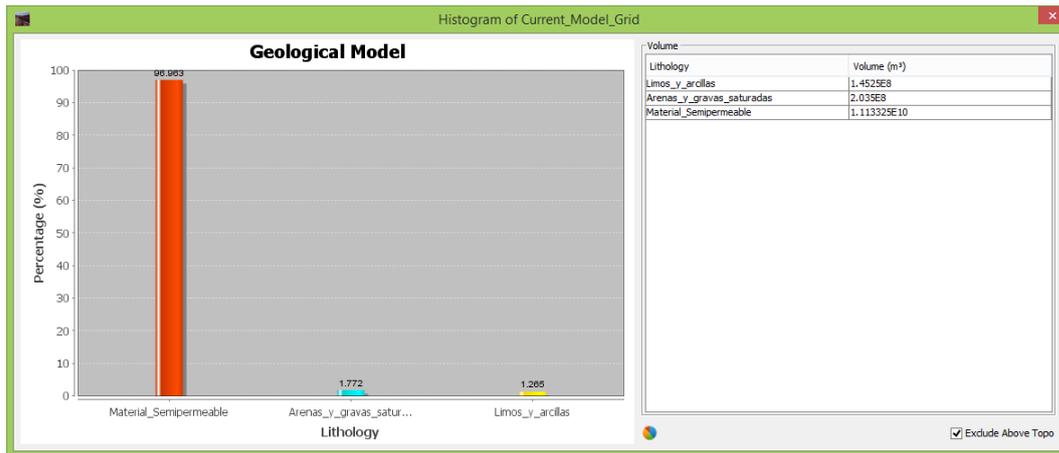


Figura 4.6 Volumen bruto de las unidades modeladas. Fuente: Quiñonez, 2019

El volumen bruto de arenas y gravas se refiere a la cantidad de este material que fue modelado. Sin embargo, a esto se debe considerar que no todo el volumen es de agua. Sino que, el agua estará entre los poros de la unidad de arenas y gravas. Esta porosidad ha sido calculada en 0,20 por estudios anteriores del CIPAT-ESPOL. Por ende, el volumen de agua en la unidad sería de $61 \times 10^6 \text{ m}^3$ (véase ecuaciones)

Volumen bruto de arenas y gravas= $2.06 \times 10^8 \text{ (m}^3\text{)}$

Volumen estimado de agua en el acuífero= (Volumen bruto) (porosidad promedio del acuífero)

Volumen estimado de agua en el acuífero= $(2.06 \times 10^8) (0.22) = 45.3 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$

En contraste, Valencia (2017) indica un volumen probable de agua en el acuífero de $13'318.091 \text{ m}^3$. Pero, calculando los niveles piezométricos para los sondeos y debido a la profundidad de los pozos, sugiere un volumen de agua extraíble de $9'880.779 \text{ m}^3$, es decir disminuye el volumen en un 25,81%.

Considerando valores de piezometría y la profundidad de los pozos. Véase tabla 4.1 se ha disminuido el 30% al valor obtenido mediante el modelo geométrico, obteniendo como resultado un valor de $13'596.000 m^3$

Tabla 4.1 Piezometría y cota de agua. Elaborado a partir de datos de CIPAT, 2019

Pozos	Cota del terreno en el pozo	Altura brocal	Prof. Pozo (m)	Elevación total del pozo	Freático (Estático) (m)	Nivel Dinámico (m)	Cota del agua
2	11.53	0.53	27.50	12.06	9.42	16.80	2.64
3	11.64	0.69	22.30	12.33	5.32	9.50	7.01
4	12.66	0.69	31	13.35	9.93	11.60	3.42
5	14.90	0.69	23,20	15.59	11.95	12.59	3.64
6	14.19	0.64	30	14.83	10.20	12.14	4.63
7	18.73	0.69	29.20	19.42	9.14	9.98	10.28
8	21.84	0.62	28.70	22.46	10.02	11.16	12.44
9	25.78	0.64	50	26.42	17.00	25.00	9.42
10	20.71	0.66	29	21.37	8.80	17.46	12.57
11	28.40	0.66	29	29.06	9.30	16.26	19.76
12	30.54	0.50	28	31.04	7.61	14.19	23.43

