

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Modelo numérico de flujo y transporte de un acuífero costero, basado en la importancia hidráulica del diseño de un dique (tape) y su incidencia en la calidad del agua. Manglaralto–Ecuador.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERÍA EN GEOLOGÍA

Presentado por:

Boris Hamilton Apolo Masache

María Carolina Loor Flores de Valgas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a mis padres Hamilton y Delicia, las dos personas más importantes en mi vida y que sin ellos no hubiera llegado a este momento de mi vida. Mis hermanos Marcelo y Carolina, abuelos y familiares, quienes me brindan su apoyo y por quienes me esfuerzo día a día. A mi novia Claudia, quien me ha brindado fuerzas y acompañado en este largo trayecto de mi vida académica.

Para todos ellos, este logro va por ustedes.

Boris Hamilton Apolo Masache

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi abuelo Guido Loor que está en el cielo, Él es mi mayor inspiración y ejemplo a seguir, también a mis padres Octavio y Teresa, a mis tres hermanas: Karen, Scarlet y Katya, a mi abuelita (mami tita) y a mis tíos: Rolando, Lorena y Jorge que han sido incondicionales en mi vida.

María Carolina Loor Flores de Valgas

AGRADECIMIENTOS

Agradecido con Dios por permitirme llegar a culminar este proyecto y a mis padres que sin ellos no habría llegado hasta esta etapa de mi vida.

Mi más sincero agradecimiento a mi apreciado tutor el Dr. Paúl Carrión por ser mi guía y brindarme de su apoyo incondicional en cada momento. Al Dr. Fernando Morante por sus consejos y ayuda, al Dr. Javier Montalván por su guía en el seguimiento en este proyecto. A todo el equipo de CIPAT (Gabriela, Josué, María Fernanda, Maribel, Ximena, Don Carlos) por la ayuda brindada. Así también, agradezco a cada uno de los directivos y trabajadores de JAAPMAN por estar siempre atentos en brindarnos su ayuda. Además, a mis maestros que han ayudado en mi formación profesional y humana durante toda mi carrera universitaria.

Boris Hamilton Apolo Masache

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por darme fortaleza en los momentos difíciles y ayudarme a no desistir. A mis padres, ya que sin su apoyo esto no hubiera sido posible. A mi novio José Franco que ha estado presente en toda mi trayectoria académica y ha sido un pilar fundamental en mi vida.

A mis tutores, el PhD. Paúl Carrión, quien me ha brindado su confianza y apoyo incondicional desde que empecé en la carrera y me ha motivado para crecer profesionalmente, al PhD. Fernando Morante, quien siempre estuvo presto a compartir sus conocimientos y experiencias, y al PhD. Javier Montalván, agradezco su paciencia y sabiduría para guiarnos a lo largo de este proyecto.

También a mis compañeros del CIPAT y a los Miembros de la JAAPMAN por estar siempre prestos a ayudarnos en este trabajo, a mis compañeros y amigos de la universidad que hicieron mis días más llevaderos y a todos mis profesores que han aportado en mi desarrollo académico-profesional y personal.

María Carolina Loor Flores de Valgas

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Boris Apolo y María Carolina Loor*, damos nuestro 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”

Boris Apolo

María Carolina Loor

EVALUADORES

M.Sc David Altamirano

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Paúl Carrión, PhD.

PROFESOR TUTOR

Ing. Fernando Morante, PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los acuíferos costeros son parte de los recursos naturales que aportan al desarrollo local y propician la resiliencia en las comunidades más vulnerables aledañas al mar. Manglaralto, una parroquia costera ecuatoriana, es afectada por la escasez del recurso hídrico, presentando un clima semiárido y un acuífero alimentado por las bajas precipitaciones en la cuenca. El aumento de la salinidad y deterioro de la calidad del agua es generado por la demanda de la población local y flotante, provocando el aumento de las concentraciones de Sólidos Disueltos Totales (TDS) y la disminución de los niveles piezométricos del acuífero. Se plantea como objetivo establecer un modelo numérico de flujo y transporte del acuífero costero Manglaralto, mediante el uso de datos hidrogeológicos y la aplicación del Software Visual Transin 4.0, relacionando la importancia hidráulica del diseño de un dique (tape) y su incidencia en la calidad del agua. La metodología aplicada se centra en: i) el análisis de la base de datos hidrogeológicos, ii) la recarga del sistema respecto al balance hídrico del suelo, iii) condiciones de contorno del modelo de flujo y transporte y, iv) presentación de los resultados y validación de la simulación numérica. Los resultados configuran la especial trascendencia de la recarga artificial del acuífero costero en la zona donde se ubica el tape, reflejándose en el aumento de los niveles piezométricos y la disminución de la salinidad en los pozos cercanos al mar. Se concluye que el modelo numérico de flujo y transporte permite ampliar el conocimiento de la variación de los niveles piezométricos y concentraciones TDS en el tiempo, la importancia de la recarga (natural y artificial) en el funcionamiento del sistema hidrogeológico, permitiendo una correcta gestión comunitaria para conseguir la resiliencia y proyección al desarrollo sostenible.

Palabras claves: Acuífero costero, recarga, intrusión salina, modelo numérico de flujo y transporte, tape-dique.

ABSTRACT

Coastal aquifers are part of the natural resources contributing to local development and promote resilience in the most vulnerable communities near the sea. Manglaralto, an Ecuadorian coastal parish, is affected by water resource scarcity. The increase in salinity and deterioration of the water quality is generated by the local and floating population's demand, causing an increase in the concentrations and decreasing the aquifer's piezometric levels. The aim is to establish a numerical model of flow and transport of the Manglaralto coastal aquifer by using hydrogeological data and Visual Transin 4.0 Software, relating the hydraulic importance of a dike's design ("tape") and its impact on the quality of the water. The methodology is i) hydrogeological database analysis, ii) the system's recharge concerning the soil water balance, iii) boundary conditions of the flow and transport model and, iv) results and validation of the numerical simulation. The results configure the importance of the coastal aquifer's artificial recharge in the area where the tape's located, reflected in the increase in piezometric levels and the decrease in salinity in wells near the sea. In conclusion, the numerical model of flow and transport allows expanding the knowledge of the variation of the piezometric levels and TDS concentrations over time, the importance of recharge in the hydrogeological system's operation, and correct community management resilience and projection to sustainable development.

Keywords: Coastal aquifer, artificial recharge, seawater intrusion, flow and transport numerical model, dyke

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	VII
RESUMEN.....	VII
<i>ABSTRACT</i>	IX
ÍNDICE GENERAL	X
ABREVIATURAS.....	XIII
SIMBOLOGÍA.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVII
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Justificación del problema	6
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Marco teórico.....	8
1.4.1 Red Hidrográfica.....	8
1.4.2 Hidrometeorología	9
1.4.3 Hidrogeología.....	9
1.4.4 Acuíferos.....	10
1.4.5 Tipos de acuíferos	11
1.4.6 Acuíferos costeros	11
1.4.7 Intrusión salina.....	12
1.4.8 Balance hídrico de suelo.....	12
1.4.9 Recarga artificial	13

1.4.10	Demanda de agua	13
1.4.11	Técnicas para el embalse del agua (dique)	13
1.4.12	Ley de Darcy.....	14
1.4.13	Modelo numérico	15
1.5	Marco geográfico y geomorfológico.....	16
1.6	Marco geológico	18
1.6.1	Formación Cayo (Cretácico Superior).....	19
1.6.2	Formación San Eduardo (Eoceno Medio).....	19
1.6.3	Grupo Ancón (Eoceno medio-superior)	20
1.6.4	Formación Tosagua (Mioceno Inferior al Medio).....	20
1.6.5	Formación Tablazo (Pleistoceno-Holoceno)	21
1.6.6	Aluvial (Holoceno).....	21
1.7	Marco tecto-estructural.....	22
CAPÍTULO 2.....		26
2	METODOLOGÍA.....	26
2.1	Materiales.....	26
2.1.1	Información científica	26
2.1.2	Modelo Conceptual.....	27
2.1.3	Equipos e instrumentos	28
2.1.4	Easy Balance	30
2.1.5	Visual Transin	31
2.1.6	Transdens.....	32
2.2	Metodología general.....	32
2.2.1	Fase I.....	33
2.2.2	Fase II.....	37
2.2.3	Fase III.....	40
2.2.4	Fase IV	43

CAPÍTULO 3.....	45
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
3.1. RESULTADOS	45
3.1.1 Base de datos hidrogeológicos	45
3.1.2 Balance hídrico del suelo	46
3.1.3 Balance de masas	48
3.1.4 Modelo numérico de flujo y transporte	48
3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
CAPÍTULO 4.....	62
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
4.1. Conclusiones.....	62
4.2. Recomendaciones.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXOS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	i
Anexo. 1. Tablas con datos mensuales calculados	iv
Anexo. 2. Hidrogramas	v
Anexo. 3. Trabajo en campo por CIPAT-ESPOL y JAAPMAN	xxi

ABREVIATURAS

AGUAPEN	Agua de la Península (Empresa pública municipal mancomunada)
CIPAT	Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ETP	Evapotranspiración Potencial
Fm.	Formación
HP	Caballo de fuerza (HorsePower en inglés)
JAAPMAN	Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto
M.	Miembro
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
P2, P3,...P12	Pozo (enumerados del 2 al 12)
SEVs	Sondeos Eléctricos Verticales
TDS	Total de Sólidos Disueltos

SIMBOLOGÍA

ha	Hectárea
hm ³ /a	Hectómetro cúbico/año
km ²	Kilómetros cuadrados
l	Litro
m	Metro
mg	Miligramo
ml	Mililitro
mm	Milímetro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
m/d	Metros/día
pH	Potencial de Hidrógeno
°	Grados
%	Porcentaje

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de agua en el planeta.	1
Figura 1.2 Movilización del agua subterránea.	10
Figura 1.3. Mapa de ubicación de la parroquia rural Manglaralto.....	17
Figura 1.4. DEM de la cuenca del río Manglaralto.....	18
Figura 1.5. Mapa litológico estructural de la división hidrográfica Manglaralto.	22
Figura 1.6. Mapa de fallas locales situadas en la cuenca del Río Manglaralto.	23
Figura 1.7. Perfil geológico de Manglaralto (HOJA 4, Edición 1-1974).....	24
Figura 1.8. Columna estratigráfica del corte A-B en el Mapa Geológico de Manglaralto.	25
Figura 2.1. Modelo conceptual del sistema hidrogeológico del acuífero de la cuenca Manglaralto.....	28
Figura 2.2. Estructura de Easy Balance.	30
Figura 2.3. Esquema metodológico.	33
Figura 2.4. Mapa de ubicación de los pozos en la cuenca del río Manglaralto.	35
Figura 2.5. Mapa geológico del área de estudio.....	38
Figura 2.6. Zonificación del acuífero (primera capa).	41
Figura 2.7. Condiciones de contorno del modelo de flujo.....	41
Figura 2.8. Condiciones de contorno del modelo de transporte.	42
Figura 3.1. El ajuste estadístico entre los niveles medidos y calculados.....	49
Figura 3.2. Modelo de flujo en densidad constante e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.....	52
Figura 3.3. Modelo de transporte en densidad constante e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.....	54
Figura 3.4. Modelo de flujo de densidad variable e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.	56
Figura 3.5. Modelo de transporte de densidad variable e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.....	58
Figura 3.6. Síntesis esquemática del sistema hidrogeológico del acuífero costero Manglaralto.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Proyectos relacionados con el área de estudio.	26
Tabla 2.2. Equipos utilizados en el registro de datos.	29
Tabla 2.3. Registro de datos de cada pozo.	34
Tabla 2.4. Valores de precipitaciones y temperaturas mensuales.....	36
Tabla 2.5. Condiciones de contorno en el problema de flujo.	42
Tabla 2.6. Condiciones de contorno en el problema de transporte.	43
Tabla 3.1. Valores máximos mensuales obtenidos en la recarga y ETP del sistema....	47
Tabla 3.2. Datos anuales de las precipitaciones y valores obtenidos en la recarga y ETP.	47
Tabla 3.3. Características del suelo.	47
Tabla 3.4. Parámetros calibrados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del modelo de flujo en densidad constante y variable.	50

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1. 1)	14
Ecuación (1. 2)	14
Ecuación (1. 3).....	15
Ecuación (1. 4)	15
Ecuación (2. 1).....	40
Ecuación (2. 2)	40
Ecuación (2. 3)	40
Ecuación (2. 4)	40

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

El agua dulce es considerada como un recurso natural e indispensable para toda la vida en el planeta. Además, es esencial para realizar cualquier actividad humana, promoviendo el desarrollo social y económico de un país (Carrión et al., 2018). Sin embargo, tan solo el 2.5% de agua corresponden a agua dulce y, lamentablemente no todo ese porcentaje está disponible. En la Figura 1.1 Se muestra la distribución de agua en el mundo, donde se establece que el 70% de agua dulce se encuentra congelada; el 30% es agua subterránea y tan solo 1% se presenta de forma superficial que es utilizada para consumo humano y alimentar los ecosistemas, incluyendo los sectores agropecuarios, industriales y municipales (Fondo para la comunicación y educación ambiental, 2017).



Figura 1.1. Distribución de agua en el planeta.
(Fondo para la comunicación y educación ambiental, 2017).

El requerimiento del recurso hídrico se siente cada vez más latente, esto se debe a diferentes factores como: crecimiento poblacional, mayor demanda en el sector productivo y al aumento de la urbanización e industrialización (UNESCO, 2015), lo que genera serios problemas en el abastecimiento total de los sectores mencionados, especialmente el más vulnerable e importante, el consumo humano. Según un informe de (Water Resources Group, 2009) estima que para el año 2030 a nivel global se tendrá un déficit del 40% de agua relacionado al cambio climático actual, es decir si las condiciones actuales no mejoran. Se enfatiza los riesgos futuros de no tomar las medidas necesarias para cuidar el medio ambiente en la disponibilidad y suministro de agua en todo el mundo. Por otro lado, (WWAP, 2014) indica que la mala gestión y distribución del agua es lo que genera la crisis hídrica mundial, mas no su escasez.

En América Latina y el Caribe las cifras de disponibilidad de agua y saneamiento están en ventaja en comparación a otros países con las mismas condiciones económicas y sociales (Hantke-domas & Jouravlev, 2011). Aunque a simple vista se identifique como algo positivo, realmente estas cifras no coinciden con la realidad y tienden a extralimitarse, ya que existen notorios problemas en la disponibilidad y calidad del agua, especialmente para las personas de bajos recursos que habitan en zonas rurales (Hantke-domas & Jouravlev, 2011). No obstante, estos países gozan de agua en abundancia y son favorecidos por sus condiciones climáticas debido a su ubicación geográfica, además de su principal objetivo de garantizar una adecuada gestión, logrando así el desarrollo sostenible de las comunidades (UNESCO, 2015).

Aproximadamente el 50% de la población a nivel mundial se provee de agua potable mediante un acuífero, es decir, de agua subterránea y se estima que cerca de 2,500 millones de habitantes necesitan de este recurso para realizar sus actividades diarias (UNESCO-PHI, 2012), dándole a este recurso un valor único para las comunidades que se abastecen del mismo. Por ello, es de gran importancia la correcta gestión y uso. En los acuíferos costeros existen factores que pueden perjudicar su empleo, entre estos se tienen: la sobreexplotación, cambio climático, crecimiento poblacional, bajas precipitaciones, disolución de materiales e intrusión del agua de mar (Ferguson & Gleeson, 2012; Gleeson et al., 2012).

La intrusión salina es uno de los factores que genera mayores problemas en los acuíferos costeros, donde las comunidades aledañas al mar sufren grandes consecuencias por el aumento de la concentración en el agua subterránea, especialmente provocado por el ingreso del agua de mar. A raíz de esto, se han realizado algunos estudios y modelos numéricos de densidad constante y variable para vincular el origen del agua dulce en los acuíferos (que mayormente viene dado por las precipitaciones) y como perjudica el avance del mar al mismo (Huyakorn et al., 1987), entre esos se tiene al modelo SEAWAT-2000, ejecutado en MODFLOW y MT3DMS, en el cual se utilizó el método de diferencias finitas (Lathashri & Mahesha, 2015; A. D. Werner et al., 2013).

En Santa Elena, una provincia costera ecuatoriana, presenta problemas en la distribución y suministro de agua que cubra las necesidades de sus comunas (El Universo, 2015). En la zona sur, se provee por medio del trasvase Daule-Santa Elena proveniente de la cuenca del río Guayas, mientras que en la parte norte, que corresponde principalmente a sectores rurales, el abastecimiento de agua se obtiene por medio de los acuíferos costeros (Morante et al., 2019).

En la parroquia rural Manglaralto, se utiliza como fuente principal el agua subterránea, la cual se obtiene del acuífero costero emplazado en la cuenca, donde la Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), una empresa formada por los mismos habitantes de la comuna, es la encargada de gestionar y distribuir el agua a siete comunas: Cadeate, Nueva Montañita, Simón Bolívar, Río Chico, San Antonio, Montañita y Manglaralto (Gricelda et al., 2018), por medio de sus 13 pozos perforados.

Manglaralto ha sido seleccionado para múltiples estudios, ya que es considerado un laboratorio natural. Además, genera gran interés para muchos investigadores debido a que la gestión del agua se lleva a cabo gracias a la participación activa de la comunidad, y el rescate del conocimiento ancestral, donde existen partes involucradas de gran relevancia, como La Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Escuela Superior Politécnica del Litoral, (ESPOL), que junto a la comunidad han trabajado arduamente en cubrir la demanda de agua al implementar tapes (diques), evitar la sobreexplotación del acuífero y el aumento participativo de las comunidades en la gestión del agua (Gricelda et al., 2018).

Debido a la crisis global por el COVID-19, se resalta la importancia del acuífero para la resiliencia de esta parroquia, ya que al ser una zona caracterizada por la escasez de agua (Carrión et al., 2018), la JAAPMAN ha logrado satisfacer a sus consumidores, proporcionando el recurso hídrico para una higiene adecuada, y permitiendo la reactivación del sector turístico, ya que es considerado su principal recurso económico (Herrera Franco et al., 2009).

El presente trabajo tiene como objetivo establecer un modelo numérico de flujo y transporte del acuífero costero Manglaralto, por medio del uso de datos hidrogeológicos y la aplicación del Software Visual Transin 4.0, relacionando la importancia hidráulica del diseño de un dique (tape) y su incidencia en la calidad del agua. Esta propuesta contribuye en la resiliencia y desarrollo sostenible del acuífero costero de Manglaralto, de esta manera se podrá estimar el funcionamiento del dique y su relevancia en la recarga artificial, además de contribuir en la geoturismo y geo-biodiversidad del sector.

1.1 Descripción del problema

El agua subterránea extraída de los acuíferos, especialmente en los sectores costeros a nivel mundial puede ser afectada por diversos factores, tales como la intrusión salina, extracción no controlada, cambios climatológicos, precipitaciones irregulares, disolución de materiales por la infiltración del cauce del río y demás de factores sociológicos y geográficos.

Los acuíferos de agua dulce son un recurso cada vez más deseable, por ejemplo en un acuífero kárstico, la intrusión salina se produce como una cuña de agua salada en los medios porosos (Arfib et al., 2007), lo que representa una dificultad mundial que afecta a las comunidades que utilizan las aguas subterráneas, así como el acuífero costero de Catania en Sicilia (sur de Italia), el cual establece mediante una investigación hidroquímica e hidrogeológica que la intrusión salina presente cerca de la costa es atribuida al incremento del consumo de agua por parte de la planta industrial local (Capaccioni et al., 2005). Este recurso natural demuestra su valor único como motor de desarrollo económico y social de la comunidad costera (G. Herrera-Franco et al., 2020), varios estudios se han realizado a través de modelos hidrogeológicos globales y redes neuronales enfocados en los acuíferos, donde exponen que generalmente, la recarga

natural no compensa la extracción de agua subterránea (Carrión et al., 2018; Hani et al., 2006), por tal motivo debe ser gestionado adecuadamente por las organizaciones gubernamentales existentes.

En el caso del acuífero costero Manglaralto, se han identificado distintas causas que perjudican la obtención, calidad y aprovechamiento del recurso hídrico, tales como: la intrusión salina, fenómenos climatológicos que inciden en las irregulares precipitaciones, presencia de un clima semi-árido y la sobreexplotación del acuífero debido al incremento de la población local y flotante (turistas), construcción de nuevas viviendas en áreas urbanizadas y aumento del sector agrícola, todas estas causas se reflejan en la disminución de los niveles piezométricos de cada pozo.

La JAAPMAN alcanza a cubrir las necesidades de la mayoría de los habitantes de Manglaralto por medio del agua por tubería, la población restante recurre emplear otras alternativas como pozos clandestinos, albarradas, tanqueros, entre otras fuentes, debido a las causas expuestas anteriormente. Al ser una empresa con escasos fondos monetarios y no contar con apoyo económico por parte del gobierno, se vio en la necesidad de solicitar asesoramiento en la gestión del agua a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) que mediante el Centro de Investigación Aplicada de Ciencias de la Tierra (CIPAT) han trabajado conjuntamente desde el 2005. Gracias a este vínculo se han implementado posibles soluciones para esta problemática, aplicando técnicas que ayuden al rescate del conocimiento ancestral como la construcción de diques (tapes) en el cauce del río, permitiendo la acumulación y almacenamiento del agua superficial que influye significativamente en la recarga artificial del acuífero y el aumento de su geo-biodiversidad (Gricelda Herrera-Franco, 2015).

La salinidad del acuífero costero se ve reflejado por la alta demanda de agua por los turistas en épocas altas, provocando la disminución de los niveles piezométricos y por ende, el deterioro en la calidad del agua. Por lo tanto, ¿es posible establecer un registro de datos hidrogeológicos mediante el uso del Software Visual Transin para generar un modelo numérico de flujo y transporte?, además ¿es posible determinar el avance de la intrusión salina mediante el modelo numérico de flujo y transporte para conocer la influencia de un dique (tape) en la hidráulica y densidad del agua subterránea?

1.2 Justificación del problema

Dada la problemática planteada, se opta por mostrar una propuesta de proyecto integrador con un enfoque especial a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), tales como: El ODS 1 (Fin de la Pobreza Salud y Bienestar) por medio del adecuado suministro de agua potable y control de calidad como fuente para el desarrollo turístico, uso agricultura, consumo doméstico y demás actividades; El ODS 3 (Agua limpia y Saneamiento) actualmente se centra en la resiliencia que brinda el acuífero costero Manglaralto para el cuidado de la higiene, el tratamiento de aguas residuales y promover el uso responsable de este recurso por parte de los consumidores en la lucha contra el COVID-19; El ODS 6 (Ciudades y comunidades sostenibles) enfatiza como el servicio de agua potable abastece a la población local y flotante (turistas), alberga nuevas construcciones residenciales y futuras inversiones que generan desarrollo sostenible en la comunidad; El ODS 13 (Acción por el clima) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres) están relacionados al presente proyecto por la aplicación del conocimiento ancestral en la implementación de diques (tapes) que pueden ser técnicos artesanales o contruidos con materiales del medio (piedras, palos, arena) en el cauce del río, los cuales cumplen con la finalidad de almacenar el agua superficial, incidiendo en la recarga artificial del acuífero y la conservación de la geo-biodiversidad del sector.

Basados en la constitución de la República del Ecuador del 2008, la cual establece que: *“El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida”* (Constitución de la Republica del Ecuador, 2008). Lo que permite respaldar la importancia y cuidado de este recurso para la vida misma y prosperidad de todo ser humano.

De esta manera se logra incentivar nuevas estrategias para el manejo del agua en las actividades diarias de cada comunidad, tales como el uso doméstico, y demás actividades enfocadas sector productivo y económico. Sin olvidar que, el derecho al agua es un privilegio de cada ciudadano que no depende de las clases sociales o económicas.

La parroquia Manglaralto, Santa Elena-Ecuador, no cuenta con el servicio de agua potable que brinda AGUAPEN (Empresa pública encargada de la distribución de agua

potable en la Península de Santa Elena), ya que no alcanza la distribución en el norte de la provincia. Por lo cual, la JAAPMAN fue formada con la finalidad de aprovechar el agua subterránea proveniente del acuífero costero Manglaralto, que a su vez es considerado como uno de los geositios para el Proyecto Geoparque de la Península de Santa Elena (El Universo, 2015).

La denominación de tape es un término ancestral-cultural que los comuneros asignan a la acumulación de rocas y sedimentos en ciertas partes estratégicas del cauce del río. La implementación del tape asegura mayor volumen de captación de agua superficial, que propicia la infiltración y con ello el aumento de la recarga artificial en el tiempo, mejorando la capacidad del acuífero costero.

El recurso agua, estratégicamente es para uso doméstico y actividades productivas vinculadas al turismo y agricultura de la comunidad. Además, se da relevancia al rescate del conocimiento ancestral aumentando la recarga artificial del acuífero, por medio del almacenamiento de agua en el cauce del río, promoviendo la creación de un micro ecosistema que influya en la geodiversidad, biodiversidad y el geoturismo del sector.

El recurso hídrico es considerado el motor de la economía y desarrollo local de esta parroquia costera ecuatoriana. Por lo que, el conocimiento del avance de la intrusión salina promueve el control y consideración de medidas técnicas, que a su vez, con una implementación adecuada de seguridad e higiene del agua extraída de los pozos, así como el tratamiento de las aguas residuales, proporcione ayuda en la lucha contra el COVID-19.

Por ello, el presente estudio se enfoca en establecer un modelo numérico de flujo y transporte, que permita comprender la situación actual de los niveles piezométricos acuífero costero Manglaralto, relacionando la incidencia del dique (tape) y el desarrollo de técnicas para el control del avance de agua de mar, su sobreexplotación y mejora en la calidad de agua.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Elaborar un modelo numérico de flujo y transporte del acuífero costero Manglaralto, utilizando datos hidrogeológicos para la comprensión de la incidencia del tape en el avance de la intrusión salina y en la calidad del agua.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Registrar la variación de los niveles piezométricos y concentraciones TDS del acuífero Manglaralto por medio de la base de datos de JAAMPAN y CIPAT-ESPOL, para su respectivo procesamiento en el Software Visual Transin.
2. Determinar el balance hídrico del suelo mediante el Software Easy Balance para la estimación de la Evapotranspiración Potencial, la recarga diaria, mensual y anual del acuífero.
3. Analizar las directrices para el diseño del tape mediante criterios sostenibles para su funcionamiento óptimo en la recarga artificial del acuífero.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Red Hidrográfica.

La red hidrográfica está caracterizada principalmente por la circulación constante de agua a causa de las precipitaciones en una determinada zona, lo que beneficia considerablemente a personas, animales y plantas, dada la aportación del líquido vital y vinculación con diversas zonas donde existe el aporte o concentración de cierta proporción de agua. Este tipo de red permite distinguir el conjunto de sectores que contribuyen a la circulación o sistema hidrográfica, quienes a través de un estudio y Software generen modelos que permitan visualizar superficialmente la distribución de las cuencas y subcuencas por donde fluye constantemente el agua, además de las componentes principales o catastro de una urbe (Morena & Rodriguez, 2008).

Un sistema hidrográfico que se enfoca estrictamente en una cuenca permite identificar las zonas de gran aportación de agua superficial, su interconexión con otras subcuencas y la posible estimación de la cantidad de masas de agua que desembocarían en un punto en común (García Charria, 2015).

La parroquia de Manglaralto, provincia Santa Elena-Ecuador, posee una cuenca denominada Río Manglaralto y demás subcuencas hidrográficas pertenecientes al Sistema Hídrico Zapotal (Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002).

1.4.2 Hidrometeorología

La Hidrometeorología es una herramienta apta que permite procesar los datos o información captada en las estaciones meteorológicas, las cuales son instaladas por organismos individuales o gubernamentales en diferentes lugares de estudio, permitiendo así, tener acceso a un registro histórico o inventario de diversos parámetros meteorológicos como la evolución del clima a través del tiempo (temperaturas), además de la cantidad de precipitaciones y escorrentías que brinda estas estaciones situadas en una subcuenca de en una determinada zona (Allende & Mendoza, 2007; Carretero, 2007).

1.4.3 Hidrogeología

La hidrogeología es el estudio del agua subterránea, sus propiedades, medio de movilización y demás factores que intervienen durante el ciclo hidrológico del agua, además de su posterior almacenamiento en los denominados acuíferos (J. Werner, 1996).

El agua subterránea es el producto de la infiltración de agua superficial por medio del subsuelo hasta llegar a una zona o capa de suelo en el cual se almacenaría (Figura 1.2). La infiltración puede darse de forma natural debido a las precipitaciones o acumulación de agua como en pequeñas vertientes, ríos y lagos, así también puede existir una infiltración de agua superficial de forma artificial por medio del riego a causa de la agricultura, represamiento de agua en los ríos por medio de diques, canales de

infiltración y por inyección directa en el acuífero por medio de los mismos pozos de extracción.