La comparación entre estos valores difiere un 27,3%. Pero cabe destacar que el cálculo realizado por Valencia (2017) se hizo con datos recogidos en la estación seca. Además, no había tapes ni diques que recarguen el acuífero. Esto implica que el volumen de agua sea menor, debido a que, no hay recarga del acuífero mediante las precipitaciones ni por otro medio. Al contrario del valor calculado en este estudio, que se realizó con datos del primer trimestre del 2019 (marzo-abril), en la estación húmeda. Y se ha comprobado mediante estudios anteriores que la recarga por dique aumenta la cantidad de agua retenida. Por ende, es de esperar que la saturación de agua sea mayor.

4.3 Volumen de extracción

Borbor & Vera, (2014) obtuvieron la proyección del crecimiento de la población adscrita a la JAAPMAN, mostrado en la tabla 4.2. Este aumento poblacional se traduce en un mayor consumo de agua. Sin embargo, no toma en consideración a la población flotante. Por otro lado, Valencia (2017) indica un consumo de agua de 654.831m³ para el año 2015. El aumento entre el volumen requerido para abastecer a la población adscrita y el volumen que fue extraído en el 2015 se debe a la población flotante. Esta relación es del 2,16% para ese año, pero debido al aumento poblacional cambia en un 2,6% para el 2020 y en un 3,08% para el 2025. A este volumen por población y turistas, se debe agregar el volumen extraído por otros pozos dentro del acuífero pero que no pertenecen a la junta, que según la JAAPMAN es un 15%. Con todos los parámetros mencionados se ha estimado el volumen de agua que se requeriría extraer del acuífero mostrado en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Proyección poblacional y volumen de agua requerido. Fuente: Modificado de (Borbor & Vera, 2014)

Año	Población Servida	Volumen requerido por la población (m³/año)	Volumen por población y turistas (m³/año)	Volumen requerido del acuífero (m³/año)
2015	22.147	640.998	654.831	753.056
2020	26.885	870.361	893.164	1'027.138
2025	31.623	1'132.887	1'167.780	1'342.947

Analizando estos valores, a una tasa anual promedio del 23.4%, se estima que en 5 años (2020-2025) el volumen extraído del acuífero sea 7'526.318 m³. En comparación el volumen obtenido en temporada húmeda del modelo es 13'596.000 m³. Con lo que se podría inferir que, debido a la implementación de un sistema artificial de recarga, el volumen de agua ha aumentado y el acuífero podría sustentar a la población de Manglaralto. Sin embargo, la ubicación cercana de los pozos, y la única distribución sobre la cuenca baja, produce

sobreexplotación en algunas zonas aumentando la probabilidad de intrusión salina. Se debe destacar que este valor es un estimado y que está sujeto a variación. Por tanto, no es recomendable extraer toda la cantidad de agua especificada, ya que en este informe aún no se han considerado factores como el porcentaje que debe disminuirse debido al equilibrio ecológico.

4.4 Aprovechamiento sostenible

Una solución a la sobreexplotación del acuífero es colocar los pozos más cercanos al cauce del río y a su vez implementar más diques que ayuden en la recarga del acuífero. Actualmente existen cuatro diques artesanales y uno técnico artesanal. Además, los pozos deberían tener mayores distancias entre sí para disminuir la explotación desequilibrada.

Es recomendable que en las estaciones húmedas dadas de enero a abril y en las épocas de garúa de agosto a octubre, se recolecte el agua de lluvia para el uso en el regadío y así disminuir un poco la tasa de requerimiento de agua. Esto va de la mano con la concientización sobre el uso del agua a través de charlas. Ya que usarla de forma indiscriminada provoca contaminación de las fuentes

Una forma de aprovechar el agua que ya ha sido usada, es reciclarla. Esta agua mediante tratamientos puede ser usada en el regadío de sembradíos, siempre y cuando, se encuentre dentro de las normas. El proyecto comunitario de ESPOL estudia las aguas subterráneas y las aguas residuales y las pretrata mediante filtros verdes para mantenerlas en un ciclo de aprovechamiento y disminuir la contaminación y la explotación del agua.