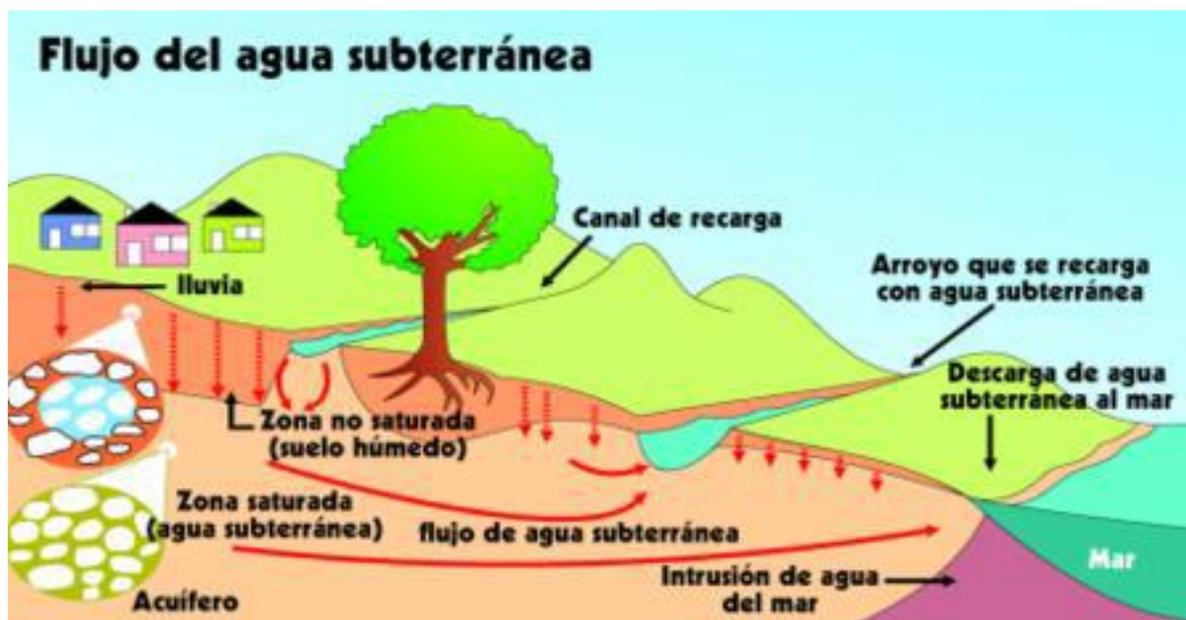


Figura 1.2 Movilización del agua subterránea.
(Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), 2001).

Durante la circulación del agua por medio de las capas de suelo hasta el acuífero, se da la presencia de dos zonas como es la saturada y no saturada. La zona saturada comprende un tipo de suelo poroso (estrato con material de poros vacíos y permeables) el cual se encuentra lleno de agua, mientras que la zona no saturada es aquella capa de suelo que contiene los poros del estrato geológico llenos de aire, además de ello, esta zona se encuentra dividida en tres franjas conocidas como franja de evapotranspiración (abundante materia orgánica y actividad biológica), franja intermedia (hay aireación y capilaridad de agua) y la franja capilar (marca el límite entre la movilización de agua y el nivel freático).

1.4.4 Acuíferos

En general los acuíferos están localizados en las zonas saturadas, es decir, en aquellas capas de suelo o estratos altamente porosos (material del suelo con gran cantidad de poros o espacios vacíos que pueden ser ocupados por agua infiltrada) y permeables (capacidad que tiene el estrato de dejar circular el agua).

1.4.5 Tipos de acuíferos

Según el material que compone los acuíferos y especialmente su estructura, estos pueden ser clasificados en tres principales tipos que son: Acuíferos confinados, aquellos en los que la zona saturada (donde se almacena el agua) se encuentra entre dos tipos de estratos diferentes e impermeables, es decir que no permiten el paso del agua subterránea por lo que este acuífero se encontraría en confinamiento. Acuíferos semiconfinados, en los que la capa o estrato superficial que los cubre posee una permeabilidad baja (denominada como acuitardo), lo que permite la circulación del agua en baja proporción. Acuífero libre, quienes poseen una capa superficial de suelo que es totalmente permeable, lo que permite el flujo constante de agua sin la necesidad de ser extraída por medio de pozos.

Por otro lado, teniendo en cuenta el medio por el cual se almacena el agua en el acuífero, estos pueden ser clasificados en: Porosos, por el cual el agua es almacenada en los espacios vacíos (poros) o intergranular de los estratos o materiales presentes en el suelo como gravas y arenas karstificados y/o saturados, especialmente en materiales que han sufrido algún tipo de agrietamiento o fracturamiento por diversos factores, tal como lo es en la disolución de materiales (por ejemplo en yesos, dolomías o calizas) o en la fracturación de materiales que son insolubles.

Finalmente, según el lugar del continente en el cual se sitúen pueden ser considerados como interiores (aquellos que están alejados del mar, internos al continente) o costeros (acuíferos que son cercanos al mar, alejados del interior del continente).

1.4.6 Acuíferos costeros

Los acuíferos costeros son una clasificación dada la posición geográfica que posee, estos se encuentran muy cercanos al mar y son muy propensos a sufrir afectación por causa de la intrusión salina (avance de agua de mar al interior del acuífero).

Dentro del ciclo hidrológico o natural del agua, se tiene que este tipo de acuífero se localiza en la fase final, por lo que es el último almacenador de agua subterránea que recoge el agua de otros acuíferos e incluso por medio de la infiltración de aguas

superficiales dada las precipitaciones y ríos, para finalmente ser enviados al mar donde se cumple su ciclo natural.

Por otro lado, al estar localizados en la costa del continente no es raro encontrar que estos acuíferos están constituidos de capas de diversos materiales como gravas, arenas, limos y arcillas, que conforman diversas geomorfologías como deltas, aluviales y llanuras (López & Gómez, 2007).

1.4.7 Intrusión salina

La intrusión salina o avance de agua de mar al continente puede llegar a afectar gravemente al acuífero, esto se ve reflejado en el gradiente hidráulico del acuífero, el cual se ve principalmente afectado por la falta de precipitaciones, cambio climático, y en general, extracción descontrolada por parte de las organizaciones que gestionan dicho acuífero.

El ingreso de agua salada al acuífero provoca un desorden en la composición físico-química del agua subterránea, lo que se ve reflejado en la disminución de la calidad del agua en el uso doméstico y socioeconómico del sector, dado que al ser un acuífero costero cercano al mar y playas, su incremento de la población flotante afecta considerablemente en la cantidad de volumen de agua que se extrae de este acuífero, disminuyendo así la cantidad de agua dulce y produciendo un deterioro en gran volumen de agua consumible.

1.4.8 Balance hídrico de suelo

Un acuífero se ve afectado principalmente por la intervención humana más que la natural, por lo que el contenido de volumen que se infiltra a través del subsuelo al acuífero es de gran importancia y que debe ser cuantitativamente analizado. Por ello, un balance hídrico de suelo es caracterizado por permitir observar, analizar y cuantificar la cantidad de agua que recargaría al acuífero, o también, el volumen de agua que debería ser aportada para mantener un balance óptimo en el acuífero y que este sea estable entre la extracción de agua y ingreso desde la superficie por acción natural o incluso artificial.

1.4.9 Recarga artificial

Tras la extracción de agua de un acuífero, este debe tener la capacidad de poder recuperarse de manera natural, pero en ocasiones la tasa de extracción viene siendo mayor que la de recuperación, por lo que, para no disminuir la cantidad de agua extraída a través de los pozos, se opta por emplear técnicas artesanales que permitan incrementar la recarga de agua al acuífero.

Pensando en el porvenir del acuífero y su resiliencia en la recarga del mismo, se da el uso de diferentes mecanismos que permitan la acumulación de agua en superficie, tales como la práctica del conocimiento ancestral para la recarga artificial de los acuíferos costeros (Carrión et al., 2018), de tal forma que se pueda mantener una continua infiltración al acuífero durante las épocas de altas precipitaciones (época de invierno), por medio de diversos métodos como zanjas transversales en colinas, sembrío de árboles e implementación albardas y diques (o tapes situados de forma transversal en el cauce del río).

1.4.10 Demanda de agua

El agua de un acuífero costero es suministrada por organismos individuales que se encargan de su gestión, por lo que su uso o explotación es directamente proporcional a la poca del año en el que se ejecute. Por ejemplo, en la época vacacional se ve aumentado el consumo de agua debido a la alta demanda turística, ya sea para uso doméstico o económico de hoteles, restaurantes, etc. Pero, esta demanda se ve controlada cuando llegan las precipitaciones, por lo que, en época vacacional en invierno, su afectación en los niveles piezométricos no se ven alterados como en verano dada las bajas precipitaciones.

1.4.11 Técnicas para el embalse del agua (dique)

Con el objetivo de aumentar la recarga del acuífero, se da la implementación de diversas técnicas de almacenamiento de agua en superficie, uno de ellos es la utilización de diques (tapes) que ayudan a retener el agua en el cauce del río, lo que proporciona una

mejor acumulación e infiltración de agua al ser este sector una zona permeable y cercana al acuífero costero.

Para su elaboración existen diversas formas de construcción, como es la semi-mecanizado a través de la implementación de hormigón y demás materiales de construcción y del medio, así como también un dique artesanal realizado totalmente con materiales del medio como troncos y materiales del propio río para retener el agua y conseguir la recarga en el acuífero.

1.4.12 Ley de Darcy

La ley de Darcy gobierna el movimiento del flujo subterráneo en medios porosos (Heredia & Murillo Díaz, 2007), expresándose para condiciones de densidad variable como:

$$v = -\frac{k}{\mu} \cdot (\nabla p - \rho g) \quad (1.1)$$

donde, en la ecuación 1.1, v es la velocidad de Darcy, de componentes V_x , V_y y V_z (LT^{-1}); k es el tensor de la permeabilidad intrínseca del medio poroso (L^2); μ es la viscosidad dinámica del fluido ($ML^{-1}T^{-1}$); ∇p es el gradiente de presiones de componentes $\partial p/\partial x$, $\partial p/\partial y$ y $\partial p/\partial z$ ($ML^{-2}T^{-2}$); ρ es la densidad del fluido (ML^{-3}) y g es la aceleración de la gravedad (LT^{-2}).

Los modelos numéricos resuelven de manera discreta en espacio y tiempo las ecuaciones diferenciales de flujo (ver ecuación 1.2) y transporte (ver ecuación 1.3), reemplazándolas por ecuaciones algebraicas. Algunos códigos numéricos consideran de forma explícita la variación de la densidad, que varía linealmente en función de las concentraciones isotermas.

$$\nabla \left(k \frac{\rho g}{\mu} \nabla h \right) + \rho^* Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.2)$$

donde: Q es el caudal de recarga (L^3T^{-1}); ρ^* es la densidad del fluido inyectado; h es el potencial piezométrico y S_s es el almacenamiento específico.

$$-\theta \rho v \cdot \nabla C + \nabla[\theta \rho (D_m I + D) \cdot \nabla C] + Q_p (C^* - C) = \theta \rho \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1.3)$$

donde: C es la concentración de soluto como fracción másica (masa del soluto/masa del fluido) (M_s/M); θ es la porosidad; v es la velocidad de Darcy; D_m es el coeficiente de difusión molecular del soluto en el flujo, incluye el efecto de tortuosidad a través del medio poroso (L²T⁻¹); I es la matriz identidad (-); D es el tensor de dispersión hidrodinámica (L²T⁻¹); Q_p es el caudal de recarga del acuífero dado en términos másicos (ML⁻³T⁻¹); C* es la concentración de soluto, dada como fracción másica del fluido, del caudal de recarga (M_s/M).

En los problemas de densidad variable, la velocidad de Darcy se expresa en niveles equivalentes de agua dulce (ver ecuación 1.4):

$$h_e = \frac{p}{\rho_o g} + z = p = \rho_o g (h_e - z) \quad (1.4)$$

donde: h_e es la carga hidráulica equivalente; p es el potencial del sistema de flujo en un punto dado y ρ_o es la densidad del fluido de referencia, usualmente agua dulce.

1.4.13 Modelo numérico

El modelo numérico permite representar un medio físico de la manera más precisa posible, teniendo claro las características esenciales de la zona de estudio y los aspectos que alteran cada zona del área en general, se puede plasmar la estructura de este y brindar de posibles soluciones a causas difíciles de entender.

En Sudamérica, un ejemplo de la utilización de los modelos números se da en Brasil, en el cual se usa el modelo de flujo (MODFLOW) y el modelo de transporte (MT3D), su implementación es primordial para la evaluación de los acuíferos y conocer el estado actual ante la contaminación por aguas residuales de las zonas urbanas, causa que es difícil de entender sin conocer el comportamiento interno del acuífero, de esta forma se logra sustentar un pronóstico positivo del estado del acuífero y calidad del agua, siempre que se realice una adecuada gestión del agua contaminante y sus arroyos (Hirata et al., 2020; Santos et al., 2014).

Por otro lado, en el salar de Atacama, en Chile, le dan un enfoque especial recarga y descarga del agua subterránea por medio de modelos numéricos en densidad variable, así también se centran en la utilización de modelos de flujo y transporte en densidad constante a través del código SHEMAT, logrando determinar la importancia de los procesos geoquímicos que pueden llegar a alterar las propiedades físicas de un acuífero y provocando su contaminación (Tojeda et al., 2003; Vásquez et al., 2013).

Otro modelo numérico es generado a través del programa PHREEQC 2.0, al suroeste de Buenos Aires en Argentina, el cual está enfocado en los parámetros hidráulicos en sedimentos de loess, lo que hasta la fecha presentaba cierta incertidumbre o falta de interpretación alrededor del acuífero en el cual se realiza este trabajo, logrando así demostrar el comportamiento en esta zona y brindando una herramienta esencial para las futuras investigaciones de simulaciones hidrogeoquímicas (Mascioli et al., 2005).

Mientras tanto, en Ecuador, los estudios en hidroquímica se han dado con el objetivo de determinar el grado de contaminación y composición química de las aguas subterráneas, como es el caso de la cuenca de Loja, en donde se ha logrado determinar los procesos hidroquímicos que componen este tipo de aguas, tales como la meteorización de calcita, yeso, dolomita y algunos silicatos, así como también la contaminación generada por factores antrópicos como el agua residual y fertilizantes, quienes son vertidos en la superficie hasta llegar a las corrientes de agua que pueden infiltrarse a través de rocas fracturadas, contaminando los manantiales y parte del subsuelo que se manifiestan en estos sectores (Ruiz-Pico et al., 2019).

1.5 Marco geográfico y geomorfológico

El acuífero costero de la cuenca del río Manglaralto se encuentra ubicado en la parroquia rural Manglaralto al noroeste de la provincia de Santa Elena (Figura 1.3), en la antigüedad este sector estaba cubierto por manglares por lo cual esta parroquia lleva su nombre. La parroquia Manglaralto es una región hidrogeológica que posee un área de 497.4 km² y está limitada al norte por el cantón Puerto López en la provincia de Manabí, al sur por la parroquia Colonche, al este por el cantón Jipijapa en la provincia de Manabí y al oeste por el Océano Pacífico. Geográficamente Manglaralto se encuentra marcado por: el filo costero el cual enfatiza un recurso turístico esencial para el desarrollo local; y

el interior de la parroquia en el cual se encuentra la zona urbana y el Bosque Protector Chongón Colonche (ocupando el 40% de su extensión), promocionando así la conservación ambiental y actividades ligadas al geo-ecoturismo (GAD Parroquial Manglaralto, 2020).

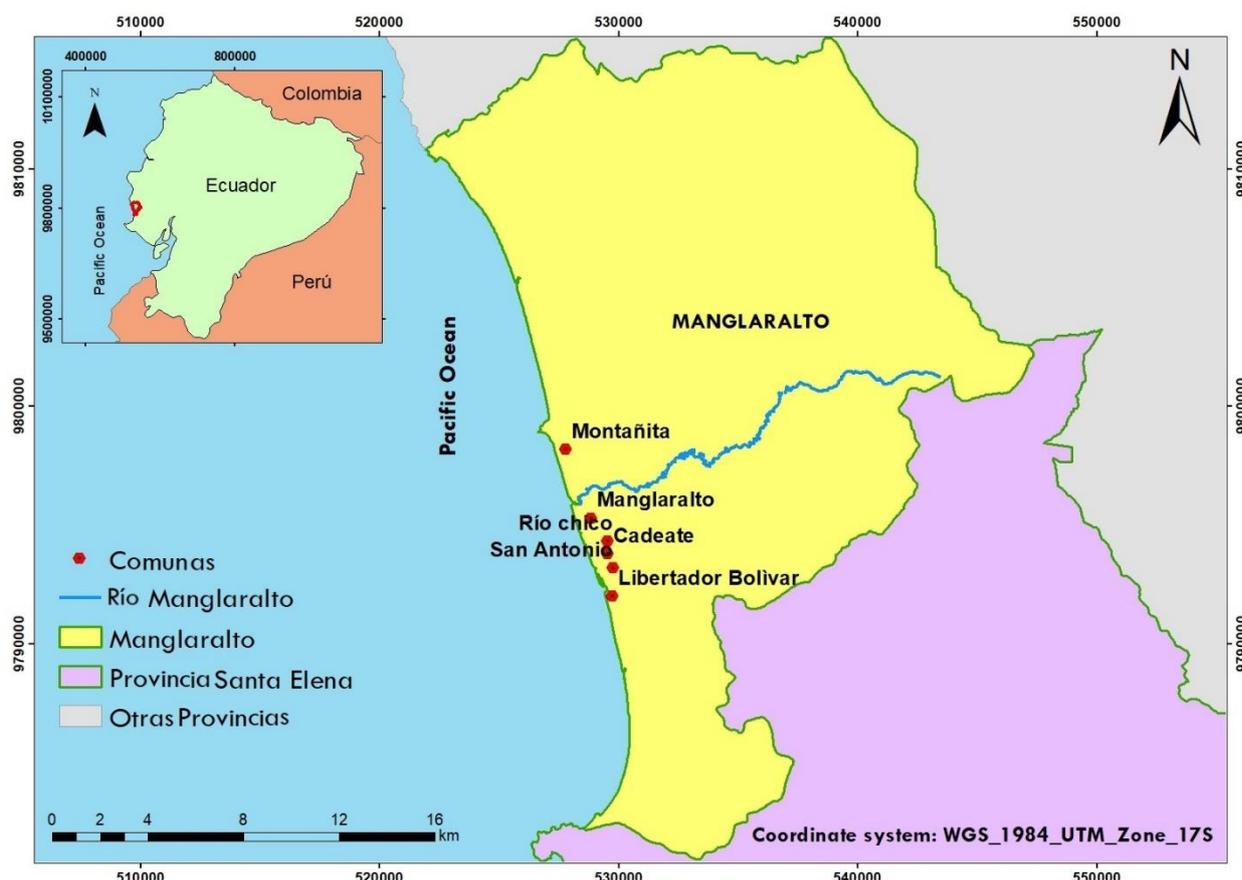


Figura 1.3. Mapa de ubicación de la parroquia rural Manglaralto.

La cuenca del río Manglaralto se encuentra dividida en tres subcuencas (cuenca baja, media y alta) y separadas por la población de Dos Mangas, tiene una forma casi rectangular (16.5 km de longitud axial y 3.5 de ancho medio) y posee un área aproximadamente de 56 km² y un perímetro de alrededor de 43 km (Armando Garzaro, 1990). El río Manglaralto es quien atraviesa dicha cuenca, el cual nace a 700 metros de la Cordillera Chongón-Colonche con un aproximado de 18 km de recorrido, se tiene registrado que su caudal aumenta en época invernal y disminuye en época de sequía (Arévalo, 2017).

El relieve presente en la cuenca alta es de aproximadamente 200 a 700 metros sobre el nivel del mar, con una pendiente media de 40% de inclinación en los diferentes cerros

presentes, tales como: Los Araujos, Los Lobos, Culebra, Colonche, San Martín y las Montañas de Olón, mientras que en la cuenca media y baja el relieve es más suave y con pendientes no mayores al 20% (Armando Garzaro, 1990). En la Figura 1.4 se representa de forma gráfica un modelo digital de terreno realizado por (Campoverde Cabrera & Fajardo Gonzalez, 2018).

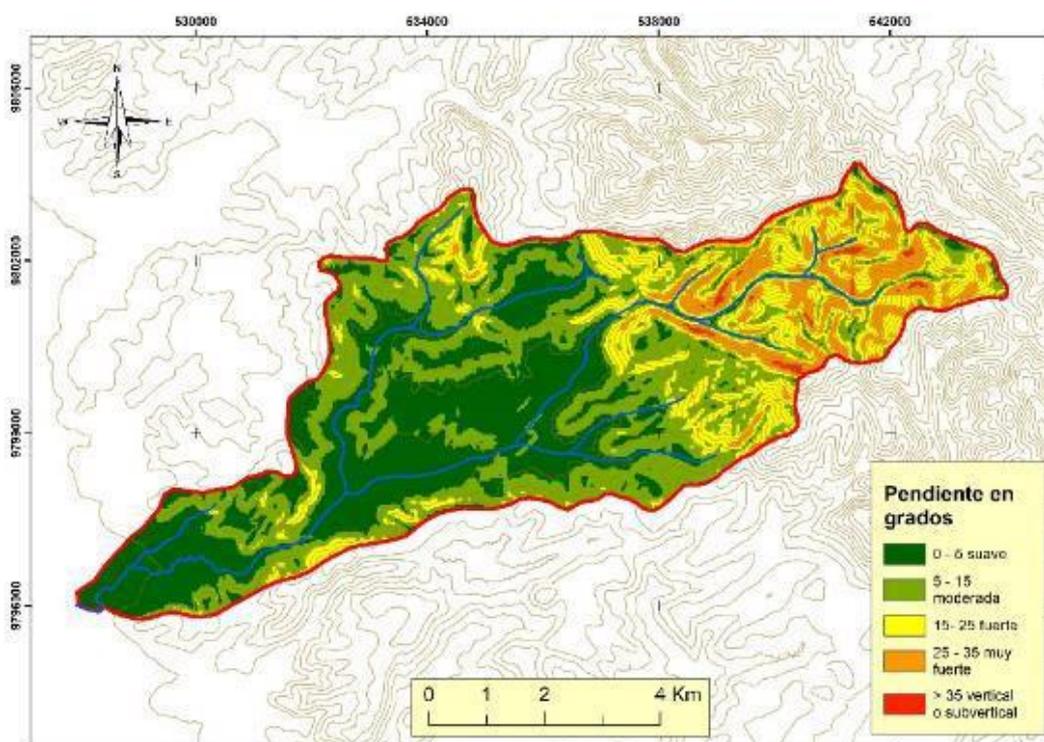


Figura 1.4. DEM de la cuenca del río Manglaralto. (Campoverde Cabrera & Fajardo Gonzalez, 2018).

1.6 Marco geológico

Basados en los estudios geológicos realizados por diversos autores como (Armando Garzaro, 1990; Benitez et al., 1995; Cobos Mite, 2010; Nuñez del Arco, 2003), se ha determinado un basamento tipo oceánico de edad cretácica (Formación Piñón) en toda la Península de Santa Elena.

La cuenca de Manglaralto está caracterizada por una gran serie de rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias sobre las cuales descansan rocas del paleógeno y neógeno, además de Formaciones con edad variable del cretácico superior al cuaternario (Arévalo, 2017; Bravo Montero, 2020), las cuales se enlistan a continuación:

1.6.1 Formación Cayo (Cretácico Superior).

Según los datos de campo analizados por (Armando Garzaro, 1990), se tiene que esta Formación se encuentra principalmente en las partes montañosas de la Formación, además de la presencia de sedimentos duros (alta resistencia a la erosión) como tobáceas, lutitas arcillaras y hasta silicificadas resistentes a la erosión, además de que en ciertos sectores se da la presencia de grauvacas con un color verdoso.

En la mitad de la parte alta de la Formación se encuentran arcillas de color habano, negro o incluso con tintes verdosos e intercalaciones con ciertos estratos de tobas, por otro lado, en la parte del techo (parte alta de la cuenca), se pueden encontrar un pequeño dominio de estratos de lutitas de tipo chet, quienes son muy comunes en la Formación Guayaquil, con gran cantidad de radiolarios y foraminíferos que ayudan a centrar una edad del Senoniano al Maestrichtiano (Nuñez del Arco, 2003).

Los conglomerados y areniscas que se pueden observar en esta Formación poseen una granulometría muy variada y composición del tipo material básico, por otro lado, los aglomerados volcánicos tienen una textura cristalina a vítrea y clastos del tipo basáltico, mientras que las areniscas son cuarzosas y poseen ciertas cantidades de calcita, feldespato, magnetita y anfíbol (Valencia, 2017).

1.6.2 Formación San Eduardo (Eoceno Medio)

La Formación San Eduardo puede ser observada en el Cerro Llovedores y se ubica sobre la Formación Cayo, posee una secuencia de turbiditas en la base y cambia a turbiditas a calcáreas y lutitas silíceas en la parte superior de esta Formación, los cuales pueden ser evidencias en las estructuras *Slump* en el flanco sur de la cordillera Chongón-Colonche (Ordoñez, 2006; Valencia, 2017).

1.6.2.1 Miembro Javita

Este Miembro es una de las dos divisiones que posee la Formación San Eduardo, ubicada específicamente en la cuenca de Manglaralto, además de ello, encuentra en la parte superior de dicha Formación y es característica por la presencia de calcarenitas de

grano grueso, mientras que en la parte las baja se encuentran ciertas lutitas calcáreas y presencia de chert (Nuñez del Arco, 2003; Valencia, 2017).

1.6.3 Grupo Ancón (Eoceno medio-superior)

El grupo Ancón posee una edad variada desde el Eoceno medio al superior, esta estratigráficamente dividida en cuatro Formaciones que son: Clay Pebble Beds, Socorro, Seca y Punta Ancón, pero en el área de estudio (cuenca Manglaralto) solo aflora la Fm. Socorro y la Fm. Seca.

1.6.3.1 Formación Socorro.

Se presentan algunos deslizamientos y fallas activas a lo larga de esta Formación, generando así algunas de las deformaciones singenéticas que la caracteriza, por otro lado, en la parte basal ubicada en el sector sureste de la cuenca de esta Formación, es conocida el Miembro San Pablo y se da la presencia de conglomerados intercalados con areniscas calcáreas, limolitas y algunas lutitas (Armando Garzaro, 1990; Nuñez del Arco, 2003; Valencia, 2017).

1.6.3.2 Formación Seca.

Está ubicada al noreste de la cuenca, sobre la Fm. Socorro y se caracteriza por poseer una fauna nerítica y sedimentación de origen calcáreo, además de foraminíferos (con color crema) y frecuentemente caliza arrecifal con presencia de algas (Nuñez del Arco, 2003; Valencia, 2017).

1.6.4 Formación Tosagua (Mioceno Inferior al Medio)

La Formación Tosagua posee lutitas con cierta tonalidad a chocolate (en la parte central de la cuenca) mientras que al noreste su color se ve afectado a una tonalidad de rojo ladrillo, esta Formación se caracterizada por sus tres Miembros que son: Zapotal, Villingota y Dos Bocas (Arévalo, 2017; Armando Garzaro, 1990).

En la zona de la cuenca Manglaralto afloran los Miembros de:

1.6.4.1 Miembro Zapotal

Está compuesto principalmente de capas de areniscas de grano medio y ciertas alternancias de limolitas (capas que pueden tener un tamaño decimétricas a métricas), este Miembro está situado sobre grupo Ancón y en su base se da la presencia de ciertos conglomerados (Campoverde Cabrera & Fajardo Gonzalez, 2018; Nuñez del Arco, 2003).

1.6.4.2 Miembro Dos Bocas

Este Miembro es fácilmente visible desde la carretera frente a Manglaralto, así como también la presencia areniscas y lutitas justo al noroeste de la cuenca, en general, este Miembro posee un ambiente marino somero y está compuesta por lutitas con color grisáceo limoso y ciertas alternancias con capas de limolitas y areniscas (Arévalo, 2017; Armando Garzaro, 1990; Campoverde Cabrera & Fajardo Gonzalez, 2018; Nuñez del Arco, 2003; Valencia, 2017).

1.6.5 Formación Tablazo (Pleistoceno-Holoceno)

Posee una edad que va desde el Pleistoceno al Holoceno, (Ordoñez, 2006) afirma que a litología presente en esta Formación es principalmente de areniscas, conglomerados y coquinas en capas que van de centimétricas a decimétricas en la parte basal, además de estar cubierta por sedimentos del cuaternario. Por otro lado, (Nuñez del Arco, 2003) confirma la existencia de cuatro diferentes facies que caracterizan a esta Formación, en los cuales afirman un ambiente marino profundo en el facie superior (con la existencia de areniscas calcáreas), un ambiente marino somero correspondiente a la segunda facie (dada la presencia de conchas y nódulos calcáreos), un ambiente marino litoral en la tercera facie (debido a los fragmentos de conchas y arenas de color marrón), finalmente, la última facie la cual se encuentra bajo el mar.

1.6.6 Aluvial (Holoceno)

El aluvial de la cuenca Manglaralto está constituida principalmente por alternancia de limos, gravas, arenas, conglomerados y arcilla no consolidadas, quienes están situados en las terrazas de la cuenca y que fueron depositados por los diferentes ríos y quebradas

que atraviesan este sector y la mayor parte de las Formaciones geológicas que se presenten, tales como los ríos de Manglaralto, Cadeate y Simón Bolívar (Bravo Montero, 2020; Nuñez del Arco, 2003; Valencia, 2017).