Es necesario controlar y medir la cuña salina para evitar que siga aumentando y disminuyendo la calidad del agua. Para ello se propone recargar superficialmente a los pozos más cercanos a la intrusión cuando el dique esté funcionando. Pero se debe analizar cuidadosamente esta opción ya que eliminar la intrusión salina,

una vez ha ocurrido, es muy difícil. Además, se debería investigar acerca de su afectación en el equilibrio ecológico.

El Modelo geométrico debe ayudarse de un modelo donde se especifique lugares óptimos para realizar la recarga y así ayudar en el control de la intrusión salina. Esto se debe correlacionarlo con el mapa de vulnerabilidades de Arévalo (2017) donde se indica que las zonas más vulnerables son las cercanías de los pozos 1, 2, 7 y 11.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se estableció el modelo geométrico del acuífero costero de Manglaralto, considerando la cuenca hidrográfica y su aportación según la estación del año, que para el caso de este proyecto fue invierno. Además, se consideró el modelo del cauce y las terrazas aluviales asociadas al río Manglaralto, que fueron comprobadas con los datos de 11 pozos, las visitas de campo y las campañas de geoelectrónica de SEV. La campaña geofísica comprendió 29 SEV que se realizaron en la estación lluviosa entre marzo y abril y 10 sondeos realizados en estudios anteriores.

A través de las campañas se identificaron las zonas porosas y permeables, referidas como gravas arenas cuya descansando sobre una zona semiconfinante arcillosa. Los datos confirman la influencia de los tapes en los niveles de agua y su importancia para la planificación del aprovechamiento sostenible. Ya que los espesores de la capa saturada de agua fueron mayores, respecto a los datos señalados en sondeos de Valencia et al (2017) antes de la construcción de estos.

El modelo geométrico sigue el cauce extendiéndose en los márgenes del río por medio de terrazas aluviales. Estas, son de mayor espesor hacia occidente y de menor hacia el oriente, refiriéndonos al acuífero costero superior libre. Se estimó el volumen en $13'596.000 \text{ m}^3$ calculado para arenas y gravas cuya porosidad promedio se ha estimado en 22%. Según las proyecciones poblacionales al 2025 el acuífero podría abastecer a la población si se lo aprovecha correctamente.

El acuífero del río Manglaralto es costero poroso libre debido a que está constituido por material no consolidado y no está confinado entre capas impermeables. Respecto a sus espesores presenta poca profundidad en la parte alta de la cuenca y mayor profundidad en la parte baja de la cuenca. Depende mucho de la parte estacional ya que a través de las precipitaciones tiene recarga inmediata. También, depende en gran medida de la topografía y la geomorfología de la terraza aluvial.

Para el aprovechamiento sostenible del acuífero se propone: mejorar la distribución de los pozos, recargar el acuífero mediante diques y tratar de disminuir el consumo de agua. Acerca del consumo sería recomendable impartir charlas a la población. Además, se debería reutilizar el agua mediante pretratamientos en el regadío de cosechas. Si se realiza una correlación entre el modelo geométrico, las zonas vulnerables y las zonas óptimas para construir diques para mejorar la recarga artificial del acuífero. Se podría controlar y en lo posible disminuir la intrusión salina.

Recomendaciones

Respecto a la gestión del acuífero se recomienda distribuir de forma más distante los pozos, ya que se está generando sobre explotación en la zona acuífera debido a la cercanía entre los pozos. Además, se recomienda brindar talleres a la población acerca del uso consciente del agua.

Respecto a la campaña geofísica se recomienda realizar los SEV con, por lo menos, tres personas. Y en lo posible, contar con la ayuda de personas locales, para el reconocimiento del terreno. Además, se recomienda generar más sondeos en la rívera norte del río y en lo posible realizarlos con mayor distancia entre sondeos

Respecto al modelamiento, si se requiere modelar en un detalle mayor, las zonas consideradas como semipermeables en este proyecto, es necesario, tomar datos de rumbo y buzamiento en varios puntos. Esto para obtener una forma más precisa de las estructuras.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (10 de Diciembre de 2001). *Agua Subterránea*. Obtenido de El agua potable: http://www.elaguapotable.com/ATSDR_El_Agua_Subterranea_Hoja_Informativa.htm
- Arévalo, M. (2017). *PROPUESTA DE DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN, ACONDICIONAMIENTO DE UN POZO DE AGUA Y SU INCIDENCIA EN LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO COSTERO EN MANGLARALTO*. Tesis de Maestría, ESPOL, FCNM.
- Borbor, A., & Vera, J. (2014). *Estudio para la Optimización de la Distribución de Agua para Consumo Humano, por parte de la Junta Regional de Manglaralto, Santa Elena, Ecuador*. Proyecto de grado, ESPOL, FICT, Guayaquil.
- CADS-ESPOL. (2013). *Proyecto de Evaluación de Vulnerabilidad y Reducción de Riesgo de Desastres a Nivel Municipal en el Ecuador. Análisis de vulnerabilidad del Cantón Santa Elena*. Santa Elena.
- Carrión et al. (2016). *RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN SANTA ELENA, EXPERIENCIA DE ORIGEN ANCESTRAL. CASO MANGLARALTO*. Artículo, Guayaquil.
- CIPAT-ESPOL. (2015). *Estudios Emergentes de Prospección Geoeléctrica para Determinar Sitios de Interés para la Construcción de Pozos de Agua para las Juntas Regionales de Valdivia y Manglaralto*. Informe técnico.
- Collazo, M., & Montaña, J. (2012). *Manual de agua subterránea*. Universidad de la República, Facultad de Ciencias. Montevideo: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. doi:ISBN: 978-9974-594-09-8
- Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA). (1992). *Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible. Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA)*. Dublín.
- Consejo Nacional de Recursos Hídricos. (2002). *DIVISIÓN HIDROGRAFICA DEL ECUADOR*. Memoria Técnica, MINISTERIO DEL AMBIENTE, UNIDAD DE CAMBIO CLIMATICO.

- Cornejo Martínez, M. (2006). *Polo de promoción minero ambiental en el contexto de la agenda local 21: Península de Santa Elena (Ecuador)*. Río de Janeiro: Programa Iberoamericano Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Diez, J. (2004). *Conceptos básicos de hidrología*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Obtenido de <http://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra/apuntes/unidad1.pdf>
- ESPOL TECH, E., & CIPAT. (2014). *ELABORACIÓN DEL MAPA HIDROGEOLÓGICO A ESCALA 1:250.000. Informe Final*. Guayaquil: SENAGUA.
- Fajardo, I., & Campoverde, J. (2017). *Contribución de la geología aplicada para la mejora en el diseño de un dique en la subcuenca del río Manglaralto, provincia de Santa Elena*. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), Guayaquil.
- FAO; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2010). *La labor de la FAO en el agua. Datos Clave*. (J. Morgan, Ed.) Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/water/es/>
- GAD Parroquia Manglaralto. (2015). *Manglaralto*. Obtenido de Datos geográficos: <http://manglaralto.gob.ec/index.php/ct-menu-item-17/ct-menu-item-35>
- Galárraga-Sánchez, R. H. (2000). Informe Nacional sobre la gestión del agua en Ecuador. En M. E. Zuñiga (Ed.), *Agua para el siglo XXI para América del Sur*. Quito: Global Water Partnership SAMTAC.
- GESTIONADMI CÍA. LTDA. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Rural Manglaralto 2014-2019*. Santa Elena: Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Manglaralto Administración 2014 - 2019.
- González, J. (2013). *El acceso al agua potable como derecho humano*. Alicante: Editorial Club Universitario. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=7vriBwAAQBAJ&pg=PA57&dq=la+falta+de+agua+potable+en+el+mundo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjWnNrcuKriAhXJ11kKHxYBDrUQ6AEIPDAE#v=onepage&q=la%20falta%20de%20agua%20potable%20en%20el%20mundo&f=false>
- Herrera, G. (2015). *Estudio para un Modelo de Gestión de un Acuífero Costero, mediante Metodologías Participativas y Análisis Geoestadístico en el marco del*