1.7 Marco tecto-estructural

Según (IGM, 1974), la cuenca del Río Manglaralto posee un gran número de fallas con direcciones diferentes (Figura 1.5), entre estas tenemos (Figura 1.6): orientación noroeste-sureste en fallas con movimiento vertical, dirección noreste-suroeste en fallas de desplazamiento de rumbo como la falla Punta Montañita, Río Manglaralto y la Entrada, quienes se encuentran relacionadas a la segunda orogénesis de Los Andes (Campoverde Cabrera & Fajardo Gonzalez, 2018).

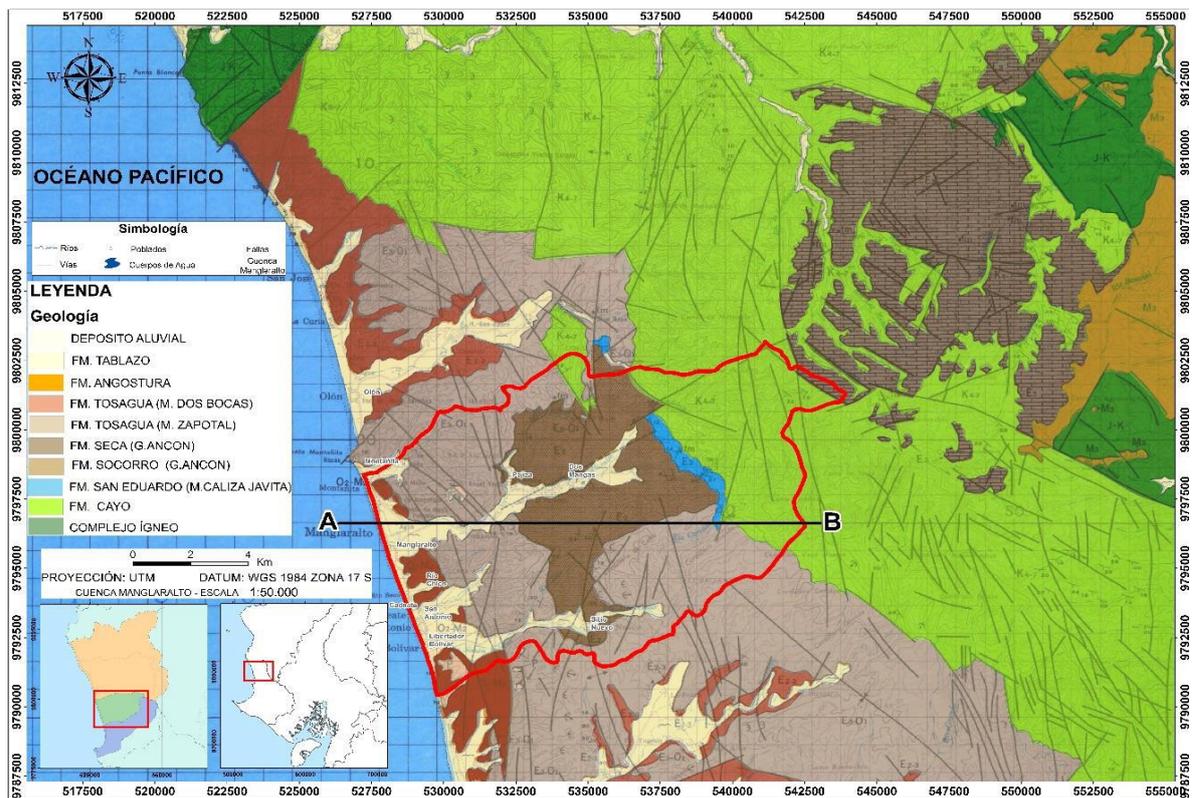


Figura 1.5. Mapa litológico estructural de la división hidrográfica Manglaralto. (IGM, 1974; Valencia, 2017).

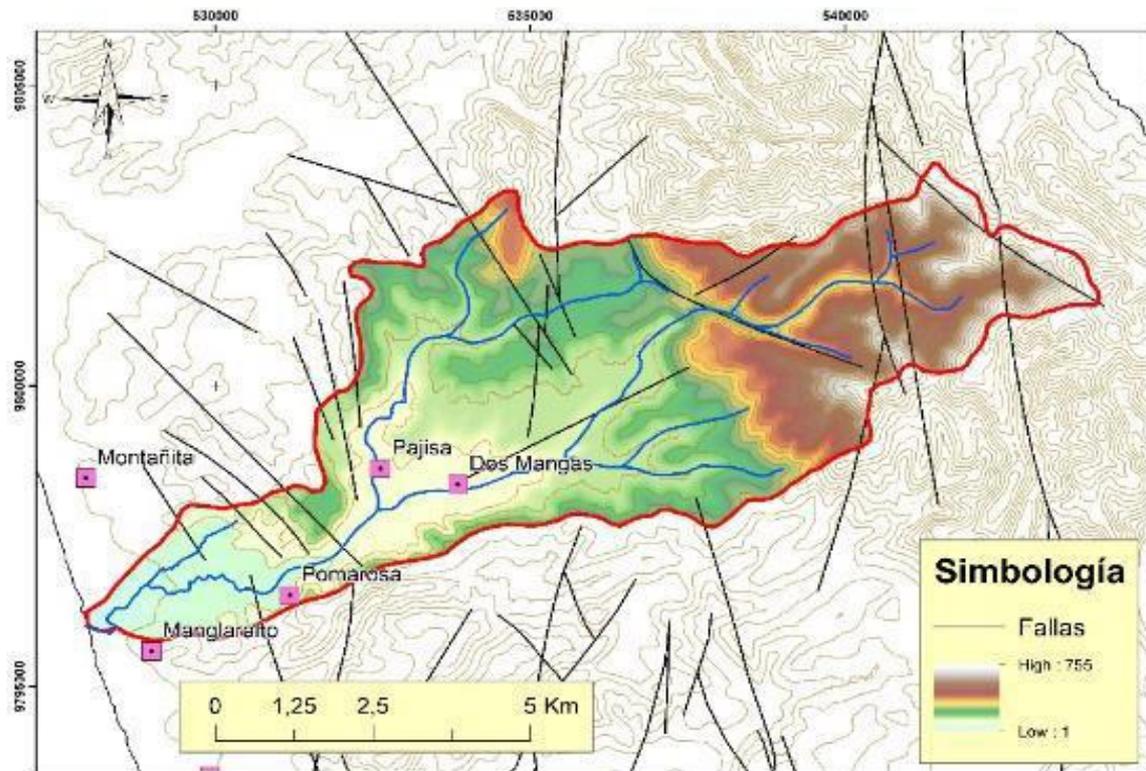


Figura 1.6. Mapa de fallas locales situadas en la cuenca del Río Manglaralto. (Campoverde Cabrera & Fajardo Gonzalez, 2018).

La hoja geológica de Manglaralto (HOJA 4, Edición 1-1974) (Figura 1.5), proporciona un corte geológico que pasa por nuestra zona de estudio (Figura 1.7) y de una columna estratigráfica correspondiente a esta parroquia (Figura 1.8) (IGM, 1974; Quiñonez, 2019). Este trabajo permite comprender la extensión de un complejo ígneo y de la Formación cayo, quien, por consiguiente de esta, presenta una discordancia con la Formación San Eduardo. El Miembro Dos mangas y Javita se encuentran en la Formación Socorro debajo de la Formación Seca, teniendo a ambas como conjunto del grupo Ancón, pero a partir de la Formación Socorro existe una nueva discordancia con el Miembro Caliza de las Delicias de la Formación Zapotal. Así como también la gran evidencia del dominio de los depósitos aluviales y coluviales en toda la zona de Manglaralto.

Tras el evento geológico del plegamiento del sinclinal del río Piñas, produce una familia de fallas con una dirección norte-sur justo en el centro de la cuenca, pero, las más cercanas a la cuenca son las fallas de la Falla Colonche (situada al Sur de la Cordillera Chongón-Colonche), la más extensa mide un aproximado de 24.1 km en dirección N39°W y con cierto movimiento inverso a transpresional, mientras que en una sección al noroeste (Figura 1.6), se encuentra otra falla con longitud cercana a los 10.5 km con

dirección N44°W y un posible fallamiento del tipo inverso dado la curvatura leve de la traza (Campoverde Cabrera & Fajardo Gonzalez, 2018; Carrión-mero et al., 2020).

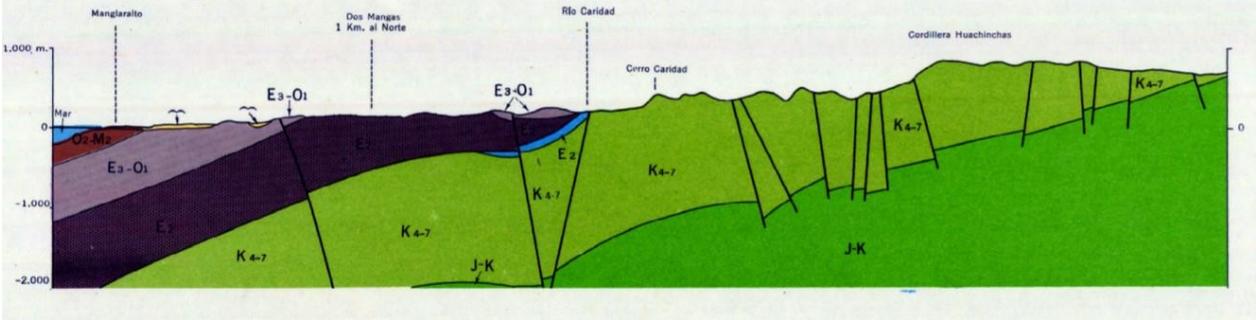


Figura 1.7. Perfil geológico de Manglaralto (HOJA 4, Edición 1-1974). (IGM, 1974).

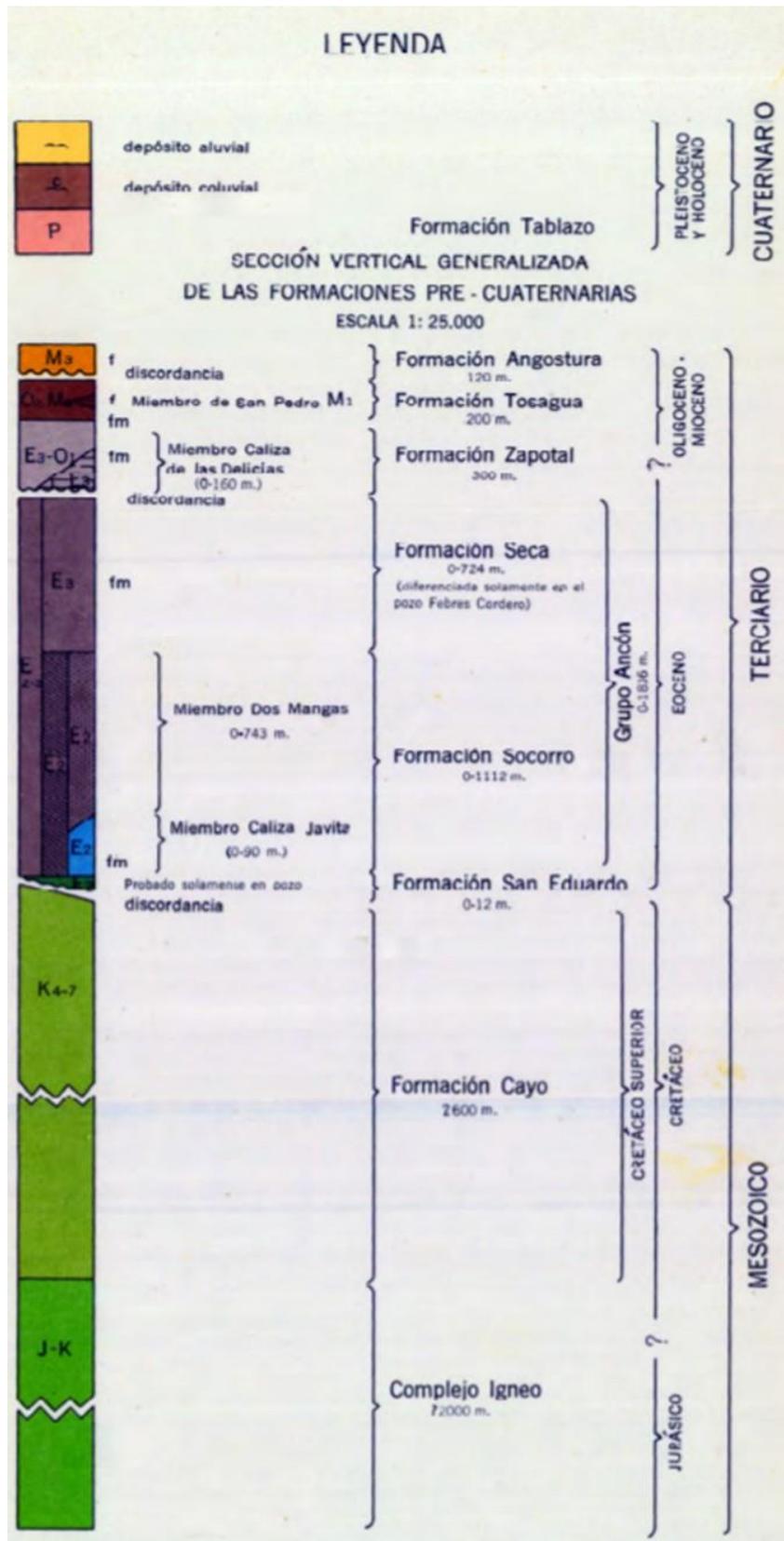


Figura 1.8. Columna estratigráfica del corte A-B en el Mapa Geológico de Manglaralto. (IGM, 1974).

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA

2.1 Materiales

2.1.1 Información científica

Previo al proceso metodológico que conlleva este trabajo investigativo, se resalta la importante labor de la información científica realizada por las diversas entidades en la zona de estudio. Estos datos han sido recopilados por medio de diversos trabajos de la comunidad e instituciones académicas (ESPOL), enfocado específicamente en trabajos de prospección geoelectrica, talleres con la comunidad, registro mensual de los parámetros físico-químicos y de los niveles estático-dinámico de los pozos de agua subterránea.

Los estudios realizados han sido implementados con la vinculación de diversos proyectos, los cuales se observan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Proyectos relacionados con el área de estudio.

Proyectos Internacionales	Nombre
International Atomic Energy Agency (IAEA):	Characterization of Coastal Aquifers in the Santa Elena Peninsula - ECU/8/026
	Application of Isotopic Tools for Integrated Management of Coastal Aquifers - RLA/8/041
	Improving knowledge of groundwater resources to contribute to their protection, integrates management and governance (CXXVII) - RLA 7/018
	Integrating Isotope Hydrology in National Comprehensive Water Resources Assessments - RLA 7/024
	Improvement of the management of coastal aquifers by studying the recharge rate of alluvial aquifer of the Manglaralto river basin - ECU/7/005
	Use of isotopes for the hydrogeological evaluation of excessively exploited aquifers in Latin America (CXXVII) - RLA/7/016

Proyectos Nacionales	Nombre
Proyectos de la Unidad de Vínculos con la Sociedad (UVS-ESPOL)	Hidrología e Hidrogeología aplicadas al acuífero costero de Manglaralto (Fase I, II y III) – PG03-PY18-13
	Gestión integral del agua en cuencas hidrográficas de la parroquia Manglaralto – PG03-PY19-09
	Resiliencia en la gestión del agua, ante el COVID-19, Manglaralto - PG03-PY20-03
Proyectos de la Universidad de la Península de Santa Elena (UPSE)	Caracterización geofísica e hidroquímica del acuífero Manglaralto para la sostenibilidad del recurso hídrico - 91870000.0000.382444

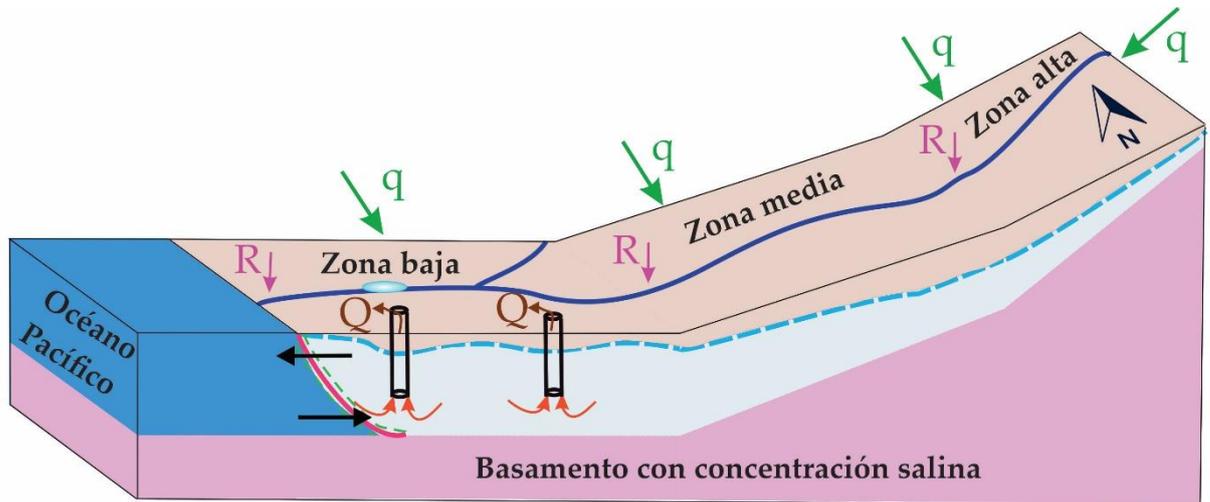
Durante el presente trabajo investigativo se implementó diversas herramientas que permiten manejar adecuadamente los datos recopilados y el procesamiento de estos, entre ellos tenemos a Softwares complementarios tales como:

- Software Microsoft Excel, permite manejar un mejor registro de todos los datos recopilados de los niveles piezométricos, TDS, precipitaciones, temperatura y extracción de agua diaria del acuífero.
- Software Paraview 3.8.1, se considerada como una herramienta científica para la visualización y análisis de datos muy grandes, proporcionando una interfaz gráfica al usuario para la creación y ejecución dinámica de las tareas de visualización disponibles (Geveci & Law, 2005). Gracias a ello se logró observar un modelado en 3D de los datos obtenidos en el transcurso de este trabajo.
- Software Notepad++, permite manejar de mejor forma los datos extraídos en formato de texto “txt”, sin que se altere o desordene los datos copiados.

2.1.2 Modelo Conceptual

La elaboración de un modelo numérico de flujo y transporte permite representar numéricamente la realidad del medio físico natural de un sistema hidrogeológico, siendo un proceso complejo, tanto para la discretización espacial, como temporal, alcanzando resultados que contribuyen a la gestión del recurso hídrico. El modelo conceptual hidrogeológico (Figura 2.1) abarca todos los datos específicos y conocimiento científico

del lugar de estudio, logrando discretizar el dominio de datos y comportamiento de los procesos que influyen en el flujo del agua y transporte de solutos (Groundwater Hydrology Group, 2008).



Simbología

- | | | | |
|----------|---|----------|------------------------------|
| ----- | Nivel freático | R | Recarga |
| ----- | Zona de Transición (H ₂ O acuífero-H ₂ O mar) | q | Recarga lateral |
| ————— | Ríos | → | Ingreso de agua de mar |
| Q | Bombeo | ← | Descarga de agua subterránea |
| ↻ | Flujo por bombeo | □ | Pozos |
| ○ | Reservorio | | |

Figura 2.1. Modelo conceptual del sistema hidrogeológico del acuífero de la cuenca Manglaralto.

2.1.3 Equipos e instrumentos

En la Tabla 2.2 se tiene una lista de los recursos más importantes e implementados para el registro de los datos en campo, equipos que han sido facilitados por JAAPMAN y CIPAT-ESPOL que se muestran a continuación:

Tabla 2.2. Equipos utilizados en el registro de datos.

Nombre del equipo	Imagen	Utilidad	Organización
Equipamiento personal de campo		Protección y vestimenta del geólogo	Personal
GPS		Toma de coordenadas (UTM WGS84) de cada pozo y limitaciones del acuífero	CIPAT-ESPOL
Flexómetro		Toma de medidas (metros) del brocal de cada pozo	JAAPMAN
Equipo multiparamétrico		Registro de datos de TDS, salinidad, Ph, conductividad, sólidos disueltos, resistividad y temperatura	CIPAT-ESPOL
Sonda		Toma del nivel estático y dinámico de cada pozo del acuífero costero (en metros)	JAAPMAN

Mientras tanto, entre las herramientas o Software utilizadas para el procesamiento de la información, tenemos a:

2.1.4 Easy Balance

Easy Balance (Erick Vásquez-Suñé y Alfonso Castro) fue desarrollado a través de Software Microsoft Excel, cuya finalidad es determinar la Recarga y la Evapotranspiración Potencial (ETP) diaria, mensual y hasta anual según los datos ingresados.

En la Figura 2.2 se puede observar la estructura actual que posee el Easy Balance, para el cual se debe tener presente los datos meteorológicos como la Precipitación “P” (en mm por día) y la Temperatura diaria “T” (en °C) con su respectiva fecha en la que se ha recolectado dicha información. Por otro lado, centrándose en el sector de estudio, se debe conocer los valores de las características del suelo tales como: la capacidad de campo, la humedad inicial, espesor radicular del suelo, el punto de marchitez, el valor de laminación, la reserva útil y la reserva inicial (Figura 2.2).

The screenshot shows the Excel interface for 'EASY BAL' (Ver. 4.0) by Erick Vásquez-Suñé and Adolfo Castro. It features several key sections:

- ATENCIÓN:** A yellow box instructing users to fill yellow cells with meteorological data.
- DATOS METEOROLÓGICOS:** Fields for Date (Fecha), Precipitation (P), and Temperature (T).
- EVAPOTRANSPIRACIÓN:** Field for Potential Evapotranspiration (ETP).
- CARACTERÍSTICAS DEL SUELO:** A table for soil properties:

Cap. Campo (contenido volumétrico)	0.1
Humedad Inicial (contenido volumétrico)	0
Espesor radicular suelo (m)	0.25
Punto de Marchitez (contenido volumétrico)	0.100
Valor de laminación (mm)	10
Reserva Útil (mm)	0.00
Reserva Inicial (mm)	-25.00
- ETPmes:** Monthly ETP table with columns for month, mm/mes, and values for 2018.
- ETPdía:** Daily ETP table with columns for date, ΔR, RU, ETR, and DEF/EXCED.
- RECARGA DIARIA:** Daily recharge table with columns for date and R (mm/d).
- RECARGA MENSUAL:** Monthly recharge table with columns for month and R (mm/h).

Figura 2.2. Estructura de Easy Balance.

La recarga se estimó para un volumen diario, mensual y anual, por medio de los datos de precipitación obtenidos de la estación meteorológica Manglaralto (M0619), los cuales son ingresados a este Software, permitiendo conocer la recarga del acuífero para finalmente contribuir a la elaboración del modelo numérico por medio del Software Visual Transin.

2.1.5 Visual Transin

Visual Transin permite la elaboración de un modelo numérico de flujo y transporte, lo que ayuda a representar la realidad de un determinado sector, siendo un proceso complejo pero con resultados muy prometedores.

Por ello, antes de la calibración de los parámetros desconocidos, se debe tener en claro un modelo conceptual que abarque todos los datos específicos y conocimiento científico por parte del modelador sobre el lugar de estudio, logrando discretizar el dominio de datos y comportamiento de los procesos que influyen en el flujo del agua y transporte de solutos (Groundwater Hydrology Group, 2008).

El Software Visual Transin (versión 4.0) posee un conjunto bastante completo, lo cual permite facilitar un pos-procesamiento de resultados en diferentes términos como de concentraciones y balances de masa, así también como de términos en vista de plano y evoluciones temporales. En general, según (Groundwater Hydrology Group, 2008), este Software es característico debido a su capacidad de elaborar:

- Simulaciones, enfocadas a una solución directa estándar de ecuaciones de flujo y transporte de agua subterránea, ya sea lineal o no lineal.
- Estimación de parámetros a través del código, que es su uso principal.
- Análisis de errores, evaluando la incertidumbre existente en cada parámetro del modelo establecido.
- Análisis de sensibilidad, en el cual se evalúa el cambio que sufrirían las concentraciones en respuesta a cambios de los parámetros.
- Selección de modelo, elegido por medio de una identificación un conjunto de modelos conceptuales alternativos.
- Diseño de experimentos, aquel que es seleccionado como el más informativo.

En las aguas subterráneas se encuentran una gran diversidad de problemas que en muchos de los casos puede llevar al fracaso. (Groundwater Hydrology Group, 2008) menciona que Visual Transin tiene la capacidad de resolver prácticamente todo tipo de problemas de flujo y transporte, teniendo como ejemplos los siguientes:

- Experimentos de laboratorio 1-D.
- Acuíferos horizontales 2-D.
- Acuíferos multicapa.
- Problemas de hidráulica de pozos.
- Transporte insaturado.
- Transporte de solutos de doble porosidad 3-D.

2.1.6 Transdens

El Software Transdens 2.0 es considerado un programa de simulación basado especialmente en el Software Visual Transin 4.0, cuya función principal es resolver las ecuaciones de flujo y transporte en un medio poroso, por lo que ambos Software deben ser tomados a la par al igual que sus resultados generados (Hidalgo, 2011).

Por medio de un proceso interactivo, Transdens permite linealizar las ecuaciones de flujo y transporte a través de dos diferentes métodos, el denominado método de Picard y el método de Newton, pero para el caso de densidad variable se usa el problema acoplado, logrando que las ecuaciones se resuelvan de una manera de no linealidad, lo que es más acorde a la densidad variable (Hidalgo, 2011).

2.2 Metodología general

Los datos que ingresan en el Software Visual Transin deben ser correctamente analizados y acorde a la realidad del medio físico (Fase I y II), con el fin de obtener un modelo y validación de la simulación numérica que refleje el estado actual del acuífero costero (Fase III y IV) (Figura 2.3). Por ello, este trabajo investigativo se centra en el siguiente esquema metodológico:

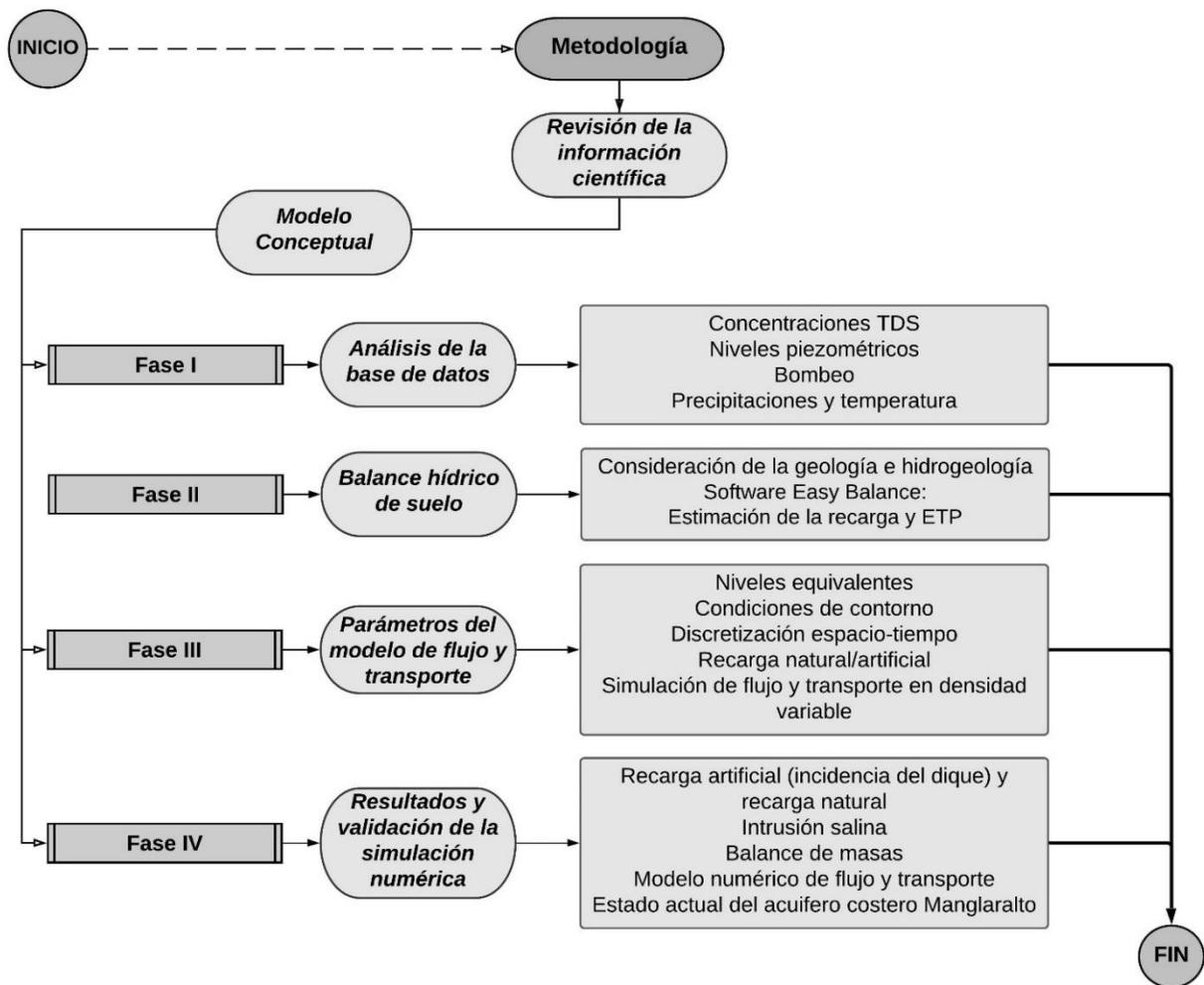


Figura 2.3. Esquema metodológico.