- Desarrollo Local. Manglaralto, Ecuador.* Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Madrid.
- Instituto Geológico Minero de España (IGME). (2015). *Conceptos básicos de hidrogeología.* España. Obtenido de http://aguas.igme.es/igme/publica/pdflib8/2_conceptos.pdf
- Merino, E. (2014). *EVALUACIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA EN UN ACUÍFERO COSTERO Y EL IMPACTO AL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE EN MANGLARALTO PROVINCIA DE SANTA ELENA.* Tesis de grado, ESPOL, FCNM, Guayaquil.
- Molina, E. (2013). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL. EDIFICIO MULTIFAMILIAR PUNTA PACÍFICO.* Santa Elena: Moscoso Arquitectos.
- Morante et al. (2019). *HYDROCHEMICAL AND GEOLOGICAL CORRELATION TO ESTABLISH THE SALINITY OF GROUNDWATER OF THE COASTAL AQUIFER OF THE MANGLARALTO-ECUADOR RIVER BASIN.* Artículo de conferencia, ESPOL, CIPAT, Guayaquil.
- Muñoz, P. (2014). *Objetivos del Milenio – Balance Ecuador .* Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (Senplades), Subsecretaría de Seguimiento y Evaluación, Quito.
- Navarro, A. (2016). *Conceptos básicos de hidrogeología.* Instituto Tecnológico Geominero de España , Aguas Subterráneas y Geotécnica , España. Obtenido de http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfjor_aguas_mine/1_conceptos.pdf
- Núñez del Arco, E., & Dugas, F. (1986). *GUÍA GEOLÓGICA DEL SUR OESTE DE LA COSTA ECUATORIANA.* Instituto Francés de Investigaciones Científicas. Guayaquil: ESPOL.
- Quinteros, V. (2013). *Propuesta de gestión del recurso agua mediante la utilización de conocimientos ancestrales en la parroquia Manglaralto.* Tesis Maestral, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil.
- Sánchez San Roman, J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea.* Universidad de Salamanca, Departamento de Geología. España: Createspace Independent Pub. Obtenido de http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf

Valencia, J. (2017). *ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MANGLARALTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUS SISTEMAS ACUÍFEROS*. Tesis de grado, ESPOL, FICT, Guayaquil.

Wolf, T. (1892). *Geografía y Geología del Ecuador*. Quito: Leipzig.

ANEXOS

ANEXO A: ESTUDIO ECONÓMICO

1. COSTOS DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Debido a que el proyecto es investigativo y científico el costo se centra en valorar los gastos debido a la modelización.

Estos costos incluyen el 21% de impuestos de valor añadido (IVA), excluyendo los costos personales.

1.1. COSTE DE PERSONAL

Para realizar el proyecto se necesita de personal como:

- Ingeniero/a superior sénior que dirija el proyecto. Este se encarga de supervisar y corregir el contenido de información.
- Ingeniero/a superior junior que haga la recopilación de datos de entrada y modelice el proyecto.
- Administrativo/a debido a que se requieren trámites en el proceso.

	Costo (\$/ hora)	Tiempo (horas)	Costo total (\$)
<i>Ing. Superior Senior</i>	20	100	2000
<i>Ing. Superior Junior</i>	12	960	11520
<i>Administrativo</i>	8	10	80
	Subtotal		13600

1.2. COSTE DE RECURSOS MATERIALES

1.2.1. Material informático

Para la realización del proyecto se recomienda tener una computadora portátil (laptop) y de escritorio de alta gama. El costo de estos equipos se incluye como un porcentaje

de amortización para cada proyecto en que se usen, dependiendo de la vida útil del equipo. Siendo la vida útil 6000 horas se ha calculado como:

	Precio (\$)	Amortización (\$/hora)	Uso (hora)	Costo (\$)
<i>Laptop</i>	1199	0.25	800	200
<i>Computador</i>	1499	0.35	300	105
	Subtotal			305

En este proyecto se hicieron uso de los softwares: Geomodeller®, ArcGis ® y el paquete Microsoft office 2010 ®. Se evalúan los costos para 6000 horas de vida útil.

	Precio (\$)	Amortización (\$/hora)	Uso (hora)	Costo (\$)
<i>Microsoft office 2010®</i>	170	0.03	200	6
<i>ArcGis®</i>	2400	4	250	1000
<i>Geomodeller®</i>	2000	1.22	510	622.2
	Subtotal			1628.2

Agrupando los costos de material informático y licencias se tiene:

COSTO	
EQUIPOS	305
LICENCIAS	1628.2
SUBTOTAL	1933.2

1.2.2. Material fungible

Se definen los materiales fungibles como papelería y materiales varios.

	<i>Costo (\$)</i>
<i>FUNGIBLES</i>	120
<i>Subtotal</i>	120

1.2.3. Gastos varios

Se incluyen una serie de gastos como: viajes a la zona de estudio, y gastos sin justificar.

	Costo (\$)
<i>Viajes</i>	200
<i>Gastos</i>	50
<i>Subtotal</i>	250

Sumandos todos los costos

	COSTO
MATERIAL INFORMÁTICO	1933.2
FUNGIBLES	120
GASTOS VARIOS	250
SUBTOTAL	2303.2

1.3. COSTOS PARCIALES

	COSTO
PERSONAL	13600
RECURSOS MATERIALES	2303.2
SUBTOTAL	15903.2

1.4. COSTES GENERALES Y GASTOS TOTALES

En los costes generales se incluyen suministros, reparaciones, gastos financieros y mantenimient. En este proyecto se estimó un 25% de los costos evaluados anteriormente.

	COSTO
COSTOS PARCIALES	15903.2
COSTOS GENERALES	3975.8
GASTO TOTAL	19879

ANEXO B: INFORMACIÓN DE LOS CAMPAÑAS GEOELÉCTRICAS

# SEV	CAPA	RESISTIVIDAD	PROFUNDIDAD
1	1	32.2	2.5
	2	5.59	32.8
	3	14.4	70.3
	4	1.07	---
2	1	17.8	2.72
	2	4.32	45.6
	3	1.46	72.2
	4	129	---
3	1	12.3	3
	2	5.12	22.1
	3	9.22	70.3
	4	0.987	---
4	1	10.9	0.698
	2	4.68	21.3
	3	1.2	71.7
	4	182	---
5	1	33	0.565
	2	9.79	6.39
	3	3.05	73.1
	4	4.82	---
6	1	42.9	0.5
	2	13.4	6.5
	3	3.77	45
	4	15.2	76.5
	5	0.108	---
7	1	9.21	0.5
	2	3.53	42.3
	3	26.2	56.4
	4	0.213	---
8	1	20.5	1.61
	2	3.57	8.73
	3	5.74	52.9
	4	7.63	---

# SEV	CAPA	RESISTIVIDAD	PROFUNDIDAD
9	1	26	0.634
	2	1.22	36.8
	3	4.58	76.3
	4	6.2	---
10	1	20.4	2.12
	2	4.79	52.2
	3	0.541	74.2
	4	184	---
11	1	22.8	2.07
	2	4.5	70.3
	3	3.41	---
12	1	14.7	1.44
	2	6.81	16.2
	3	3.57	50.8
	4	5.82	---
13	1	9.99	0.937
	2	3.21	59.1
	3	16.9	77
	4	2.36	---
14	1	27.1	1.41
	2	3.82	36.1
	3	0.85	74
	4	492	---
15	1	12.3	1.32
	2	5.95	11.8
	3	3.73	78.8
	4	0.361	---
16	1	25.3	0.869
	2	118	1.1
	3	24.8	51.2
	4	2.34	---