2.2.1 Fase I

Durante esta fase se analiza la base de datos de cada uno de los pozos, 11 pozos seleccionados (teniendo que el pozo 1 y 2 son muy cercanos, por lo que se opta por unificar sus registros y tratarlos como un solo pozo, además del pozo 13 que es relativamente nuevo por lo que no es considerado), información que ha registrado y reportado mensualmente la JAAPMAN y el CIPAT-ESPOL (Tabla 2.3), logrando determinar el nivel piezométrico (tanto el nivel estático como el nivel dinámico de cada pozo) y de ciertos parámetros físico-químicos que ayudan a llevar un mejor control en la calidad de agua extraída.

Tabla 2.3. Registro de datos de cada pozo.

Pozos	Coordenada X	Coordenada Y	Profundidad	Brocal (m)	Nivel Dinámico	Nivel Estático	Ph	Conductividad (μS/cm)	Temperatura (°C)	Resistividad (Ω m)	Solidos Disueltos (mg/L)	Salinidad (%)
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Estos registros han sido realizados en colaboración de los Miembros de JAAPMAN con estudiantes de ESPOL, quienes realizan sus prácticas comunitarias, asistiendo a la parroquia por medio de salidas de campo y visitando cada uno de los pozos de agua (Ver anexo 3), logrando determinar ciertos parámetros hidroquímicos que ayuden a llevar un mejor control en la calidad de agua extraída. La ubicación de los pozos se puede observar en la Figura 2.4.

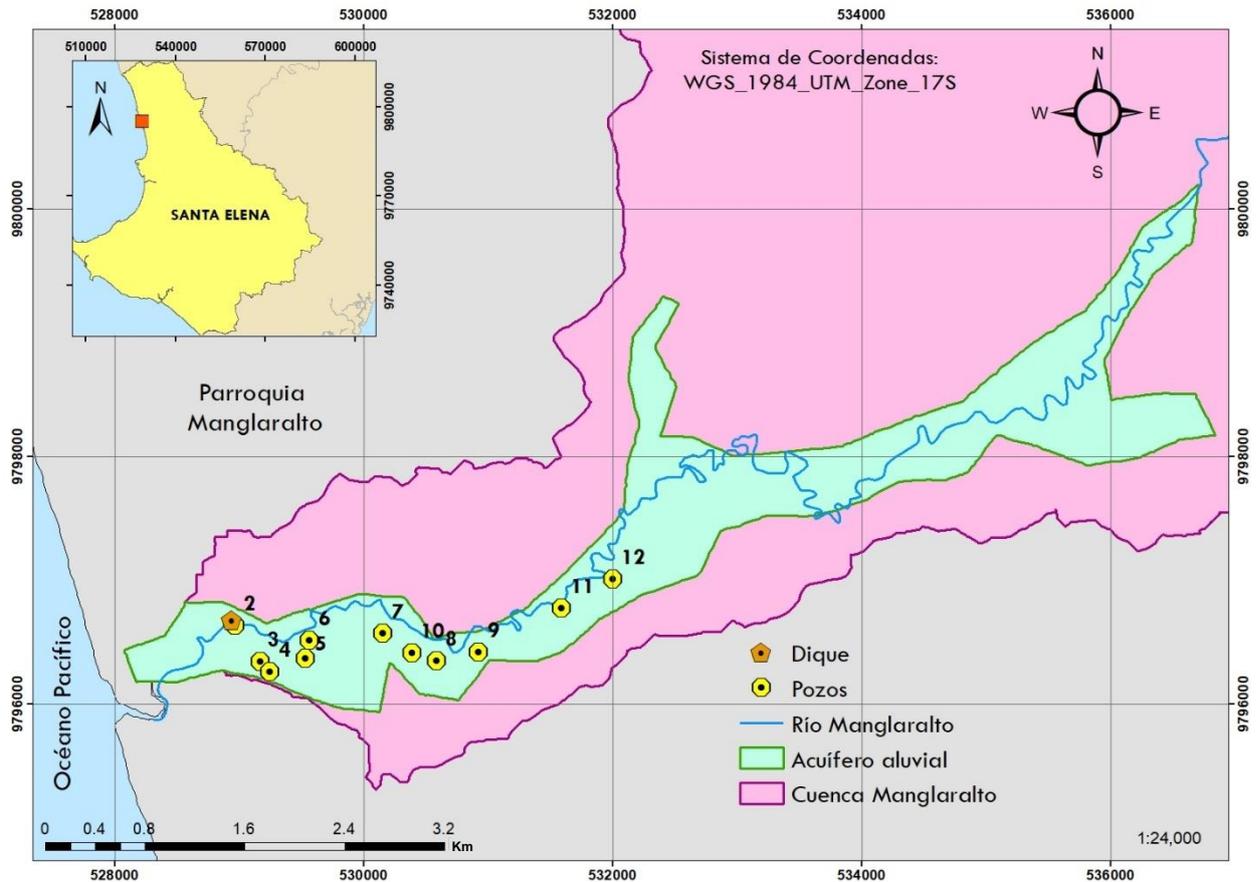


Figura 2.4. Mapa de ubicación de los pozos en la cuenca del río Manglaralto.

Para la conceptualización del sistema hidrogeológico y del modelo numérico se consideraron ciertos parámetros, tales como:

- Total de Sólidos Disueltos (TDS).
- Registro de los niveles piezométricos, a través del uso de la sonda que es reservada y administrada por la JAAPMAN.
- Las extracciones diarias por bombeos, datos que han sido registrados por la JAAPMAN.
- Información de las precipitaciones y temperatura diaria, perteneciente a la cuenca de estudio y que han sido tomadas por parte de la estación meteorológica Manglaralto (código: M0619) (Dateas, 2020).

2.2.1.1 Precipitaciones diarias

Las precipitaciones diarias fueron obtenidas a través de la estación meteorológica ubicada en Manglaralto (Dateas, 2020), logrando registrar más de 700 valores referentes al periodo de la simulación. La tabla de datos a continuación está enfocada en valores

mensuales para su correspondiente exposición (Tabla 2.4), dado que su gran extensión de datos diarios es difícil de plasmar en el documento.

Tabla 2.4. Valores de precipitaciones y temperaturas mensuales.

Mes	Precipitación	Temperatura
ene-2018	2.2	26.31
feb-2018	36.85	27.73
mar-2018	12.65	27.98
abr-2018	2.35	26.98
may-2018	0	25.97
jun-2018	0	24.59
jul-2018	0.45	22.68
ago-2018	69.4	21.57
sep-2018	0.2	22.01
oct-2018	0	22.40
nov-2018	1.7	23.81
dic-2018	1.5	24.29
ene-2019	1.5	26.39
feb-2019	51.6	27.36
mar-2019	18.4	27.87
abr-2019	0.2	27.08
may-2019	0	26.53
jun-2019	0	25.12
jul-2019	0	22.90
ago-2019	138.3	21.68
sep-2019	0.2	21.62
oct-2019	0	22.40
nov-2019	1.7	23.81
dic-2019	1.5	24.29
ene-2020	2.9	26.24
feb-2020	22.1	28.10
mar-2020	6.9	28.10
abr-2020	4.5	26.87
may-2020	0	25.40
jun-2020	0	24.07
jul-2020	0.9	22.45
ago-2020	0.5	21.47
sep-2020	0.2	22.40

2.2.1.2 Temperatura diaria

En conjunto con la precipitación, los valores de la temperatura son obtenidos por medio de la estación meteorológica ubicada en Manglaralto (Dateas, 2020), logrando registrar una gran cantidad de datos (más de 700 registros diarios) y utilizados en los diferentes Software. Dada la gran extensión de datos registrados, se tiene que en la Tabla 2.4 se visualiza la temperatura mensual ya que no se puede mostrar el registro completo por su gran extensión de valores diarios.

2.2.2 Fase II

La zona de interés para el presente estudio se centra en el acuífero Manglaralto, el cual tiene aproximadamente 508 ha y corresponde en territorio superficial el 3.84% de la cuenca del río Manglaralto, donde predominan materiales permeables y porosos, y se lo identifica como una terraza aluvial (Herrera Franco et al., 2019).

En la Figura 2.5 se muestran las Formaciones geológicas que influyen directamente en el acuífero aluvial, formado principalmente por materiales de gravas, arenas, limos y arcillas (Morante et al., 2019).

Por lo general, las Formaciones existentes se caracterizan por secuencias de rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias, y las edades van desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno inferior, seguidas de los depósitos aluviales que son del Holoceno (Morante et al., 2019).

La Fm. Cayo es considerada el piso de esta configuración geológica y posee potentes secuencias de rocas volcano-sedimentarias. Se reconocen por presentar areniscas grauvacas, rocas volcánicas con matriz arcillosa y argilitas grises o verdes silicificadas, a diferencia de la Fm. Tablazo, donde se evidencian secuencias de conglomerados y arenas. La Fm. Socorro (Grupo Ancón), está definida estratigráficamente como un flysch con presencia de turbidíticas y capas finas de lutitas y areniscas verdosas (Nuñez del Arco, 2003). El M. Zapotal, el cual pertenece a la Fm. Tosagua se caracteriza por la

presencia de cloruros, debido al contacto continuo con el agua de mar y consta de areniscas, conglomerados y lutitas.

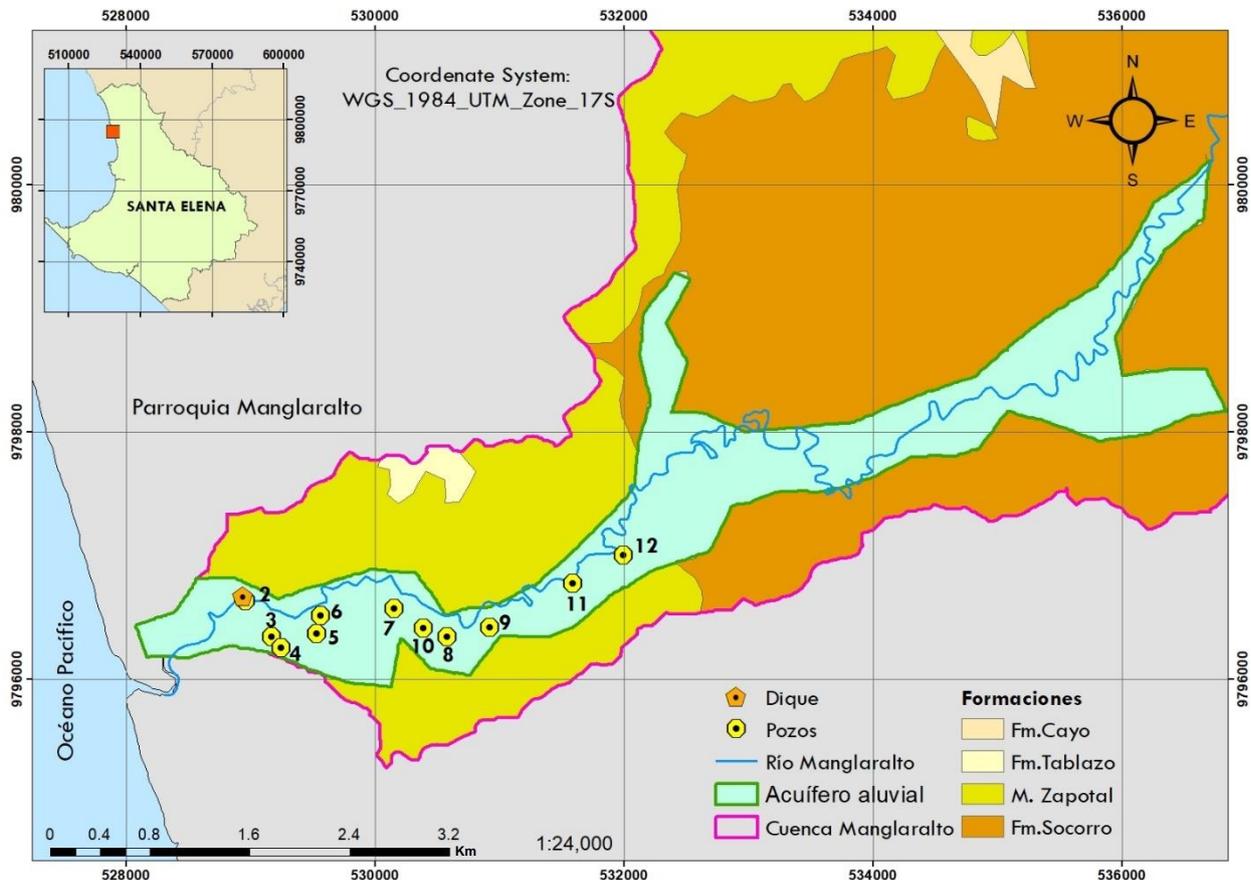


Figura 2.5. Mapa geológico del área de estudio.

En el balance hídrico del suelo se consideraron parámetros característicos del suelo, así como precipitaciones y temperatura ingresados en el Software Easy Balance, estimando la recarga del acuífero y de la Evapotranspiración Potencial (ETP). La recarga es un parámetro fundamental en el proceso de simulación, dada su importancia en el comportamiento de los niveles piezométricos y en la calidad del agua en este tipo de acuíferos libres y costeros.

2.2.2.1 Características del suelo

Durante el ingreso de datos en el Software Easy Balance, se debe establecer el valor de ciertas características importantes, las cuales son visualizadas en campo y son dadas bajo criterios específicos según la zona de estudio. Estas características son:

- Capacidad de campo, es considerado como la capacidad o grado de humedad que el suelo ha perdido en un determinado tiempo por efecto de la gravedad y drenaje.
- Humedad inicial, la cual es determinada según la vegetación y tipo de suelo observada en campo.
- Espesor radicular del suelo, se establece un valor (en metros “m”) según el área de interés
- Punto de marchitez (grado de humedad), se da cuando las plantas llegan al límite de su punto de absorción de agua.
- Valor de laminación, es determinado en milímetro (mm) y referenciado de un hietograma realizado en la zona de estudio.

Para la capacidad de campo y punto de marchitez se consideró un suelo de tipo franco según su textura, representados en contenido volumétrico a partir de datos porcentuales y densidad del suelo (Ávila-Dávila et al., 2019; Ojeda et al., 2018). Se estima un espesor radicular de 0.25 metros debido a la maleza identificada en la zona de estudio, además de una humedad inicial de 0. El hietograma de diseño de la cuenca de Manglaralto indica que el valor de laminación es de 10 mm (Catuto, 2020; Javier Montalván Toala et al., 2020).

Finalmente, se calcula una reserva útil de 0 mm y la reserva inicial de -25 mm, la cual es empleada para el cálculo de la ETP y de la recarga. Además, se considera que la humedad del suelo y la capa vegetal están en condiciones óptimas. Se emplea la información registrada de las precipitaciones y temperaturas desde el 2018 hasta septiembre 2020, por medio del método Thornthwaite para el cálculo del ETP (Sanchez, 2015).

2.2.2.2 Evapotranspiración Potencial

La Evapotranspiración Potencial (ETP) es el resultado de dos diferentes procesos ocurridos en condiciones óptimas, tales como: la evaporación (dada la humedad del suelo), quien consiste en el paso del agua en un estado sólido a gaseoso o de sólido a vapor en el caso del hielo y; la transpiración (en base a la cobertura vegetal), como un

fenómeno biológico en el cual las plantas sufren un proceso que provoca la pérdida de agua que pasa a través del cuerpo vegetal hacia la atmosfera (Sanchez, 2015).

Para el cálculo de la ETP mensual corregido (obteniendo valores en mm/mes) (ver ecuación 2.1), se debe tener presente las siguientes variables:

- $ETP_{sin\ corr.}$ = ETP mensual sin corregir.
- N = número máximo de horas solar por día.
- d = número de días en un mes.

$$ETP = (ETP_{sin\ corr.}) \left(\frac{N\ d}{12\ 30} \right) \quad (2.1)$$

El $ETP_{sin\ corr.}$ es un dato desconocido pero que puede ser calculado por medio de la ecuación 2.2, teniendo presente las variables como:

- t = temperatura media mensual en °C.
- I = índice de calor anual (ver ecuación 2.3).
- $a = (675)(10^{-9})(I^3) - (771)(10^7)(I^2) + (1792)(10^{-5})(I) + 0.49239$

$$ETP_{sin\ corr.} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (2.2)$$

$$I = \sum i \quad (2.3)$$

En el cálculo del índice de calor anual (ver ecuación 2.3), se debe aplicar la siguiente ecuación a partir de la temperatura media mensual:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (2.4)$$

2.2.3 Fase III

Una vez conceptualizado el sistema hidrogeológico de la cuenca, se representa mediante dos capas, la capa superior corresponde al acuífero, mientras que la capa inferior representa el basamento. La primera capa ha sido dividida en tres sectores, zona alta (Aq1), zona media (Aq2) y zona baja (Aq3) (Figura 2.6). Esta última ha sido

discretizada espacialmente en ocho subzonas acorde a la recarga lateral impuesta en el modelo.

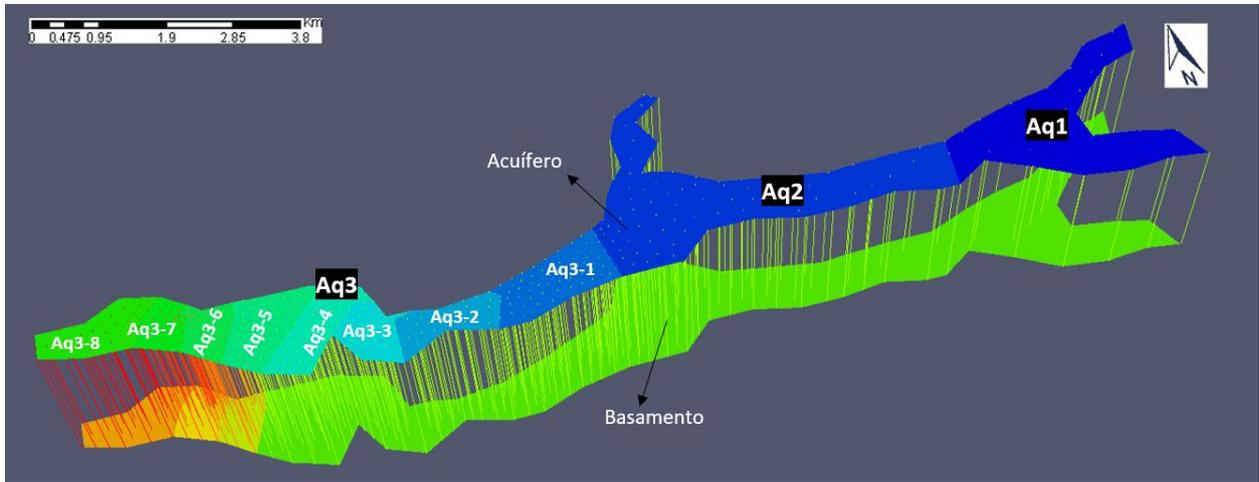


Figura 2.6. Zonificación del acuífero (primera capa).

Las transmisividades, el coeficiente de almacenamiento, la porosidad y dispersividad del acuífero, corresponden a las tres principales zonas de la primera capa. En la segunda capa, el basamento del acuífero en todo su dominio presenta una única zona de estos parámetros.

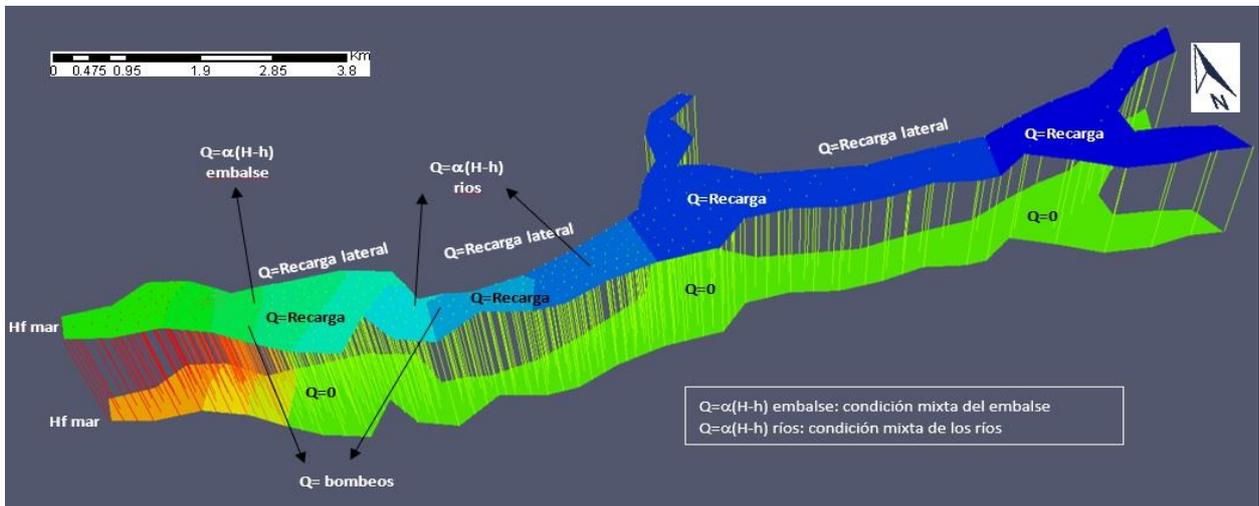


Figura 2.7. Condiciones de contorno del modelo de flujo.

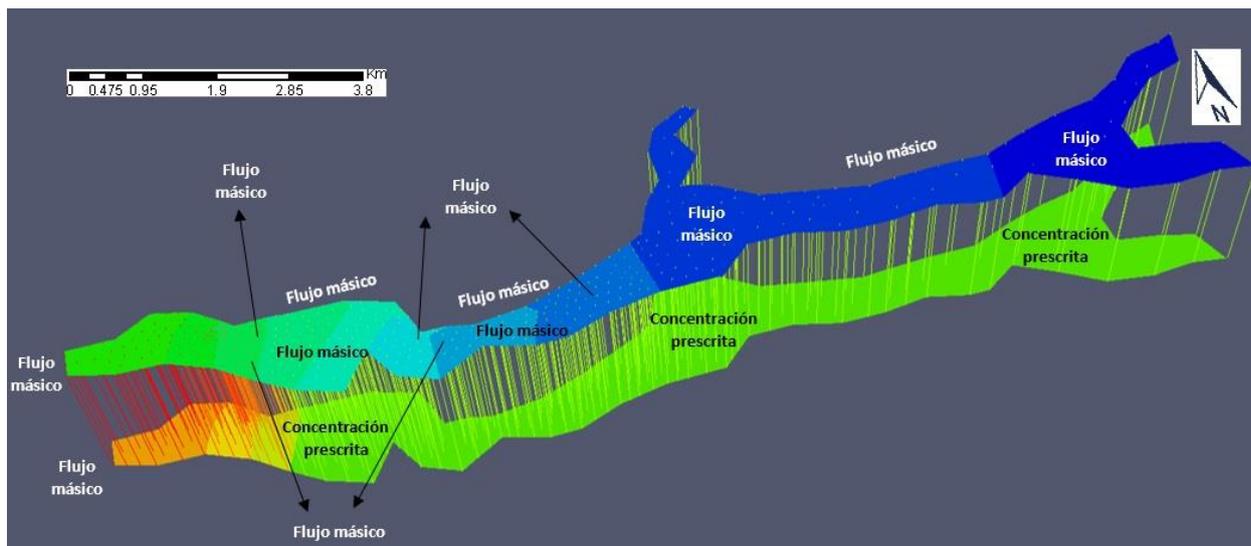


Figura 2.8. Condiciones de contorno del modelo de transporte.

La recarga del acuífero proveniente de la infiltración de las precipitaciones se representa en una única zona que corresponde a los aluviales. La recarga lateral se da en todo el borde del acuífero, a excepción de las zonas más próximas al mar, dado que se encuentra urbanizada.

Las condiciones de contorno de flujo y transporte impuestas en el modelo se muestran en la Figura 2.7 y Figura 2.8, y las especificaciones de las mismas en la Tabla 2.4, y la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Condiciones de contorno en el problema de flujo.

Condiciones de contorno	Primera capa	Segunda capa
Nivel prescrito	Nivel del mar	Nivel del mar
	Embalse (tape) Ríos	
Flujo prescrito	Bombeo Recarga lateral	$Q = 0$
Condición mixta o de Cauchy (filtrado)	Embalse (tape) Ríos	-

Tabla 2.6. Condiciones de contorno en el problema de transporte.

Condiciones de contorno	Primera capa (Flujo másico)	Segunda Capa
Condiciones externas	Nivel del mar Embalse (tape) Ríos Recarga lateral Bombeo	Nivel del mar (Flujo másico) Basamento (concentración prescrita)

Las condiciones iniciales utilizadas en el modelo de densidad constante fueron la resolución del problema de flujo y transporte del primer paso de tiempo, puesto que la estabilidad numérica del modelo permitió pasar directamente al modelo transitorio. Este modelo fue realizado como paso previo a la modelación en densidad variable.

Las condiciones iniciales para el modelo en densidad variable fueron la solución del problema de flujo y transporte en densidad constante. Tanto en el modelo de densidad constante, como en el de densidad variable, se utilizaron niveles equivalentes de agua dulce.

La discretización temporal del presente trabajo se llevó a cabo desde el primero de mayo 2018 hasta el 30 de septiembre del 2020, comprendiendo 29 meses de simulación. La discretización espacial se efectuó con un mallado de 952 nodos y 2068 elementos, en la que las partes con mayor refinación del mallado, se la realizó en la zona baja del acuífero, debido a que en ese sector presenta alta actividad hidráulica y de descarga de agua subterránea, así como el sector donde ingresa el agua de mar.

2.2.4 Fase IV

En esta sección se obtienen los resultados referentes al modelo numérico de flujo y transporte, que posteriormente fueron analizados para ampliar el conocimiento del comportamiento en los niveles piezométricos y concentraciones TDS del acuífero. Dado esto por los efectos de la recarga natural y artificial que se produce por el embalse de agua en el tape. Además, de la concentración en los pozos próximos al mar por la intrusión marina y en los pozos al interior de la cuenca por la influencia del basamento salino.

De igual forma, se procedió a analizar y comprender los datos obtenidos del balance hídrico como:

- Evapotranspiración Potencial diaria, mensual y anual.
- Los principales parámetros o características del suelo.
- Volumen de la recarga (natural y artificial) mensual y anual.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1.RESULTADOS

3.1.1 Base de datos hidrogeológicos

Se recolectó información de 11 pozos de agua ubicados en la cuenca del río Manglaralto. Los datos seleccionados son los siguientes: parámetros físico-químicos del agua, niveles piezométricos, extracción diaria y el registro de las precipitaciones y temperatura de la estación meteorológica más próxima a la cuenca (código nacional: M0619).

Se realizó esta recopilación con el fin de tener un orden y formato técnico de la información hidrogeológica, tanto hidráulica, físico-química y geológica. Además, para visualizar de manera general el comportamiento en cada pozo según el mes y año determinado y su relación directa con los niveles piezométricos, la extracción diaria, las precipitaciones y temperaturas. Posteriormente, los datos mencionados fueron procesados e ingresados al Software Visual Transin 4.0.

El volumen diario de agua extraída por la bomba depende del HP de la misma, la cual viene dada por diseño de fábrica. En el caso de los 11 pozos analizados se tiene que los pozos P2, P4, P6, P7, P11 y P12 poseen una bomba de 10 HP, mientras que los pozos P3, P5, P8 y P9 utilizan una bomba 7HP. Sin embargo, no necesariamente ese es el valor real al que la bomba extrae el agua, en este caso, el valor de la extracción diaria dependerá estrictamente del nivel piezométrico al que se encuentre el agua en cada pozo, es decir, si el nivel de agua se encuentra relativamente bajo la extracción de la bomba será menor a la de otro nivel que sea considerado superior al anterior, es decir, dependerá de la transmisividad del acuífero, que viene dado por la permeabilidad y el espesor saturado.

Se evidenció como influyen las precipitaciones y temperaturas en los niveles piezométricos de los pozos. Por ello, en épocas de lluvia (diciembre-abril) los niveles se incrementan (aumenta el espesor saturado) y el funcionamiento de la bomba mejora

notablemente, y hasta puede alcanzar su potencia ideal (7HP o 10HP), mientras que en épocas de sequía (septiembre-noviembre), la bomba disminuye significativamente su extracción debido a la disminución de los niveles, a tal punto de poder dañarse por extraer aire, dado que el espesor saturado disminuye y con ello el rendimiento del pozo. Esta realidad se debe a que los niveles dependen de la recarga natural y artificial del acuífero, la cual se ve influenciada por las lluvias, condiciones climatológicas y la implementación del tape a partir de técnicas ancestrales para la retención de agua.