# SEV	CAPA	RESISTIVIDAD	PROFUNDIDAD
17	1	2.89	4.45
	2	15.6	6
	3	2.61	76.5
	4	289	---
18	1	8.02	4.15
	2	19.4	5.09
	3	2.48	71.2
	4	3.17	---
19	1	9	1.9
	2	4.41	12.8
	3	2.15	70.6
	4	1.73	---
20	1	3.03	0.852
	2	20.68	2.246
	3	1.89	51.06
	---	5.368	---
21	1	19.7	1.08
	2	11.3	5.08
	3	5.66	51.01
	4	2.88	---
22	1	14.2	2.74
	2	4.68	71.4
	3	1.05	80.6
	4	2.17	---
23	1	8.84	1.44
	2	6.09	19.3
	3	2.8	77.1
	4	3.53	---
24	1	13.5	3.77
	2	3.15	75.9
	3	5.33	---

# SEV	CAPA	RESISTIVIDAD	PROFUNDIDAD
25	1	16.1	2.58
	2	5.85	12
	3	16.1	25.2
	4	3.07	74.9
	5	16.4	---
26	1	88.5	0.307
	2	6.31	70.3
	3	1.05	---
27	1	73.4	0.652
	2	10.4	4.36
	3	6.72	54.6
	4	6.16	---
28	1	49.6	1
	2	3.98	2.27
	3	50.6	2.89
	4	6.44	53.8
	5	6.57	---
29	1	78.6	0.57
	2	12.5	3.26
	3	6.84	52.7
	4	6.06	---

ANEXO C: INFORMACIÓN DE LOS SONDEOS

				CODIGO	SEV-01-MC	SEV-02-MC	
				FECHA:	12/03/2019	19/03/2019	
				NOMBRE DEL SONDAJE:	SEV-43	SEV 44	
				COORDENADAS X:	529004	529092	
				COORDENADAS Y:	9796539	9796799	
				COORDENADAS Z:	7m	12	
Estación	Abertura	Abertura	Constante	Resistencia (ohm)		Resistividad	Resistividad
Punto	AB/2	MN/2	K	R		ρ (Ω m)	ρ (Ω m)
1	1	0.2	7.54	3.7242	Ω	28.08	26.6728
2	1.47	0.2	16.66	1.693	Ω	28.21	26.4594
3	2.15	0.2	35.99	679.01	m Ω	24.44	24.3991
4	3.16	0.2	78.11	273.95	m Ω	21.40	23.5017
5	4.64	0.2	168.78	93.5885	m Ω	15.80	19.3253
6	4.64	0.5	66.85	207.51	m Ω	13.87	16.4043
7	6.81	0.2	363.92	31.392	m Ω	11.42	13.6757

8	6.81	0.5	144.91	68.948	mΩ	9.99	11.4264
9	10	0.5	313.37	22.738	mΩ	7.13	7.8054
10	14.7	0.5	678.08	8.0133	mΩ	5.43	4.8669
11	14.7	2	166.58	31.969	mΩ	5.33	4.6666
12	21.5	0.5	1451.42	3.3036	mΩ	4.79	5.4305
13	21.5	2	359.91	12.9	mΩ	4.64	4.4298
14	31.6	2	781.13	6.1258	mΩ	4.79	5.3082
15	46.4	2	1687.79	3.1291	mΩ	5.28	4.8264
16	46.4	5	668.52	8.4429	mΩ	5.64	4.3718
17	68.1	2	3639.24	4.94	mΩ	17.98	7.8735
18	68.1	5	1449.1	3.867	mΩ	5.60	5.1429
19	100	5	3133.75	1.6685	mΩ	5.23	2.0257
20	100	10	1555.09	3.4867	mΩ	5.42	3.8627
21	215	10	7245.3	0.6418	mΩ	4.65	7.8312
22	215	20	3599.09	1.2898	mΩ	4.64	4.8270
23							9.97460093
24							6.620763348