Según los datos registrados de TDS se determinó que la concentración más alta está presente en los pozos cercanos al mar (P2, P3 y P4), donde se aproxima el agua de mar, a diferencia de los otros pozos al interior de la cuenca que dependen de la concentración del basamento del acuífero. También se llevó a cabo el cálculo de la densidad relativa (densidad de la sustancia) para cada muestra de agua en su respectivo pozo, partiendo de la densidad de agua pura (1000 mg/ml) y los TDS obtenidos en las diversas campañas de campo.

3.1.2 Balance hídrico del suelo

El balance realizado mediante el Software Easy Balance (Versión 4.0), permitió determinar la ETP y la recarga que ingresa al acuífero. En la estimación de la ETP se utilizaron los datos de la temperatura media mensual del periodo de simulación.

Los datos y resultados de la estimación de la ETP y la recarga se muestran en la Tabla A.1 y Tabla A.2 en la sección de Anexos.

En marzo, tanto en el 2018, 2019 y 2020, tiene mayor valor de ETP (mm), con 200.16; 197.55 y 193.70 respectivamente (Tabla 3.1). El año que presenta mayor valor de este parámetro, se encuentra en el 2019 con 1596.95, mientras que en el 2020 hasta el mes de septiembre es de 1303.27 (Tabla 3.2) comparando con los años 2018 y 2019 para el mismo periodo es de 1257.98 y 1270.92, obteniendo que la ETP en el año 2020 es mayor. En el 2019 se tiene el mayor valor de la recarga con un valor de 20.3 mm.

Tabla 3.1. Valores máximos mensuales obtenidos en la recarga y ETP del sistema.

Año	Recarga[mm]			ETP [mm]
	Febrero	Marzo	Agosto	Marzo
2018	5.6	-	7.3	200.16
2019	9.9	3.2	7.3	197.55
2020	3.8	-	-	193.70

Tabla 3.2. Datos anuales de las precipitaciones y valores obtenidos en la recarga y ETP.

Año	Recarga [mm]	ETP [mm]	Precipitaciones [mm]
2018	12.9	1584.89	127.3
2019	20.3	1596.95	213.4
2020	3.8	1303.27	38

Previo a la estimación de la recarga, se determinaron los parámetros característicos del suelo en la cuenca de estudio, tales como: capacidad de campo, humedad inicial, espesor radicular y punto de marchitez, los cuales se describen en la Tabla 3.3. La recarga calculada para este periodo resultó de 37 mm, lo que corresponde al 11.4% de las precipitaciones.

En la Tabla 3.1 se observan los meses que influyen en el valor de la recarga, siendo febrero y marzo los más significativos debido a las intensas lluvias, mientras que en los meses de julio-agosto ocurren precipitaciones de baja intensidad conocidas como garúas, infiltrándose en la terraza aluvial y proporcionando recarga en el acuífero. Cabe debe mencionar que, a más de las precipitaciones, la recarga se ve influenciada por las características del suelo (Tabla 3.3) y por la ETP que se ha determinado anteriormente.

Tabla 3.3. Características del suelo.

Capacidad de campo (contenido volumétrico)	0.1
Humedad inicial (contenido volumétrico)	0
Espesor radicular del suelo (m)	0.25
Punto de marchitez (contenido volumétrico)	0.100
Valor de laminación (mm)	10

3.1.3 Balance de masas

El balance de masas en el modelo de flujo en régimen transitorio en condiciones de densidad variable, indica que las entradas se dan por:

- Recarga por infiltración de la precipitación en el aluvial (2.35 hm³/a).
- Recarga lateral en el borde del acuífero (32.21 hm³/a).
- En el embalse y la red hídrica representada por una condición mixta o de goteo (3.68 hm³/a).
- Un nivel constante que representa el agua de mar ingresando al acuífero (1hm³/a).

Las salidas del sistema hidrogeológico se producen por:

- La extracción por bombeo (34.01 hm³/a).
- En la red hídrica en la zona más alta del acuífero (2.63 hm³/a).
- Nivel constante que representa la descarga acuífera hacia el mar (1.22 hm³/a).

3.1.4 Modelo numérico de flujo y transporte

3.1.4.1 Calibración

La calibración del modelo de flujo se basó en los siguientes parámetros estadísticos: i) en el error medio absoluto (ϵ) de los niveles piezométricos, se estimó como la sumatoria de las diferencias absolutas entre los niveles calculados (H_{cal}) y número de observaciones totales (H_{obs}), ii) el error cuadrático medio (RMS), y iii) la desviación estándar. El error medio absoluto fue de 0.0082, RMS de 0.12 y la desviación estándar de 0.5.

La estrategia de calibración consistió en una etapa manual basada en el criterio de prueba y error, y una automática que proporciona el Software Visual Transin 4.0, que consiste en minimizar una función objetivo que considera, además del ajuste piezométrico entre valores medidos y calculados, la plausibilidad de los parámetros calculados.

Durante este proceso, la zonificación de la zona baja del acuífero se modificó al existir inconsistencias en la reproducción de los niveles medidos, zonificándola en ocho subzonas de transmisividades y coeficientes de almacenamiento en la primera capa.

El ajuste piezométrico entre niveles calculados y medidos (“computed” y “measured”, respectivamente en inglés), indica que la calibración de los parámetros presenta un buen ajuste, con un coeficiente de correlación lineal (R^2) de 0.9818 (Figura 3.1), lo que indica la robustez de la representación numérica por las condiciones de contorno que representan el medio físico natural.

Los parámetros calibrados de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento en el modelo de flujo, tanto en densidad constante como en el de variable se muestran en la Tabla 3.4.

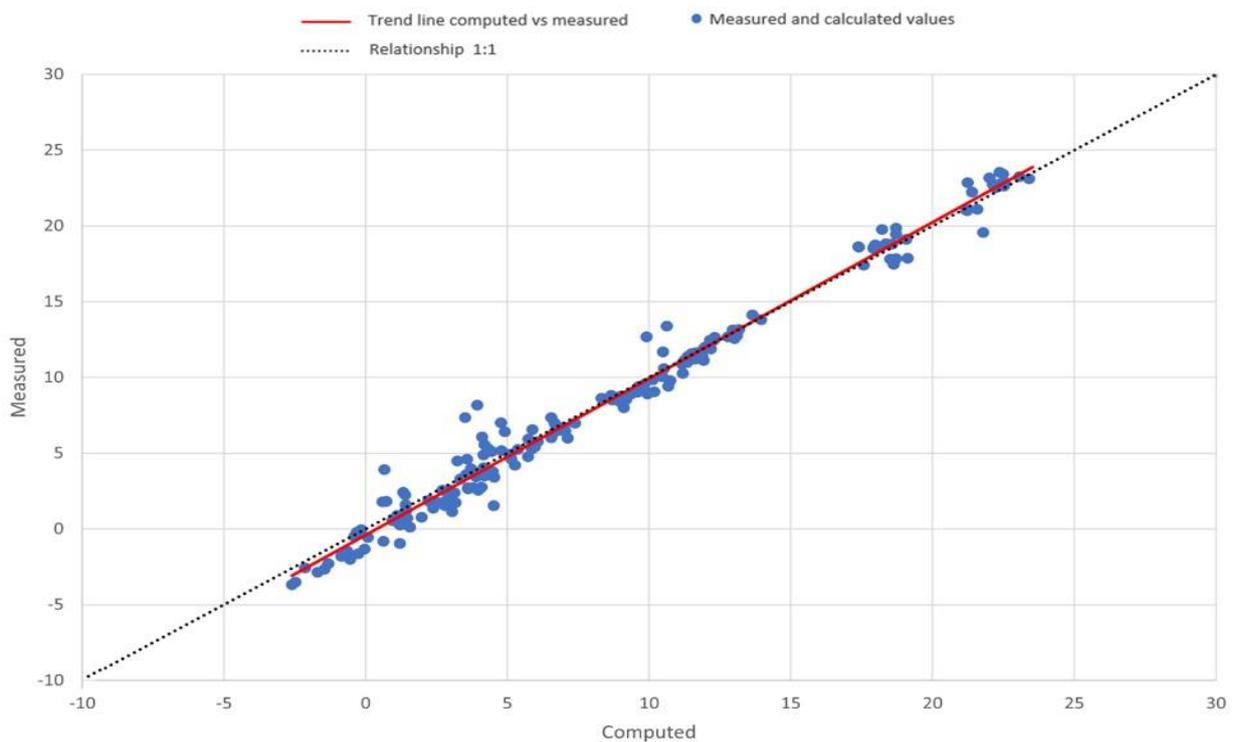


Figura 3.1. El ajuste estadístico entre los niveles medidos y calculados.

Tabla 3.4. Parámetros calibrados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del modelo de flujo en densidad constante y variable.

Capas	Zonas		Transmisividad	Coficiente de almacenamiento
Capa 1	Alta	Aq1	200	0.1
	Media	Aq2	600	0.1
	Baja (Aq3)	Aq3-1	1000	0.1
		Aq3-2	1000	0.1
		Aq3-3	1000	0.1
		Aq3-4	1000	0.1
		Aq3-5	1000	0.1
		Aq3-6	1000	0.2
		Aq3-7	2000	0.2
Aq3-8	1000	0.1		
Capa 2	Una zona en todo el dominio		0.00000001	0.2

3.1.4.2 Recarga lateral

La escorrentía superficial del resto de la cuenca se representa mediante la recarga del borde del acuífero. Denominada lateral, la cual es un aporte hídrico significativo al sistema, siendo estimada por Visual Transin 4.0, que considera los parámetros de transmisividad, almacenamiento y bombeo, los que se ajustan a los niveles medidos de los 11 pozos utilizados para esta simulación.

La conceptualización de la recarga lateral proporcionó a la simulación unos niveles calculados muy próximos a los medidos, acercándose a la realidad del medio físico de este sistema hidrogeológico. El borde del acuífero se dividió en segmentos, recalando que gran parte de los datos utilizados en el presente trabajo se obtuvieron en la zona baja, que es donde se ubican los pozos para este estudio.

3.1.4.3 Densidad constante

Modelo de flujo

La zona alta del acuífero presenta un espesor de 5 m y en la zona media un espesor de 10 m. La zona baja donde se desarrolla la mayor potencia de los materiales porosos y permeables alcanza espesores de aproximadamente 30 m. Los parámetros calibrados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento indican que la permeabilidad promedio en todo el aluvial es de aproximadamente 40 m/d (metros/día), con un coeficiente de almacenamiento de 0.2.

La piezometría calculada está acorde a la piezometría medida, es decir, el modelo reproduce las características hidráulicas observadas en el campo. La representación del del mismo se visualiza en la Figura 3.2.

Los pozos más próximos al mar presentan en general un buen ajuste piezométrico, sin embargo, en los pozos P2 y P3 en ciertos periodos de tiempo, que corresponden al inicio de la época de precipitaciones del 2019 (húmeda), es donde no se logra reproducir la piezometría observada, mientras que el P4 presenta un buen ajuste. Los pozos al interior de la cuenca P5, P6, P7, P8, P9 y P10 presentan el mejor ajuste piezométrico del presente trabajo. En los pozos P11 y P12, los niveles piezométricos calculados (computed) contra los medidos (measured) son aceptables (Figura 3.2).

Los hidrogramas del modelo de flujo y transporte de los 11 pozos estudiados tanto en densidad variable y constante, se encuentra en la sección de Anexos.

Modelo numérico de flujo en densidad constante

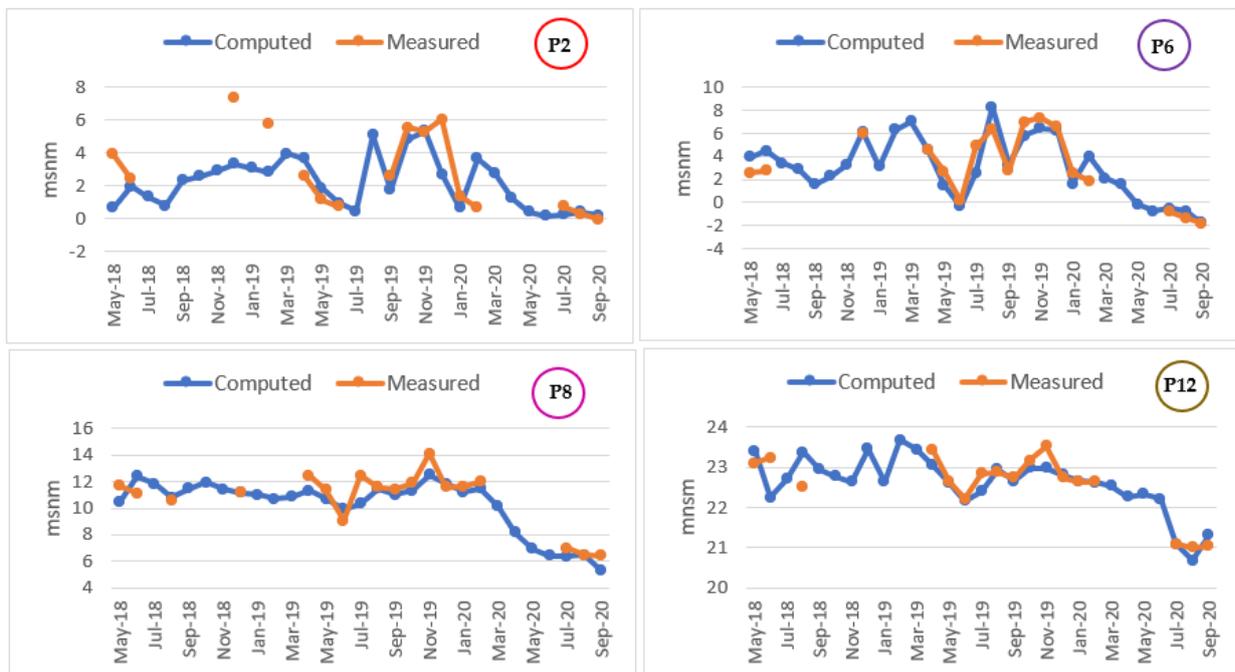
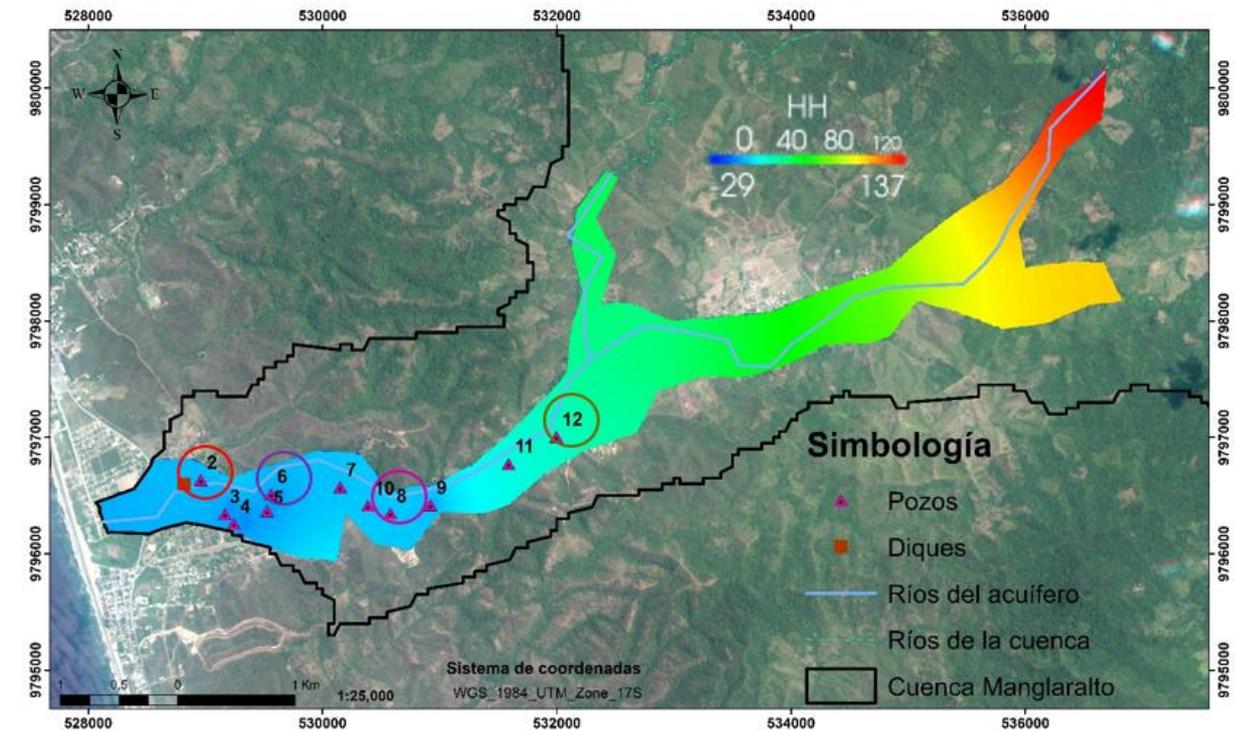


Figura 3.2. Modelo de flujo en densidad constante e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.

Modelo de transporte

En el pozo P2, las concentraciones medidas en el campo presentan variaciones bruscas, pasando de 1000 mg/l a 6600 mg/l en el intervalo de un mes, haciendo que la reproducción de estas concentraciones por parte de Transdens 2.0 sea complejo. Los

pozos P3, P4, P5, P6 y P7, presentan un buen ajuste en concentraciones (TDS), es decir que el transporte se reproduce aceptablemente. En el pozo P8 y P9 las concentraciones calculadas se encuentran por debajo de las medidas, con un ajuste moderadamente aceptable. En los pozos P11 y P12 las concentraciones calculadas se encuentran por encima de las medidas, indicando que estos pozos son los que poseen más concentración salina en el interior de la cuenca, debido a que se encuentran ubicados muy próximos a la zona media, que posee concentraciones por encima de los 1500 mg/l en TDS. El comportamiento general de los pozos mencionados se observa en la Figura 3.3.

Modelo numérico de transporte en densidad constante

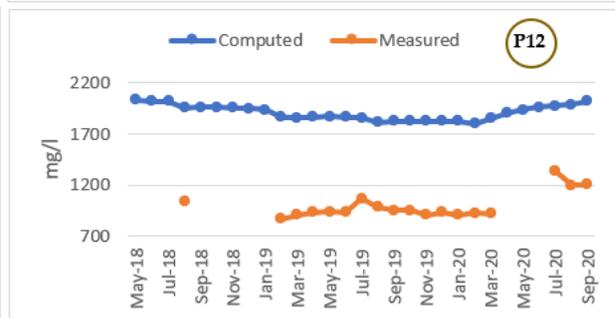
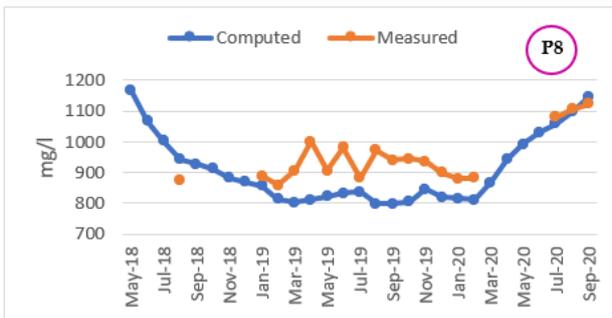
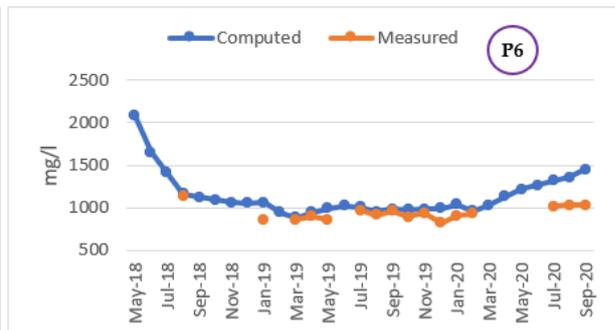
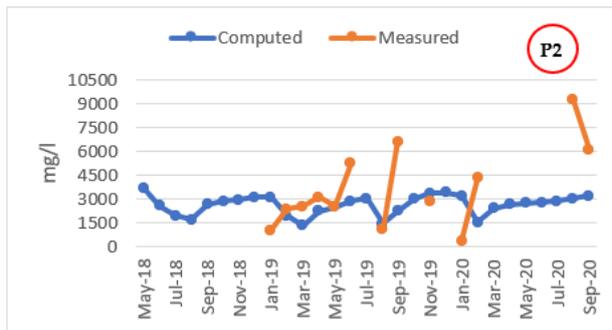
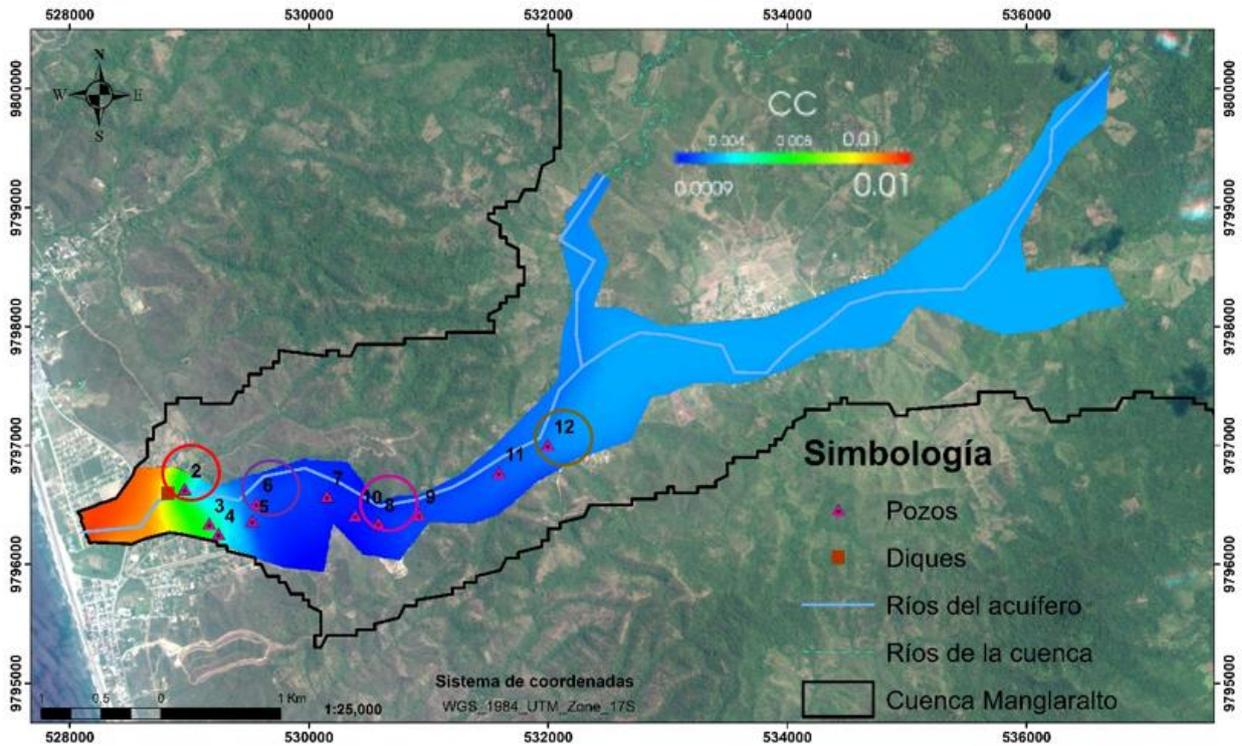


Figura 3.3. Modelo de transporte en densidad constante e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.

3.1.4.4 Densidad Variable

Modelo de flujo

En todos los pozos, a excepción de los pozos P11 y P12, la piezometría calculada se aproxima a la medida, lo que lleva a un buen ajuste piezométrico que se observa en la Figura 3.4. En los pozos P11 y P12, los niveles calculados se encuentran por debajo de los medidos, sin embargo, el ajuste se puede considerar relativamente aceptable.

De manera general, este modelo en condiciones de densidad variable reproduce la conceptualización del flujo subterráneo en la que los once pozos presentan una actividad hidrodinámica por el bombeo de extracción, provocando que los niveles del acuífero se depriman sin recarga por la ausencia de las precipitaciones, lo que hace que estos niveles no se recuperen en un corto tiempo.

Modelo numérico de flujo en densidad variable

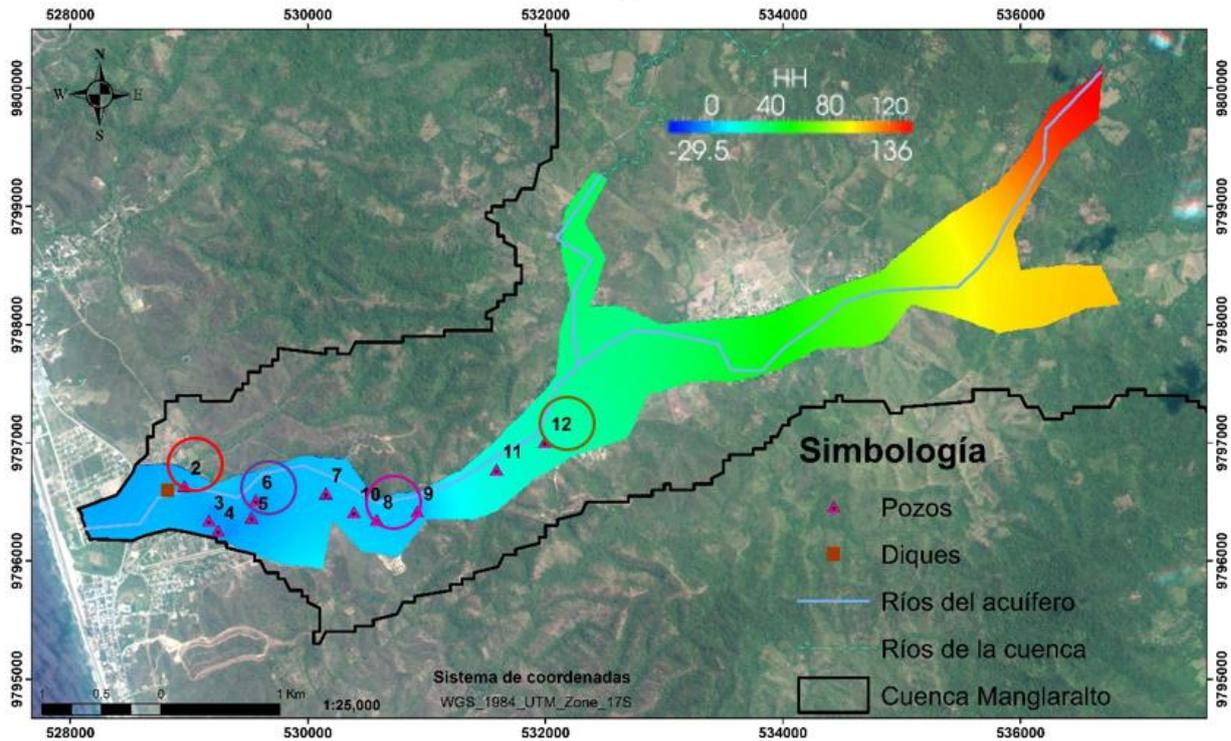


Figura 3.4. Modelo de flujo de densidad variable e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.

Modelo de transporte

En este modelo se considera la variabilidad de la densidad de los flujos presentes en la cuenca, los cuales inciden en el acuífero y presentan de un buen ajuste (Figura 3.5), similar a las concentraciones calculadas en el modelo de transporte con densidad

constante. Las fuentes de concentración del flujo subterráneo son el mar y el basamento o sustrato.

En los pozos P11 y P12 existe mayor concentración al interior de la cuenca, puede darse por una mezcla del agua de recarga con agua concentrada, producto de los materiales presentes en este sustrato. La alta variabilidad en el pozo P2 está influenciada por su proximidad al borde costero, indicando la presencia de la intrusión salina.

Modelo numérico de transporte en densidad variable

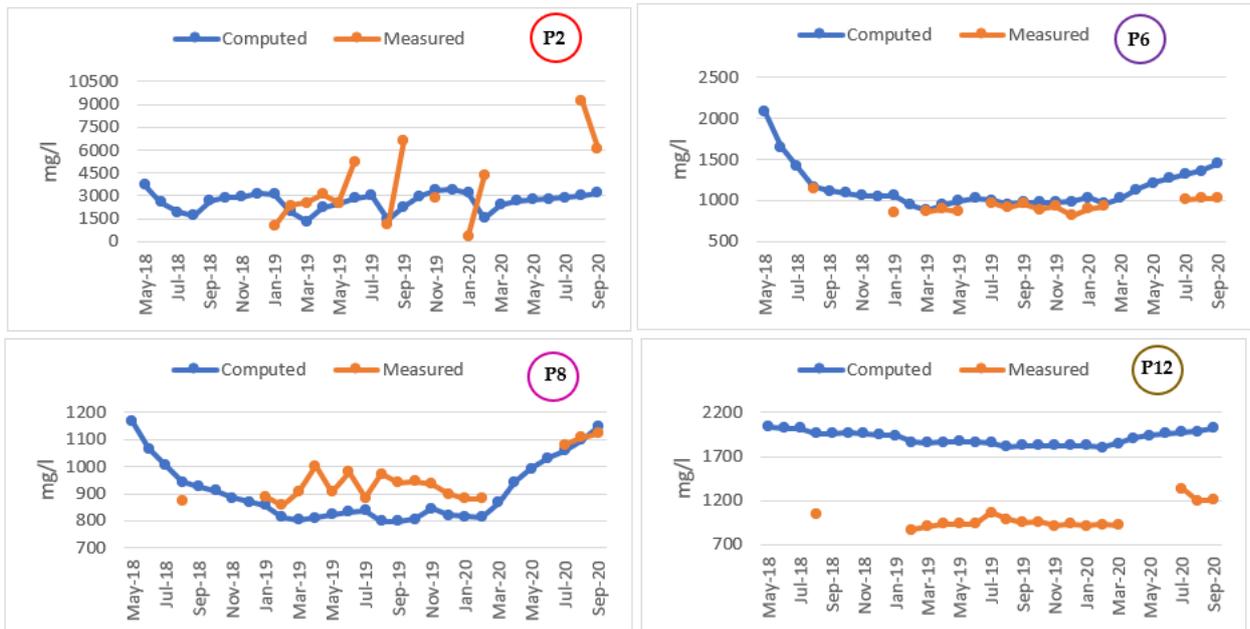
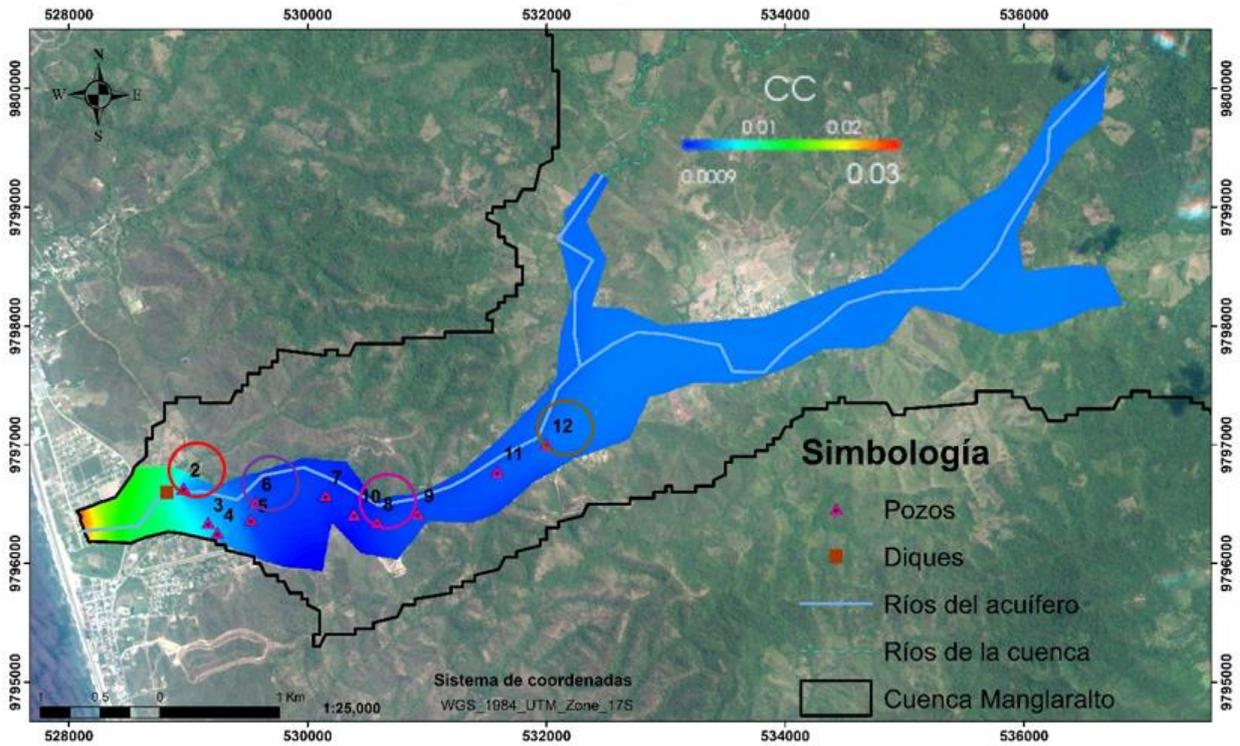
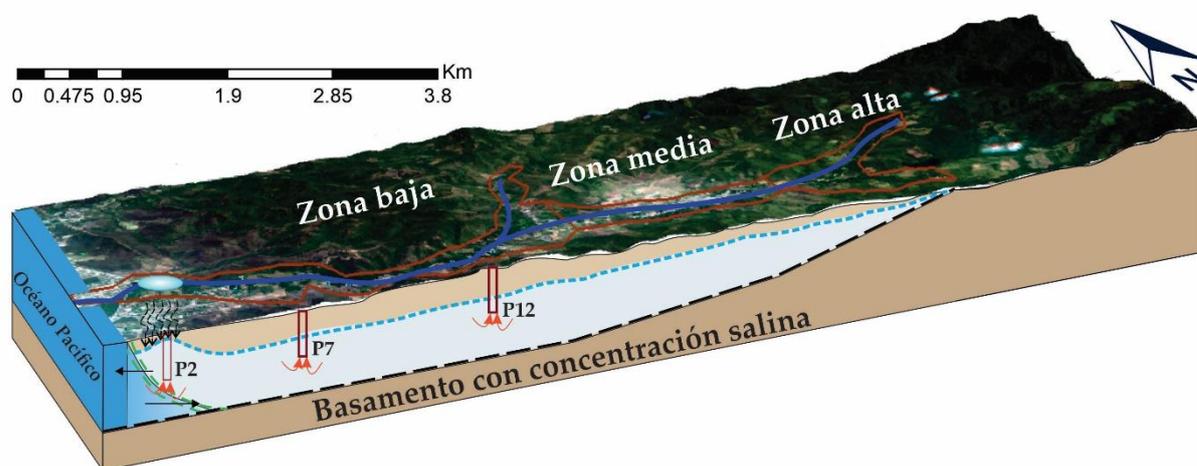


Figura 3.5. Modelo de transporte de densidad variable e hidrogramas de los pozos P2, P6, P8 y P12.

En la Figura 3.6 se sintetiza el sistema analizado en este estudio, considerando sus partes geográficas e hidrogeológicas. Se visualiza el efecto hidráulico de la infiltración producida por el tape cercano al pozo P2, así como el avance de la intrusión salina en la cuenca y la importancia del tape en las concentraciones (TDS) del agua y niveles piezométricos del acuífero.

La concentración del agua en el basamento y en el borde costero por el agua de mar, inciden en la calidad del agua subterránea para el consumo humano y abastecimiento de las comunidades.



Simbología

	Nivel freático		Ingreso de agua de mar
	Zona de transición (H ₂ O acuífero-H ₂ O mar)		Descarga de agua subterránea
	Ríos		Pozos
	Flujo por bombeo		Acuífero
	Reservorio		Borde del acuífero
	Infiltración		

Figura 3.6. Síntesis esquemática del sistema hidrogeológico del acuífero costero Manglaralto.

3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los hidrogramas, tanto del modelo de flujo de densidad constante como el de densidad variable, obtenidos a partir de los niveles piezométricos medidos en campo y los calculados por Visual Transin 4.0, de manera general, reproducen el comportamiento hidrodinámico del sistema hidrogeológico. Los niveles piezométricos de los pozos P2, P3 y P4 se encuentran influenciados por el tape, debido a que en esta zona los niveles piezométricos se mantienen entre 0 msnm y 6 msnm. Sin esta estructura no se mantendrían los niveles en el intervalo antes mencionado, si no que decaerían considerablemente. El tape ocasiona una recarga artificial, que hidráulicamente hace que se produzca una mayor infiltración, ocasionando que los niveles piezométricos debido a esta estructura se incrementen. La cercanía o lejanía del tape influye en los niveles piezométricos del agua, análogo a lo que se produce en el modelo numérico de (Motallebian et al., 2019) en el que se simula los efectos de la recarga artificial por un

canal en el cauce de un río, almacenando agua en la superficie, que luego se infiltra hacia el acuífero, aumentando los niveles en las proximidades y formando una barrera contra la intrusión salina.

En los puntos donde no se logra reproducir la piezometría se debería redefinir los parámetros de recarga natural y bombeo en los pozos al interior de la cuenca, mientras que, en los pozos próximos al mar, a más de estos parámetros, se debe revisar la hidráulica que crea el tape. Debido a que, al aumentar la infiltración en esta zona, el comportamiento de los niveles piezométricos va a depender del volumen que infiltre y en que periodos de tiempo. Situaciones similares a la piezometría producida por los efectos de distintos métodos de recarga artificial alrededor del mundo presentado por (Bouwer, 2002).

El modelo de transporte en densidad constante y variable presenta un ajuste aceptable de las concentraciones. En el interior de la cuenca la concentración que presentan los pozos ubicados en esta zona, proviene de los materiales que conforman el sustrato del acuífero, el cual ha estado sujeto a las regresiones y transgresiones del mar hacia el continente (Morante et al., 2019), lo que ha ocasionado que en el basamento se encuentren materiales evaporíticos, que con el agua se encuentran en disolución. En la zona baja del acuífero donde se ubican los pozos de estudio, con una potencia aproximada de 30 m y un espesor saturado de aproximadamente 20 m, el acuífero presenta una cierta sostenibilidad. Sin embargo, cuando la recarga producto de la infiltración de las precipitaciones disminuye, el espesor saturado también, llevando a que el bombeo se aproxime a este sustrato con mayor concentración produciendo una mezcla con el agua del acuífero.

En los pozos P2, P3 y P4 las fuentes de concentración son el sustrato y el mar. Esto se evidencia con los altos valores que alcanzan estos pozos, principalmente el P2, que tiene las más altas concentraciones de este sistema (hasta 9200 mg/l). Por otro lado, los valores de estos pozos disminuyen considerablemente en los periodos donde se dan las precipitaciones (enero-mayo) y las garúas (julio-agosto), que ocurren en toda la cuenca. Estos eventos de precipitaciones y el tape facilitan el embalse de agua que refuerza la recarga artificial que influye en estos pozos.

Las concentraciones obtenidas por la simulación numérica indican que la intrusión marina se encuentra presente en el interior de la cuenca hasta aproximadamente 1 Km desde el borde costero. La zona de transición, agua de mar-agua del acuífero, infiere que se encuentra alrededor de los pozos P2, P3 y P4. Este avance de la intrusión, hasta donde se ubican estos pozos, se debe a los altos periodos de bombeo, actividad antrópica necesaria para el desarrollo de las comunidades, como lo indican (Lèye et al., 2018) y (Motallebian et al., 2019), lo que refuerza los resultados obtenidos en el presente estudio. Los periodos secos afectan en la disminución de la recarga, que es donde la importancia del tape se hace evidente, dado que, sin éste, el frente de avance de la intrusión marina se encontraría más al interior de la cuenca, haciendo que estos pozos aumenten su concentración TDS y con esto disminuyendo la calidad del agua. Esto se basa en el aporte prolongado de la infiltración donde está ubicado el embalse, provocando que las concentraciones disminuyan.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se configuró un modelo numérico de flujo y transporte utilizando el Software visual Transin 4.0, con el cual se refleja la realidad del medio físico a través del registro de TDS y nivel piezométrico de cada pozo desde el 2018 al 2020, logrando así brindar una ayuda útil en la gestión y cuidado del acuífero costero Manglaralto. El modelo numérico de flujo y transporte en condiciones de densidad constante y densidad variable muestra la importancia hidráulica y ambiental producida por el tape. Los niveles piezométricos aumentan considerablemente en los sitios más próximos donde este se emplaza, dado que se produce recarga artificial por la infiltración desde el embalse, ocasionando que los niveles se mantengan por más tiempo, y con esto que el agua subterránea reduzca la concentración (TDS), mejorando su calidad.

El uso de Visual Transin por medio de la base de datos proporcionada por JAAPMAN y CIPAT-ESPOL, permite conocer el nivel de concentración (TDS) que presenta el agua del acuífero en el interior de la cuenca, la cual está siendo influenciada por la disolución de materiales presentes en el sustrato y mezclándose con agua de la recarga debido a la infiltración de las precipitaciones y por efectos del bombeo. Los pozos más próximos al mar tienen sus concentraciones por la intrusión de agua de mar, y el propio sustrato del acuífero. Por lo que en el sistema hidrogeológico existen dos fuentes de concentración en las aguas subterráneas.

La ETP y la recarga del acuífero obtenida por medio del Software Easy Balance se establecen como una referencia del medio físico estudiado, permitiendo relacionar los datos obtenidos por Visual Transin con la realidad de la zona de interés, logrando así determinar correctamente los valores de las condiciones de contorno estipuladas en el Software para el diseño del modelo elaborado.

La simulación numérica muestra que la intrusión marina se encuentra presente, que el frente de avance hacia el interior de la cuenca se halla aproximadamente en las proximidades de los pozos P2, P3, y P4. El tape incide en este avance, dado que la recarga es mayor en esa zona. La intrusión marina no puede ganar más terreno y se mantendría en este sector, por lo que sin esta recarga artificial la concentración aumentaría avanzando hacia los demás pozos. El tape, estructura hidráulica del rescate del conocimiento ancestral, se convierte en un eje de gestión que ayuda a aumentar las reservas y a detener la intrusión salina.

4.2. Recomendaciones

La hidrodinámica provocada por el tape lleva que los niveles y concentraciones TDS sean muy variables en sus proximidades. Es necesario realizar un estudio enfocado a esta variabilidad, para ampliar el conocimiento y alcanzar a reproducir el comportamiento hidráulico de esta zona, dado que es muy importante, tanto para el abastecimiento respecto al volumen, como para la calidad de agua debido a la intrusión salina.

El tiempo de simulación del presente estudio fue de 29 meses (desde mayo 2018 hasta septiembre 2020). En futuras investigaciones, se debería utilizar el presente modelo numérico con sus respectivos datos posterior a la fecha de simulación, con el fin de calibrar y validar la robustez del modelo a lo largo del tiempo, utilizando datos de niveles piezométricos y concentraciones TDS.

Los pozos ubicados cerca del mar (P2, P3 y P4), se encuentran influenciados por la intrusión salina, comprobando que la cuña de intrusión se encuentra retenida por la recarga artificial que ocasiona el embalse por el tape, consiguiendo que la calidad de agua se mantenga por mayor tiempo. Por ello, es recomendable la implementación de tapes más próximo al mar, para que esta barrera se encuentre antes de los pozos mencionados anteriormente. También sería óptimo construir de cuatro a cinco tapes a lo largo del cauce del río (hacia el interior de la cuenca) para aumentar la recarga artificial, con esta aplicación se mantendrían los niveles piezométricos y mejoraría la calidad de agua.

La calibración de los modelos numéricos de forma manual por el método de prueba y error, en ocasiones resulta complicado cuando se trabaja con muchos parámetros, lo

que puede llevar a futuros errores en los resultados de la simulación. El Software Visual Transin 4.0 proporciona una calibración automática, que al utilizar una función objetivo minimiza los residuos de niveles calculados y observados, consiguiendo una mejor eficiencia de los resultados, por lo que se recomienda utilizar ambas calibraciones.

Un estudio complementario que puede favorecer en el entendimiento de la zona de estudio (especialmente del subsuelo), es por medio de trabajos geoelectricos, tales como SEVs y Tomografías, los cuales permiten comprender el estado actual de los estratos que conforman el acuífero y su contorno. De esta forma, se puede realizar un modelo en 3D por medio de diversas herramientas que utilizan estos datos generados, logrando así tener un análisis más profundo y exacto del acuífero costero Manglaralto.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2001). *El Agua Potable*.
http://www.elaguapotable.com/ATSDR_El_Agua_Subterranea_Hoja_Informativa.htm
- Allende, T. C., & Mendoza, M. E. (2007). Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo Hydrometeorological analysis of Cuitzeo Lake watershed. *Investigadores Geográficos, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM, 8701*, 56–76. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n63/n63a5.pdf>
- 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*. 129.
- Arfib, B., De Marsily, G., & Ganoulis, J. (2007). Locating the zone of saline intrusion in a coastal karst aquifer using springflow data. *Ground Water, 45*(1), 28–35. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00252.x>
- Armando Garzaro, J. C. (1990). *Estudio Hidrogeológico de la cuenca baja del río Manglaralto, provincia del Guayas*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3419>
- Ávila-Dávila, L., Soler-Méndez, M., Madrona-Sánchez, P., Ruiz-Canales, A., Bautista-Capetillo, C. F., González-Trinidad, J., & Molina-Martínez, J. M. (2019). *Análisis de la velocidad de infiltración del agua en el suelo saturados mediante lisímetros de pesada*. 642–648. https://doi.org/10.26754/c_agroing.2019.com.3370
- Benitez, S., Berrones, G., Montenegro, G., & Zambrano, I. (1995). Floored Fore-Arc Setting : Southern Coastal Ecuador During Late Cretaceous – Late Eocene Time. *Petroleum Basins of South America*, 615–631.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal, 10*(1), 121–142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>

Bravo Montero, L. K. (2020). *Gestión integral de cuencas hidrográficas con uso conjunto de aguas, aplicando el sistema de siembra y cosecha de agua. Manglaralto-Santa Elena-Ecuador.*

Campoverde Cabrera, J. H., & Fajardo Gonzalez, I. A. (2018). *Contribución de la geología aplicada para la mejora en el diseño de un dique en la subcuenca del río Manglaralto, provincia de Santa Elena.*
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/47513>

Capaccioni, B., Didero, M., Paletta, C., & Didero, L. (2005). Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): Dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. *Journal of Hydrology*, 307(1–4), 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.037>

Carretero, E. M. (2007). *ARGENTINA BIOLOGICAL AND CULTURAL DIVERSITY IN THE HIGH CENTRAL Línea de Base de la Reserva de Biosfera San Guillermo -San Juan.*
https://www.researchgate.net/profile/Juan_Acosta6/publication/230746040_DIVERSIDAD_BIOLOGICA_Y_CULTURAL_DE_LOS_ALTOS_ANDES_CENTRALES_DE_ARGENTINA_BIOLOGICAL_AND_CULTURAL_DIVERSITY_IN_THE_HIGH_CENTRAL_ANDES_OF_ARGENTINA_Base-line_of_the_Man_and_Biosphere_S

Carrión-mero, P., Morante-carballo, F., Varas, M., Herrera-, G., Briones-bitar, J., Malavé-hernández, J., & Fajardo-gonzález, I. (2020). Applied Geology to the Design of Handcrafted Dikes (Tapes) and its Impact in the Recharge of the Manglaralto Coastal Aquifer , Santa Elena, Ecuador. *18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 0–10.
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.307>

Carrión, P., Herrera, G., Briones, J., Sánchez, C., & Limón, J. (2018). Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 217, 375–386. <https://doi.org/10.2495/SDP180341>

Catuto, M. (2020). "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO MANGLARALTO PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN DE LA PARROQUIA MANGLARALTO PROVINCIA DE SANTA ELENA." UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA.

Cobos Mite, L. E. (2010). *Estudio Integrado del Golfo de Guayaquil del Mioceno al Reciente.*

Consejo Nacional de Recursos Hídricos. (2002). *División hidrografica del ecuador. Memoria técnica, ministerio del ambiente, unidad de cambio climatico.*

Constitución de la Republica del Ecuador. (2008). Constitución de la República del Ecuador 2008. Incluye Reformas, 1–136.
https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf

Dateas. (2020). *Manglaralto - Estaciones Meteorológicas de Ecuador.*
<https://www.dateas.com/fr/explore/estaciones-meteorologicas-ecuador/manglaralto-185>

El Universo. (2015). *Problemas en Manglaralto.*
[www.eluniverso.com/opinion/2015/10/19/nota/5192870/problemas-manglaralto.](http://www.eluniverso.com/opinion/2015/10/19/nota/5192870/problemas-manglaralto)

Ferguson, G., & Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 2(5), 342–345.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1413>

Fondo para la comunicación y educación ambiental, A. . (2017). *AGUA EN EL PLANETA.*
<https://agua.org.mx/en-el-planeta/>

GAD Parroquial Manglaralto. (2020). *Manglaralto.* <http://manglaralto.gob.ec/index.php/ct-menu-item-17/ct-menu-item-35>

García Charria, W. (2015). *El Sistema Complejo de la Cuenca Hidrográfica.*
https://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan-Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/Sistema-Cuenca-Hidrogr%E1fica.pdf

- Geveci, B., & Law, C. (2005). ParaView : An End-User Tool for Large Data Visualization. *The Visualization Handbook*, 717.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & Van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Gricelda, H. F., Paúl, C. M., & Niurka, A. M. (2018). Participatory Process for Local Development: Sustainability of Water Resources in Rural Communities: Case Manglaralto-Santa Elena, Ecuador. *World Sustainability Series*, 663–676. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63007-6_41
- Groundwater Hydrology Group. (2008). *Visual Transin*. GHS. <https://h2ogeo.upc.edu/en/investigation-hydrogeology/Software/152-visual-transin-en>
- Hani, A., Lallahem, S., Mania, J., & Djabri, L. (2006). On the use of finite-difference and neural-network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrological Processes*, 20(20), 4381–4390. <https://doi.org/10.1002/hyp.6173>
- Hantke-domas, M., & Jouravlev, A. (2011). *Lineamientos de política pública para el sector de agua potable y saneamiento*.
- Heredia, J., & Murillo Díaz, J. M. (2007). Estado del arte sobre la representación numérica de sistemas de flujo bajo condiciones de densidad variable. *Boletín Geológico y Minero*, 118(4), 555–576. https://www.researchgate.net/publication/301674214_Estado_del_arte_sobre_la_representacion_numerica_de_sistemas_de_flujo_bajo_condiciones_de_densidad_variable_reedicion_actualizada
- Herrera-Franco, G., Carrión-Mero, P., Aguilar-Aguilar, M., Morante-Carballo, F., Jaya-Montalvo, M., & Morillo-Balsera, M. C. (2020). Groundwater Resilience Assessment in a Communal Coastal Aquifer System . The Case of Manglaralto in Santa Elena, Ecuador. *Sustainability*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/su12198290>

- Herrera-Franco, Gricelda. (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* [Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España,]. <http://oa.upm.es/39347/>
- Herrera Franco, G., Carrión Mero, P., & Briones Bitar, J. (2019). Management practices for a sustainable community and its impact on development, Manglaralto-Santa elena, Ecuador. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2019-July(July)*, 24–26. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.130>
- Herrera Franco, G., Flores Ruíz, D., Herrera Franco, D., & Flores Ruiz, G. (2009). Aspectos socioeconómicos de la gestión del agua y el turismo en las comunas Olón y Manglaralto de la provincia de Santa Elena (Ecuador). *XI Congreso de La AACR 2009. Cooperación Transfronteriza: Andalucía-Algarve-Alentejo*, 13. <http://www.aacr.org/web/congresosAACR/2009/pdfs/mesa2/3-9.pdf>
- Hidalgo, J. J. (2011). *Juan J. Hidalgo*. Groundwater Hydrology Group. https://h2ogeo.upc.edu/Software/transdens/TD-transdens_guia-rapida.pdf
- Hirata, R., Cagnon, F., Bernice, A., Maldaner, C. H., Galvão, P., Marques, C., Terada, R., Varnier, C., Ryan, M. C., & Bertolo, R. (2020). Nitrate contamination in brazilian urban aquifers: A tenacious problem. *Water (Switzerland)*, 12(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12102709>
- Huyakorn, P. S., Andersen, P. F., Mercer, J. W., & White, H. O. (1987). Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model. *Water Resources Research*, 23(2), 293–312. <https://doi.org/10.1029/WR023i002p00293>
- IGM, I. G. M. (1974). *Hoja Geológica Manglaralto. Escala 1:100.000*. https://drive.google.com/file/d/1HwCJFa_TzJHSMjq-%0ASU0vM0mDY5U3Ax5h/view

- Javier Montalván Toala, F., Michelle Catuto Quinde, M., & Gómez, G. R. (2020). Hydrological modeling of the manglaralto river for the generation of flood maps (Santa Elena-Ecuador). *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, July 2020*, 27–31. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.213>
- Lathashri, U. A., & Mahesha, A. (2015). Simulation of Saltwater Intrusion in a Coastal Aquifer in Karnataka, India. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 700–705. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.090>
- Lèye, B., Koko, J., Kane, S., & Sy, M. (2018). Numerical simulation of saltwater intrusion in coastal aquifers with anisotropic mesh adaptation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 154, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.06.008>
- López, J., & Gómez, J. (2007). La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 15 (3), 266–273.
- Mascioli, S., Benavente, M., & Martínez, D. E. (2005). Estimation of transport hydraulic parameters in loessic sediment , Argentina: Application of column tests. *Hydrogeology Journal*, 13, 849–857. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0390-9>
- Morante, F., Montalván, F. J., Carrión, P., Herrera, G., Heredia, J., Elorza, F. J., Pilco, D., & Solórzano, J. (2019). Hydrochemical and geological correlation to establish the groundwater salinity of the coastal aquifer of the Manglaralto River basin, Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 229, 139–149. <https://doi.org/10.2495/WRM190141>
- Morena, F., & Rodriguez, F. (2008). *A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies*. 268–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.007>
- Motallebain, M., Ahmadi, H., Raouf, A., & Cartwright, N. (2019). An alternative approach to control saltwater intrusion in coastal aquifers using a freshwater surface recharge canal. *Journal of Contaminant Hydrology*, 222(February), 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.02.007>

- Nuñez del Arco, E. (2003). *Geología del Ecuador*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://fdocuments.ec/document/libro-geologia-del-ecuador-por-ing-nunez-del-arco.html>
- Ojeda, A., Mc Leod, C., Águila, K., & Pino, M. T. (2018). *Bases para la determinación de las necesidades hídricas del cultivo del calafate in situ, para su adaptación al manejo agronómico*. 1–6. <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR40973.pdf>
- Ordoñez, M. (2006). *Micropaleontología ecuatoriana: Datos bioestratigráficos y paleoecológicos de las cuencas: Graben de Jambelí. Progreso. Manabí, Esmeraldas y Oriente; del levantamiento de la Península de Santa Elena, y de las cordilleras colonche, costera y occidental*. Petroproducción. <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=24908>
- Quiñonez, X. (2019). *MODELO GEOMÉTRICO DEL ACUÍFERO COSTERO DE MANGLARALTO Y SU INCIDENCIA EN EL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DEL AGUA , SANTA. ESPOL*.
- Ruiz-Pico, Á., Cuenca, Á. P., Agila, R. S., Criollo, D. M., Leiva-Piedra, J., & Salazar-Campos, J. (2019). Hydrochemical characterization of groundwater in the Loja Basin (Ecuador). *Applied Geochemistry*, 104(March), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.02.008>
- Sanchez, J. (2015). Evapotranspiración. *Universidad de Salamanca*, 1, 1–9. <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>
- Santos, M. R. P., Santiago, M. M. F., Mendonça, L. A. R., Frischkorn, H., & Filho, J. M. (2014). Modelagem do transporte de cloreto proveniente de esgoto urbano em um aquífero sedimentar usando MT3D: O caso da bateria de poços de Juazeiro do Norte (CE). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 19(3), 283–292. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000698>
- Tojeda, I., Cienfuegos, R., Muñoz, J., & Durán, M. (2003). Numerical Modeling of Saline Intrusion in Salar de Atacama. *Journal of Hydrologic Engineering*, February, 25–34.

<https://doi.org/10.1061/共ASCE弄1084-0699共2003弄8:1共25弄 CE>

UNESCO-PHI. (2012). *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos del Mundo*.

UNESCO. (2015). El Crecimiento Insostenible Y La Creciente Demanda Mundial De Agua. *Wwdr*, 12.
http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf

Valencia, J. (2017). “Análisis Hidrogeológico de la Cuenca del Río Manglaralto para la Caracterización de sus Sistemas Acuíferos.” <http://bazica.org/facultad-de-ingenieria-en-ciencias-de-la-tierra.html?page=4>

Vásquez, C., Ortiz, C., Suárez, F., & Muñoz, J. F. (2013). Journal of Hydrology Modeling flow and reactive transport to explain mineral zoning in the Atacama salt flat aquifer, Chile. *Journal of Hydrology*, 490, 114–125.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.028>

Water Resources Group. (2009). *Charting Our Water Future. Economic Frameworks to Inform Decision-Making (2030 WRG)*.

Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3–26. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>

Werner, J. (1996). *Introducción a la Hidrogeología (I)*. Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

WWAP. (2014). World Water Development Report 2014. *America*, 1.

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A. 1. Datos mensuales de las precipitaciones y valores obtenidos de la recarga y ETP.	iv
Tabla A. 2. Datos anuales de las precipitaciones y valores obtenidos de la recarga y ETP.	iv

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A. 1. Pozo 2 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	v
Figura A. 2. Pozo 3 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	v
Figura A. 3. Pozo 4 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	vi
Figura A. 4. Pozo 6 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	vi
Figura A. 5. Pozo 7 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	vi
Figura A. 6. Pozo 7 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	vii
Figura A. 7. Pozo 8 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	vii
Figura A. 8. Pozo 9 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	vii
Figura A. 9. Pozo 10 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	viii
Figura A. 10. Pozo 11 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	viii
Figura A. 11. Pozo 12 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).....	viii
Figura A. 12. Pozo 2 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	ix
Figura A. 13. Pozo 3 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	ix
Figura A. 14. Pozo 4 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	ix
Figura A. 15. Pozo 5 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	x
Figura A. 16. Pozo 6 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	x
Figura A. 17. Pozo 7 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	x
Figura A. 18. Pozo 8 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	xi
Figura A. 19. Pozo 9 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	xi
Figura A. 20. Pozo 10 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	xi
Figura A. 21. Pozo 11 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	xii
Figura A. 22. Pozo 12 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).....	xii
Figura A. 23. Pozo 2 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xiii

Figura A. 24. Pozo 3 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xiii
Figura A. 25. Pozo 4 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xiv
Figura A. 26. Pozo 5 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xiv
Figura A. 27. Pozo 6 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xiv
Figura A. 28. Pozo 7 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xv
Figura A. 29. Pozo 8 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xv
Figura A. 30. Pozo 9 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xv
Figura A. 31. Pozo 10 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xvi
Figura A. 32. Pozo 11 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xvi
Figura A. 33. Pozo 12 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).....	xvi
Figura A. 34. Pozo 2 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xvii
Figura A. 35. Pozo 3 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xvii
Figura A. 36. Pozo 4 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xvii
Figura A. 37. Pozo 5 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xviii
Figura A. 38. Pozo 6 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xviii
Figura A. 39. Pozo 7 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xviii
Figura A. 40. Pozo 8 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xix
Figura A. 41. Pozo 9 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).	xix
Figura A. 42. Pozo 10 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).....	xix
Figura A. 43. Pozo 11 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).....	xx
Figura A. 44. Pozo 12 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).....	xx
Figura A. 45. Estudiantes de ESPOL en sus prácticas comunitarias.	xxi
Figura A. 46. Trabajo comunitario entre estudiantes de ESPOL y Miembros de JAAPMAN.....	xxii
Figura A. 47. Vehículo de JAAPMAN usado para el traslado del personal y equipo de trabajo.	xxiii
Figura A. 48. Registro de los parámetros Físico-Químicos de los pozos del acuífero Manglaralto.....	xxiv
Figura A. 49. Preparación de tubos PVC de ½ pulgada para la inserción del sensor de la sonda en cada pozo.	xxv
Figura A. 50. Registro del nivel estático y dinámico de los pozos del acuífero Manglaralto.	xxvi
Figura A. 51. Vehículo de CIPAT-ESPOL para el traslado de los estudiantes de prácticas comunitarias de ESPOL, herramientas y Miembros de JAAPMAN.	xxvii

Figura A. 52. Pozo somero ubicado cerca de los pozos del acuífero costero Manglaralto.
..... xxviii

Anexo. 1. Tablas con datos mensuales calculados

En las siguientes tablas se da a conocer el valor obtenido de la recarga y ETP a través del Software Easy Balance, además de las precipitaciones en dicho campo de estudio.

Tabla A. 1. Datos mensuales de las precipitaciones y valores obtenidos de la recarga y ETP.

Valores mensuales			
Mes	Recarga [mm]	ETP [mm]	Precipitación [mm]
01-May-18	0.00	156.47	0.00
01-Jun-18	0.00	125.68	0.00
01-Jul-18	0.00	98.55	0.45
01-Aug-18	7.32	83.03	69.40
01-Sep-18	0.00	85.38	0.20
01-Oct-18	0.00	93.68	0.00
01-Nov-18	0.00	110.74	1.70
01-Dec-18	0.00	122.50	1.50
01-Jan-19	0.00	162.46	1.50
01-Feb-19	9.86	167.48	51.60
01-Mar-19	3.15	197.55	18.40
01-Apr-19	0.00	174.65	0.20
01-May-19	0.00	168.20	0.00
01-Jun-19	0.00	134.96	0.00
01-Jul-19	0.00	101.52	0.00
01-Aug-19	7.29	84.13	138.30
01-Sep-19	0.00	79.98	0.20
01-Oct-19	0.00	93.34	0.00
01-Nov-19	0.00	110.46	1.70
01-Dec-19	0.00	122.23	1.50
01-Jan-20	0.00	162.40	2.90
01-Feb-20	3.75	174.96	22.10
01-Mar-20	0.00	193.70	6.90
01-Apr-20	0.00	169.36	4.50
01-May-20	0.00	152.45	0.00
01-Jun-20	0.00	129.30	0.00
01-Jul-20	0.00	112.63	0.90
01-Aug-20	0.00	100.95	0.50
01-Sep-20	0.00	107.51	0.20

Tabla A. 2. Datos anuales de las precipitaciones y valores obtenidos de la recarga y ETP.

Valores anuales			
Año	Recarga [mm]	ETP [mm]	Precipitación [mm]
2018	12.9	1584.89	127.3
2019	20.3	1596.95	213.4
2020	3.8	1303.27	38

Anexo. 2. Hidrogramas

A continuación, se presentan los hidrogramas de cada uno de los pozos, enfocándose en el comportamiento de los niveles piezométricos en metros sobre el nivel del mar (msnm), desde el mes mayo del 2018 hasta septiembre del 2020. Logrando así, visualizar el nivel calculado (Computed) vs el nivel medido en campo (Measured).

Anexo. 2.1. Densidad constante

Anexo. 2.1.1. Modelo de flujo



Figura A. 1. Pozo 2 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

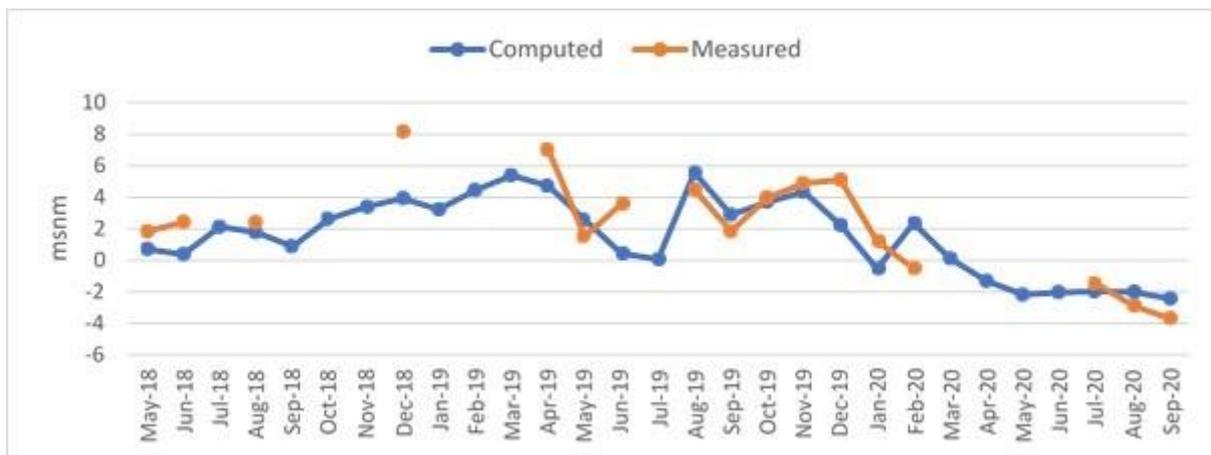


Figura A. 2. Pozo 3 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

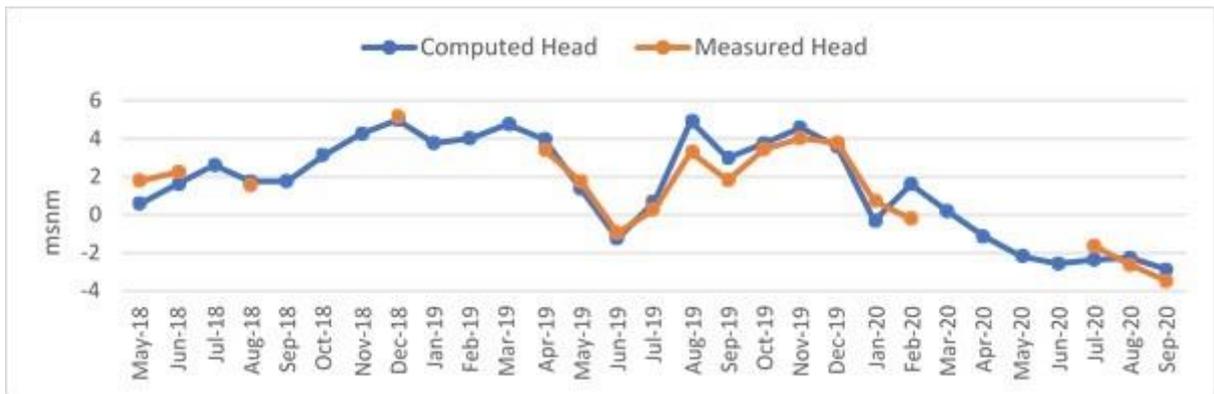


Figura A. 3. Pozo 4 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).



Figura A. 4. Pozo 6 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

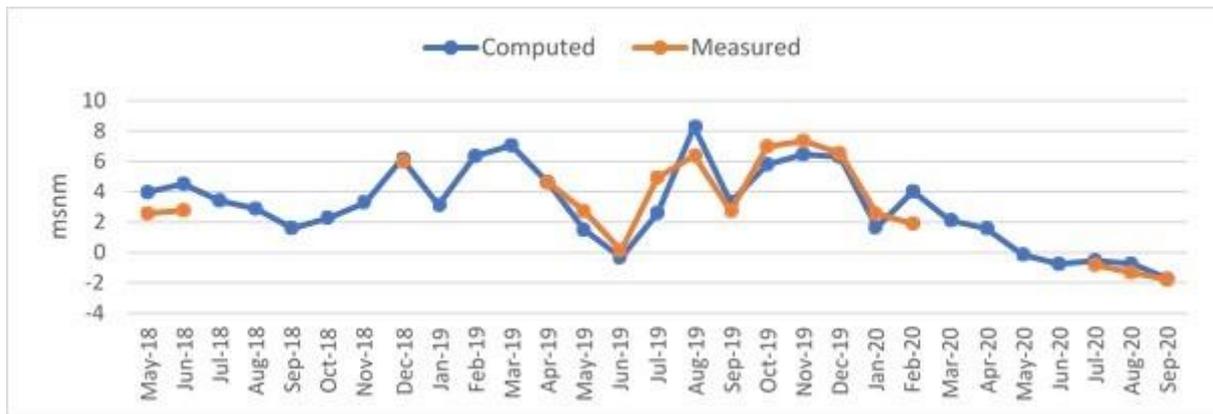


Figura A. 5. Pozo 7 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

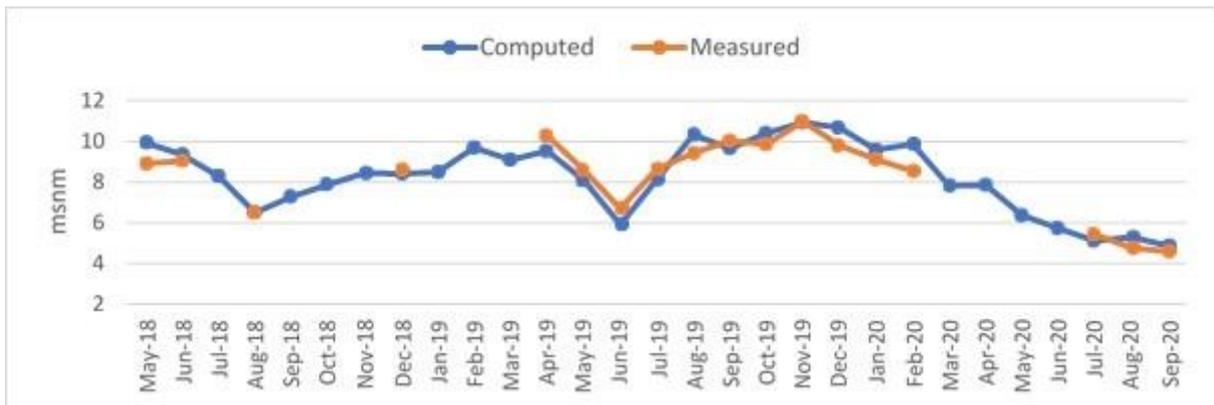


Figura A. 6. Pozo 7 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).



Figura A. 7. Pozo 8 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

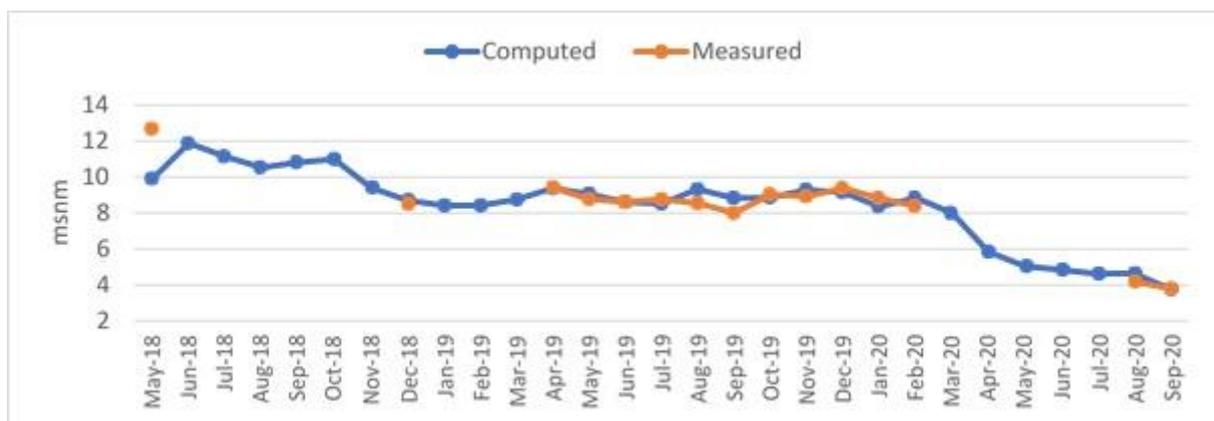


Figura A. 8. Pozo 9 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

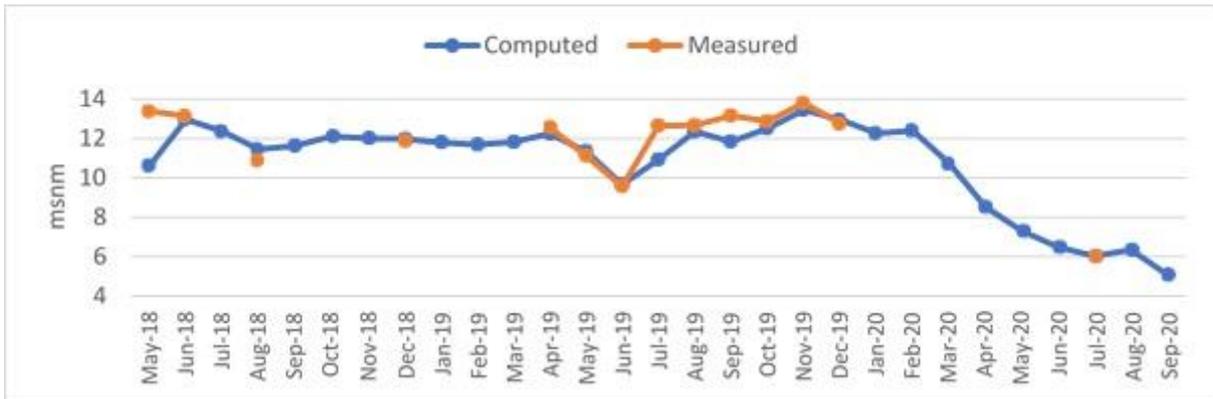


Figura A. 9. Pozo 10 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

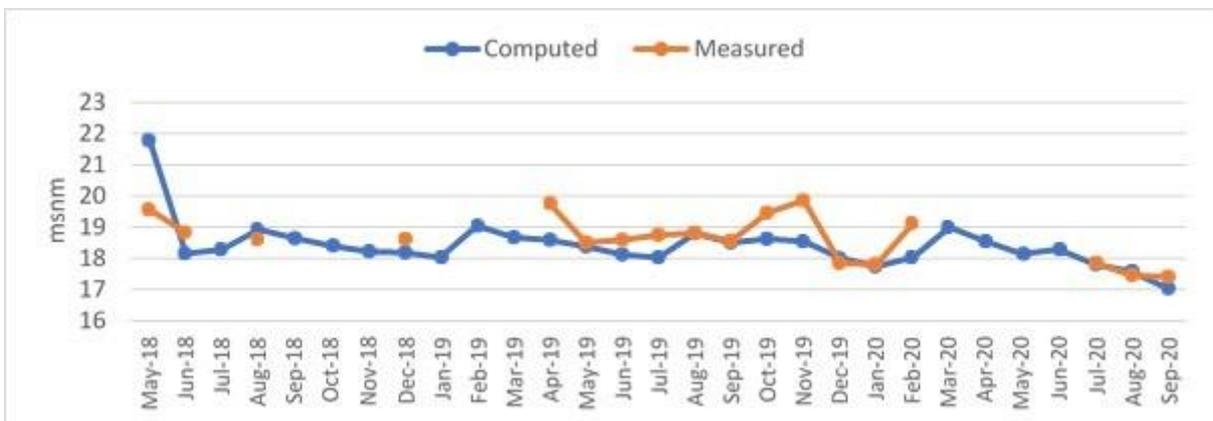


Figura A. 10. Pozo 11 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

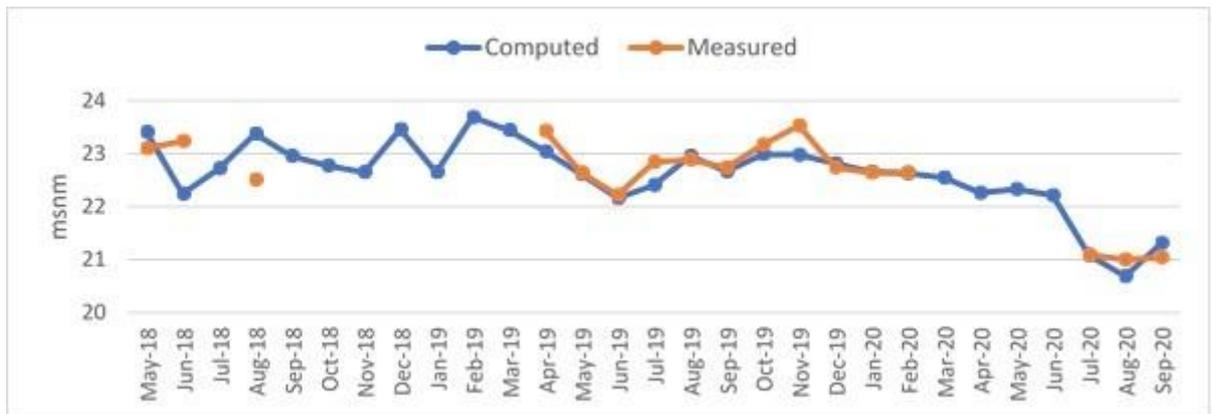


Figura A. 11. Pozo 12 hidrograma (modelo de flujo - densidad constante).

Anexo. 2.1.2. Modelo de transporte

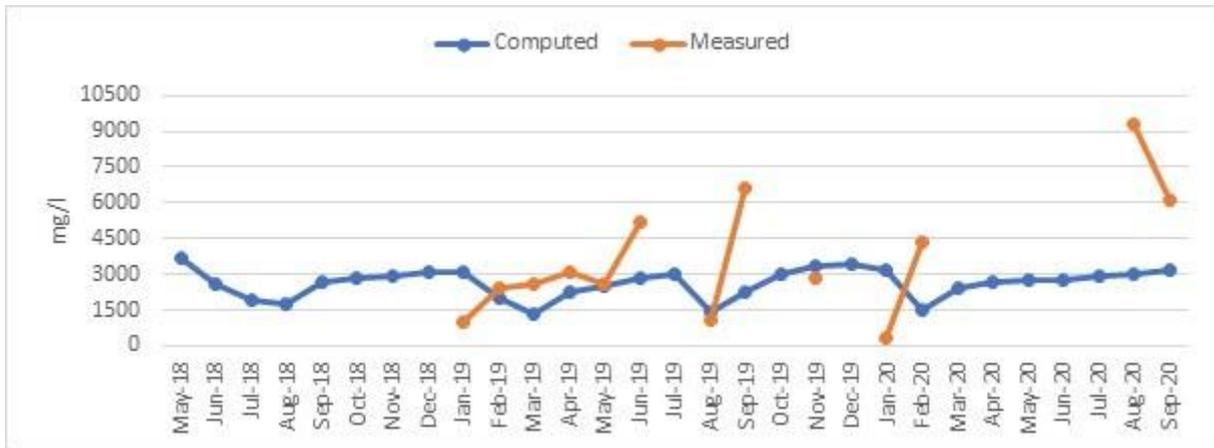


Figura A. 12. Pozo 2 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

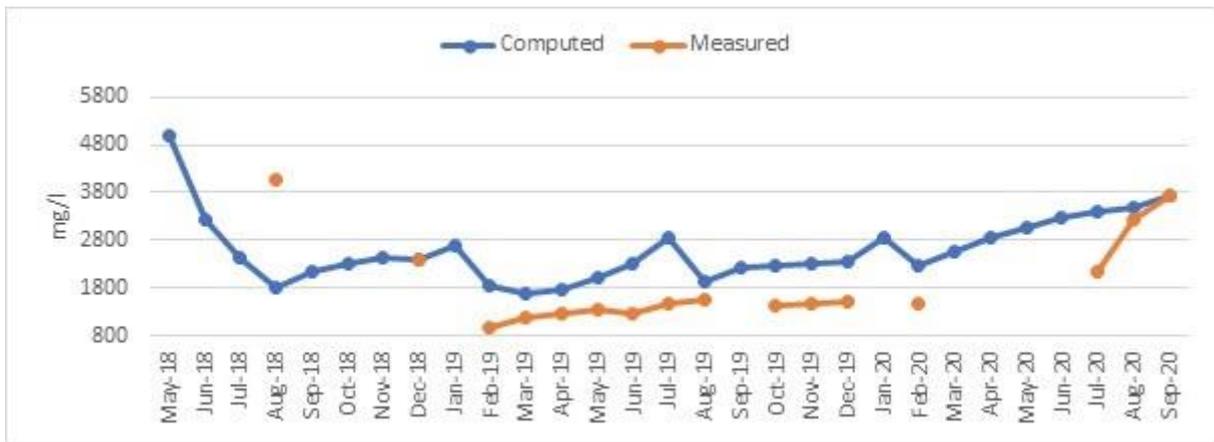


Figura A. 13. Pozo 3 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

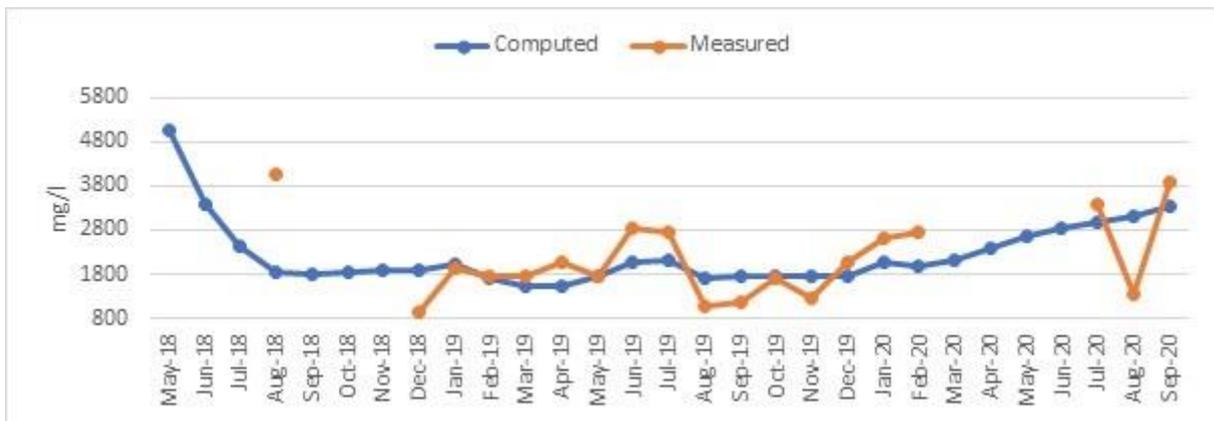


Figura A. 14. Pozo 4 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

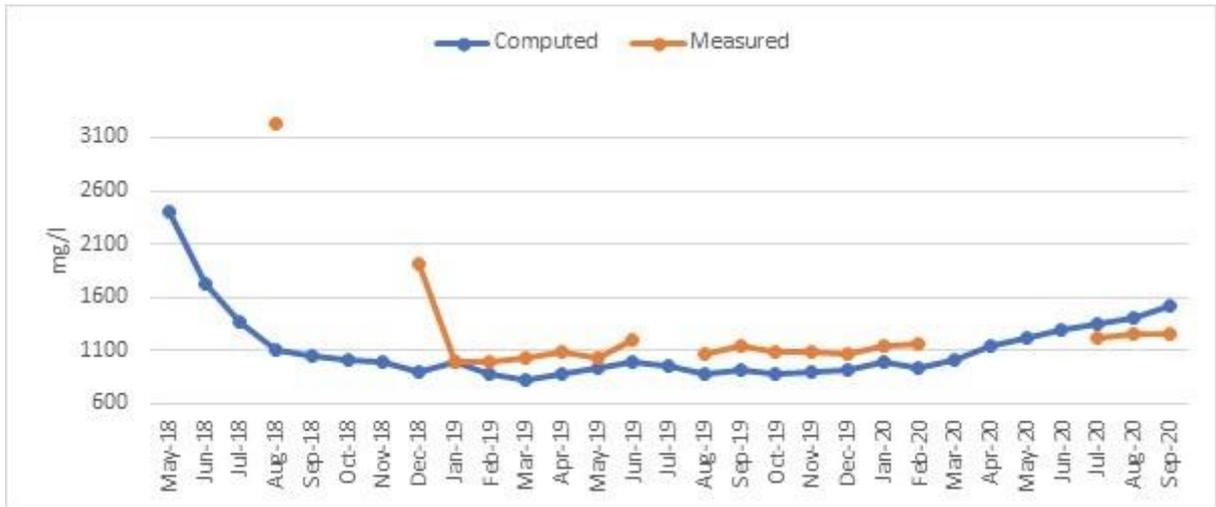


Figura A. 15. Pozo 5 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

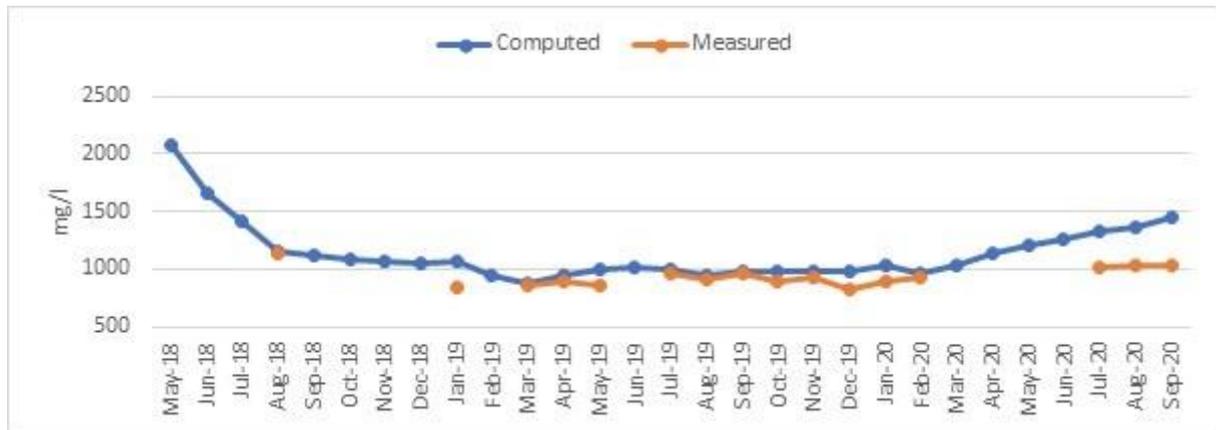


Figura A. 16. Pozo 6 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

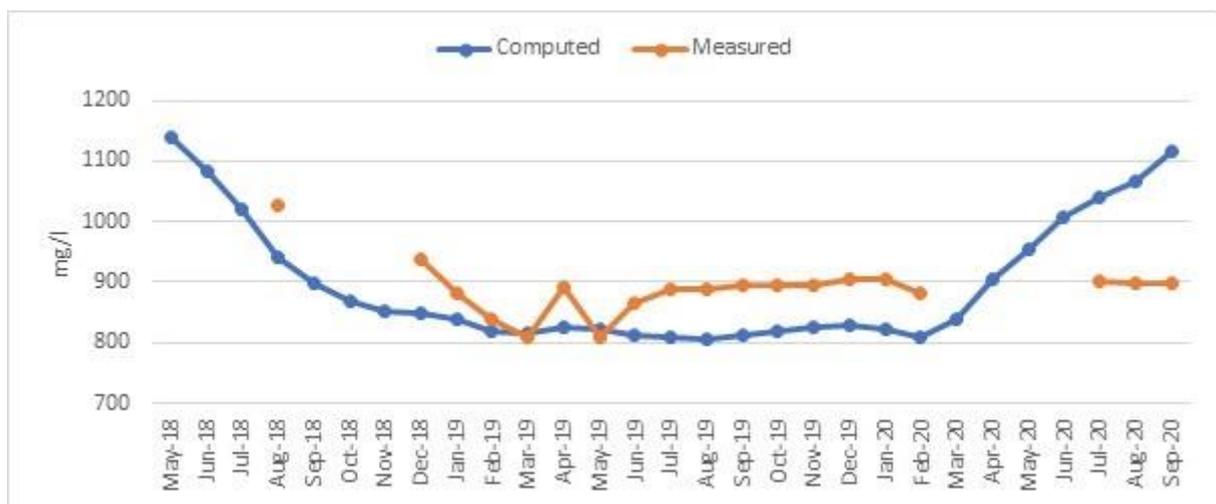


Figura A. 17. Pozo 7 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).



Figura A. 18. Pozo 8 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

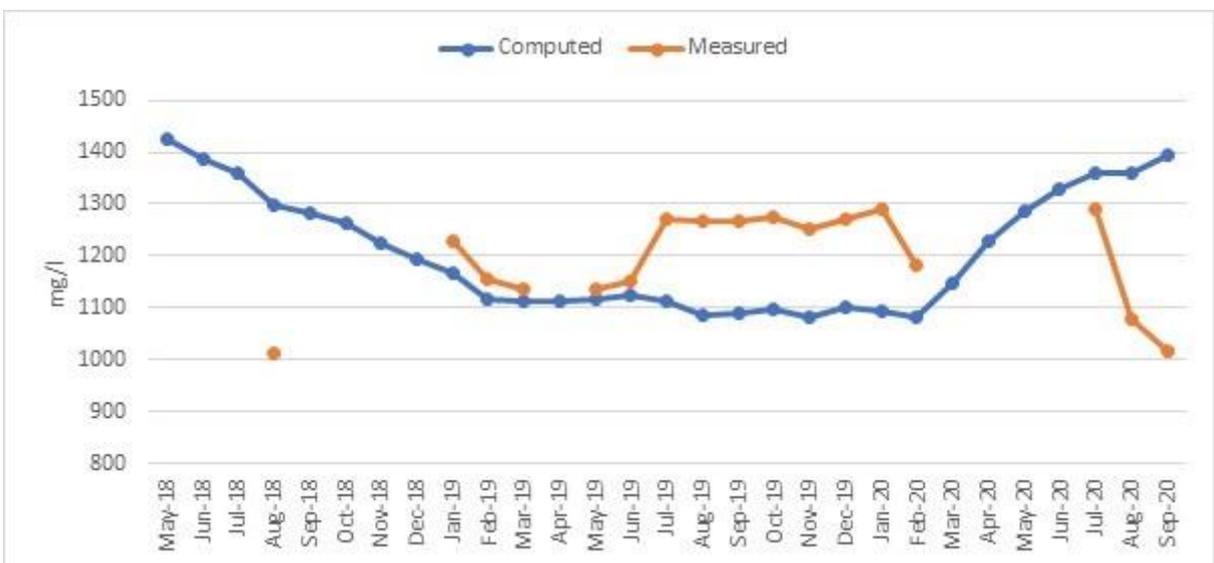


Figura A. 19. Pozo 9 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

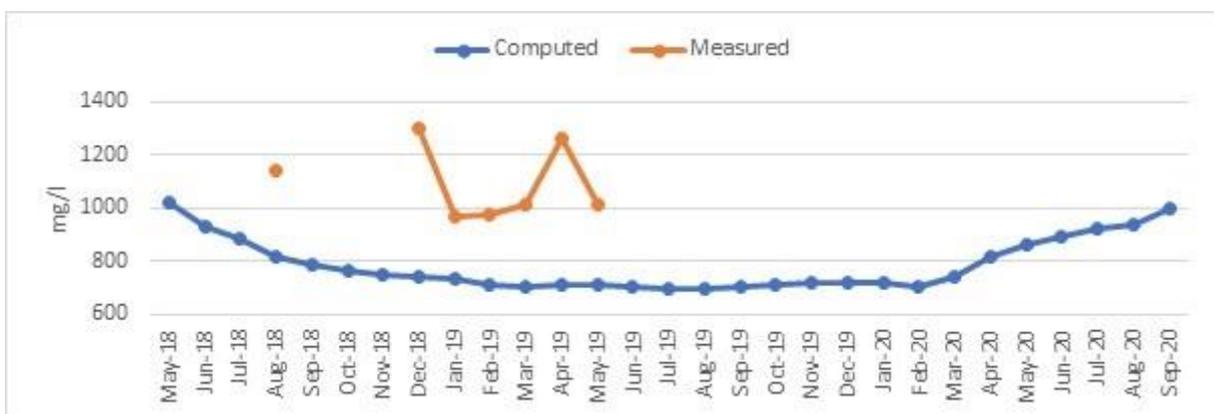


Figura A. 20. Pozo 10 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).



Figura A. 21. Pozo 11 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

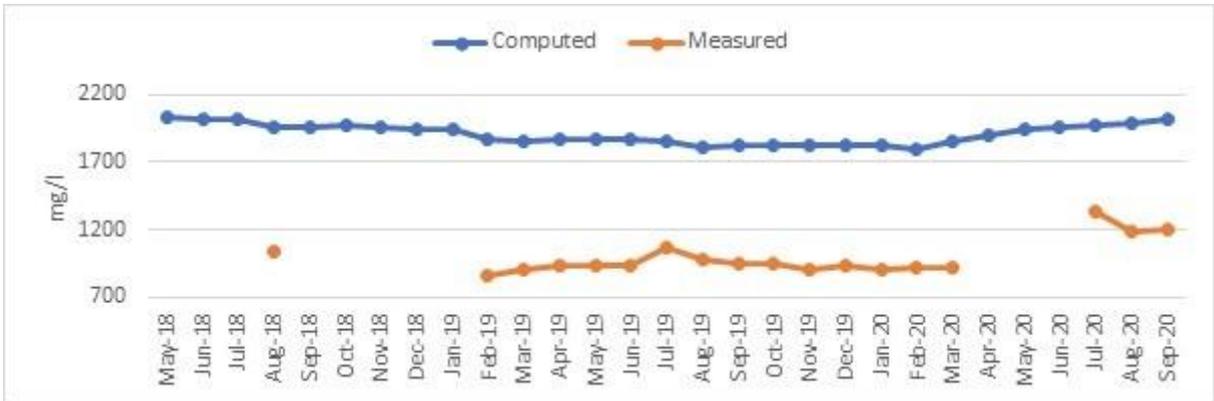


Figura A. 22. Pozo 12 hidrograma (modelo de transporte - densidad constante).

Anexo. 2.2. Densidad variable

Anexo. 2.1.3. Modelo de flujo

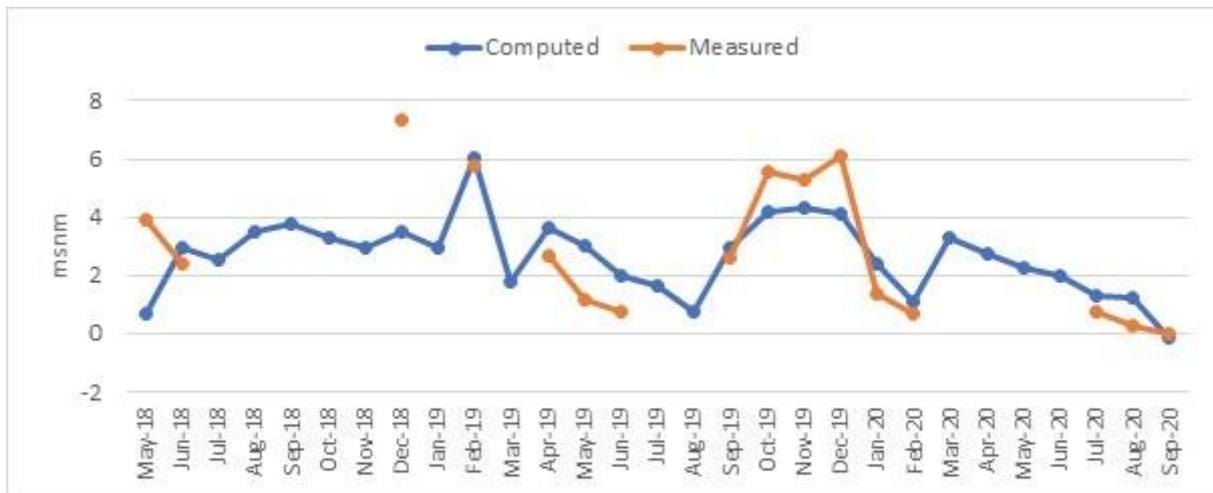


Figura A. 23. Pozo 2 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

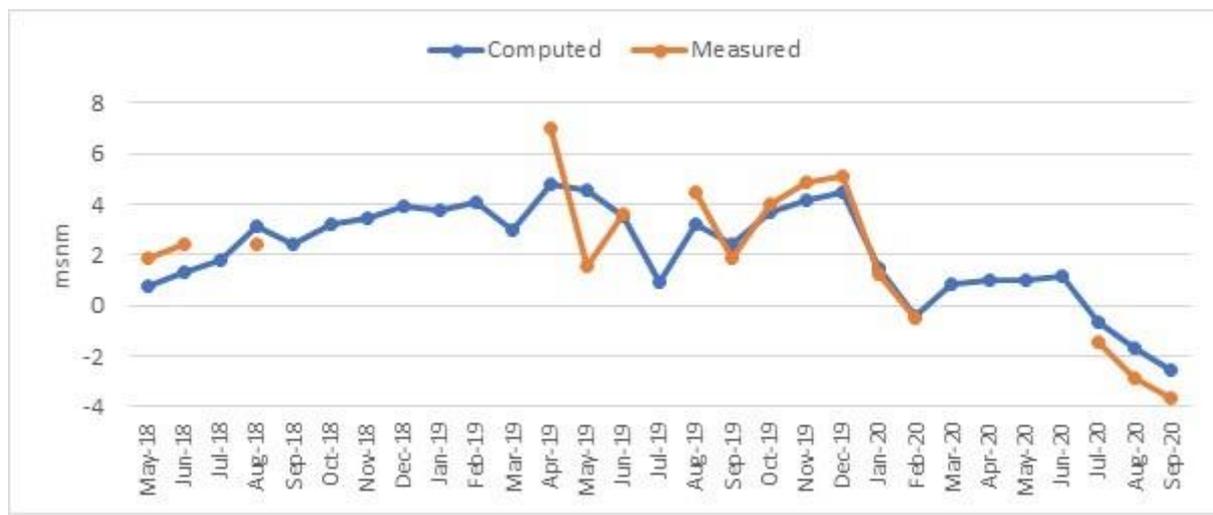


Figura A. 24. Pozo 3 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).



Figura A. 25. Pozo 4 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

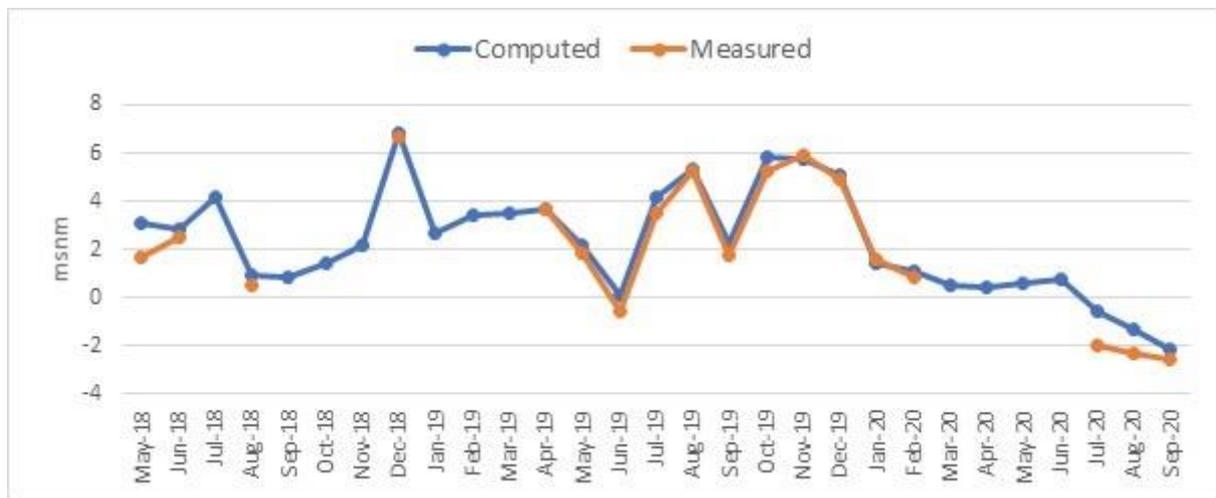


Figura A. 26. Pozo 5 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

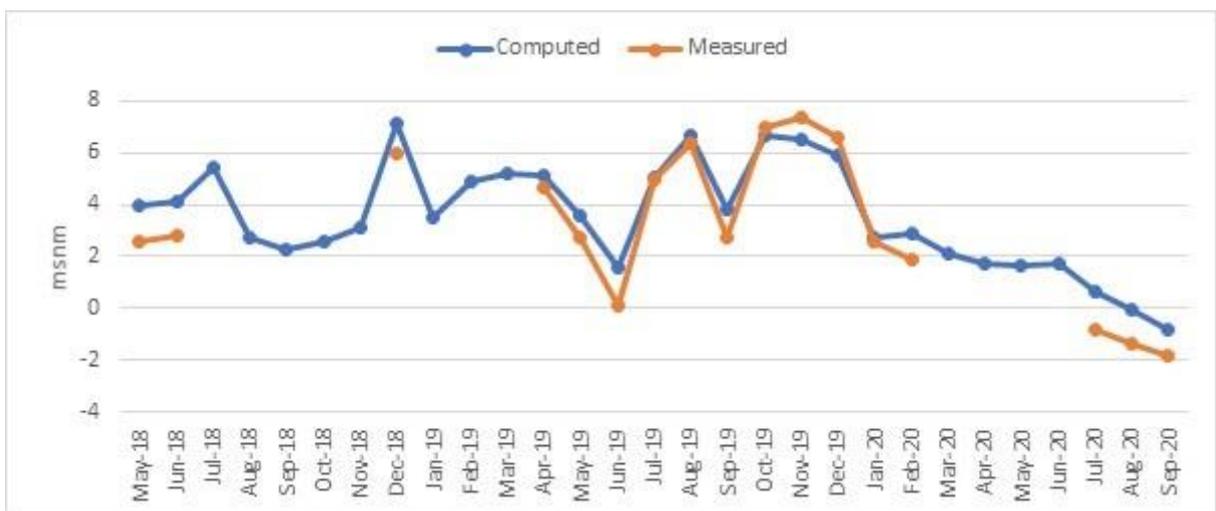


Figura A. 27. Pozo 6 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).



Figura A. 28. Pozo 7 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

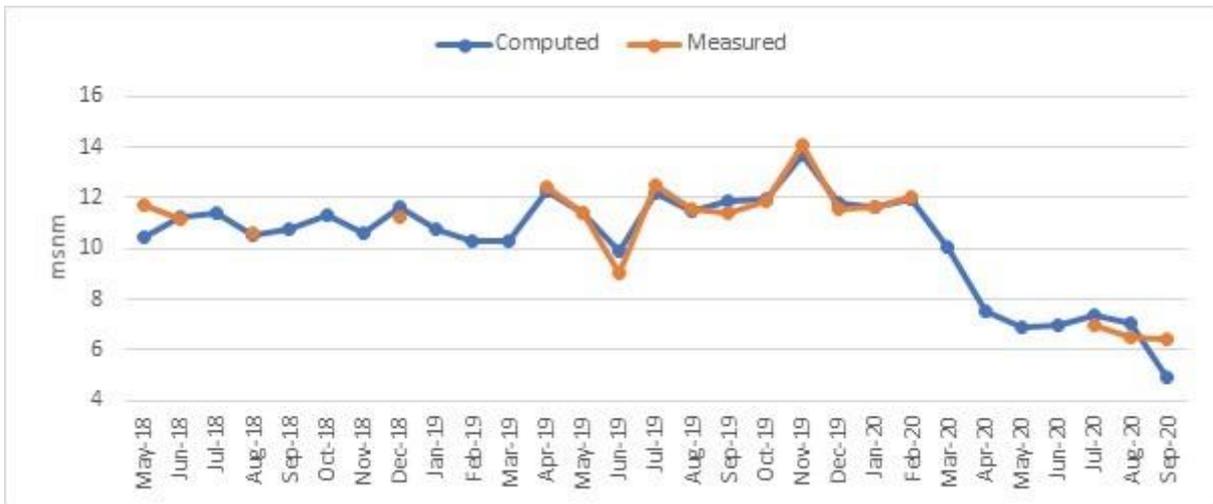


Figura A. 29. Pozo 8 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).



Figura A. 30. Pozo 9 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

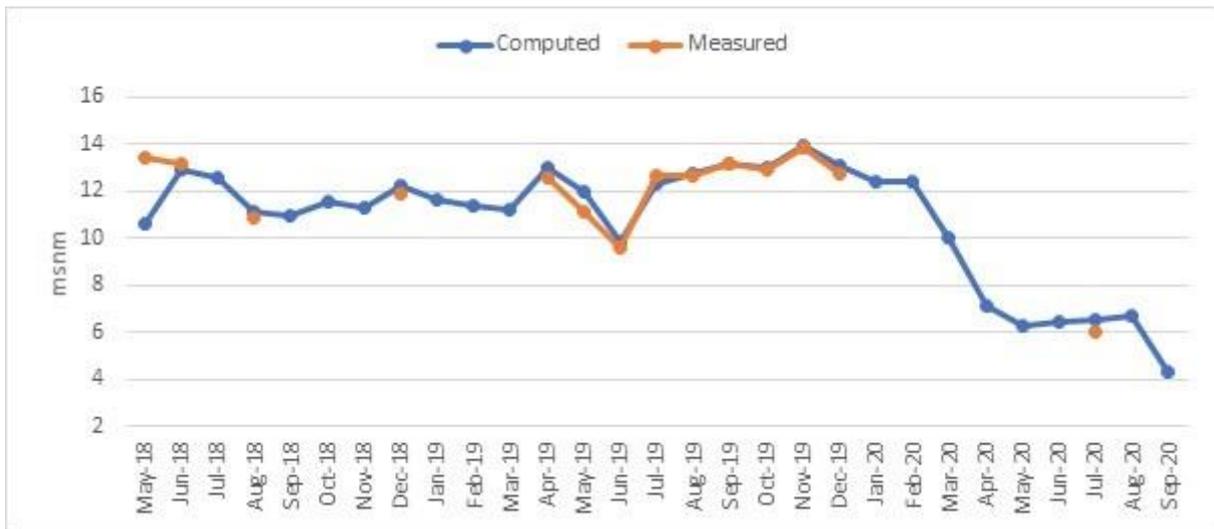


Figura A. 31. Pozo 10 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

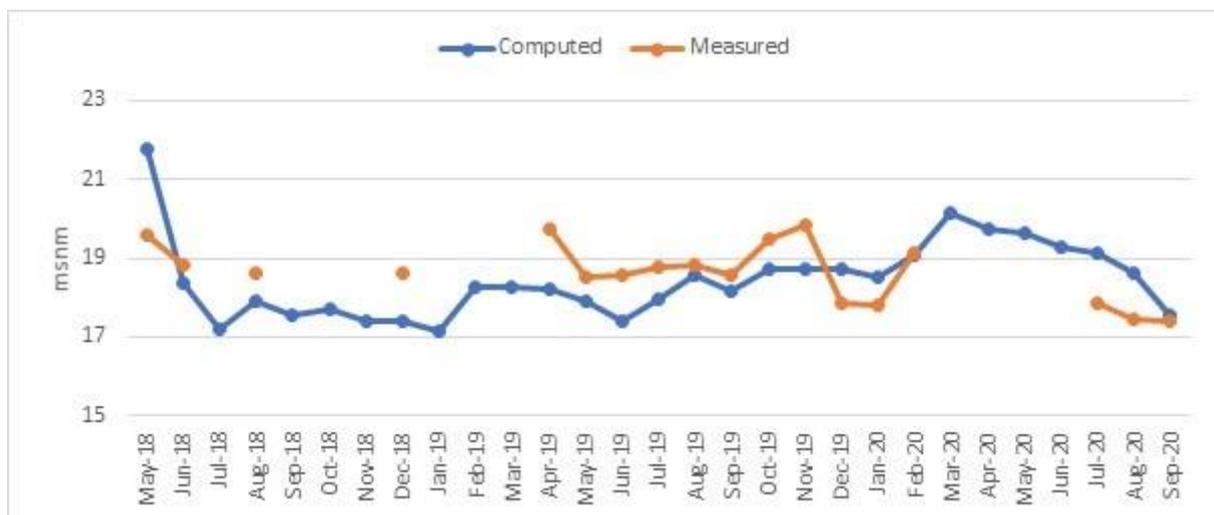


Figura A. 32. Pozo 11 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

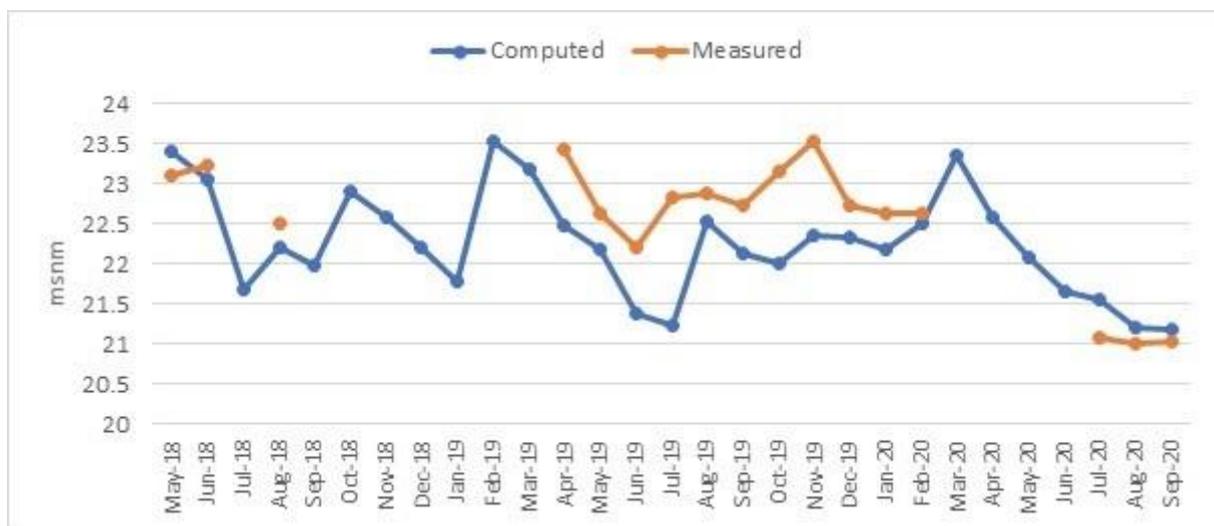


Figura A. 33. Pozo 12 hidrograma (modelo de flujo - densidad variable).

Anexo. 2.1.4. Modelo de transporte



Figura A. 34. Pozo 2 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

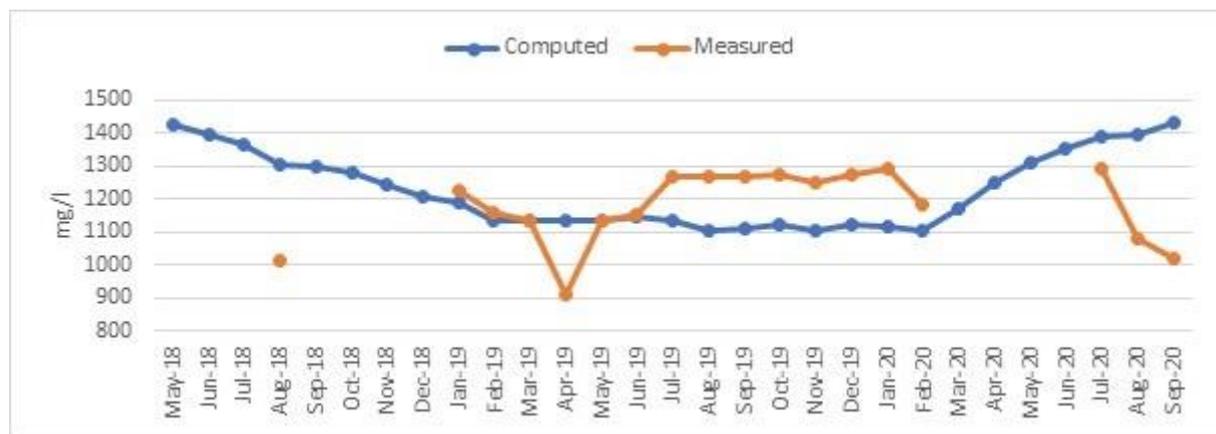


Figura A. 35. Pozo 3 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

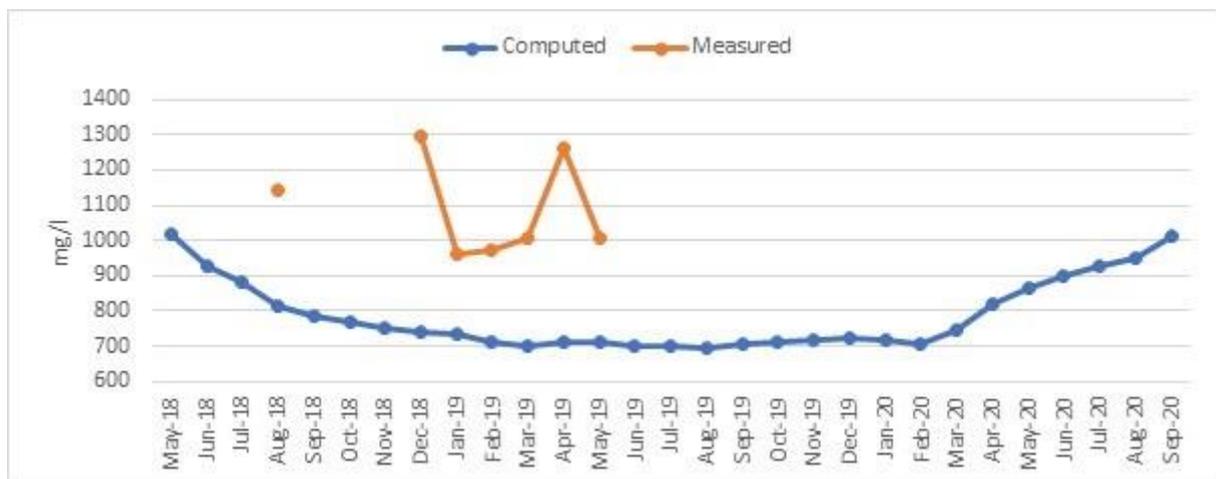


Figura A. 36. Pozo 4 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

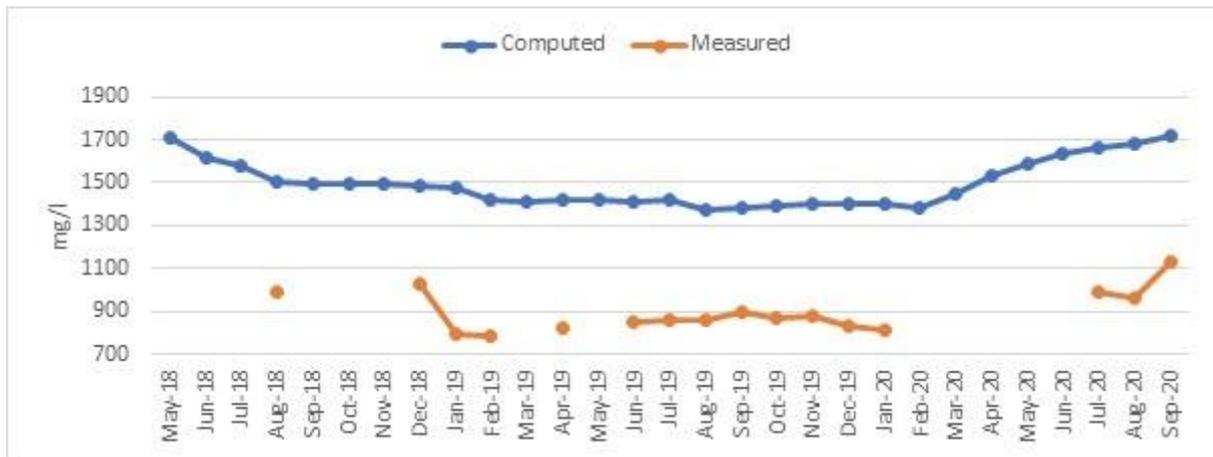


Figura A. 37. Pozo 5 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

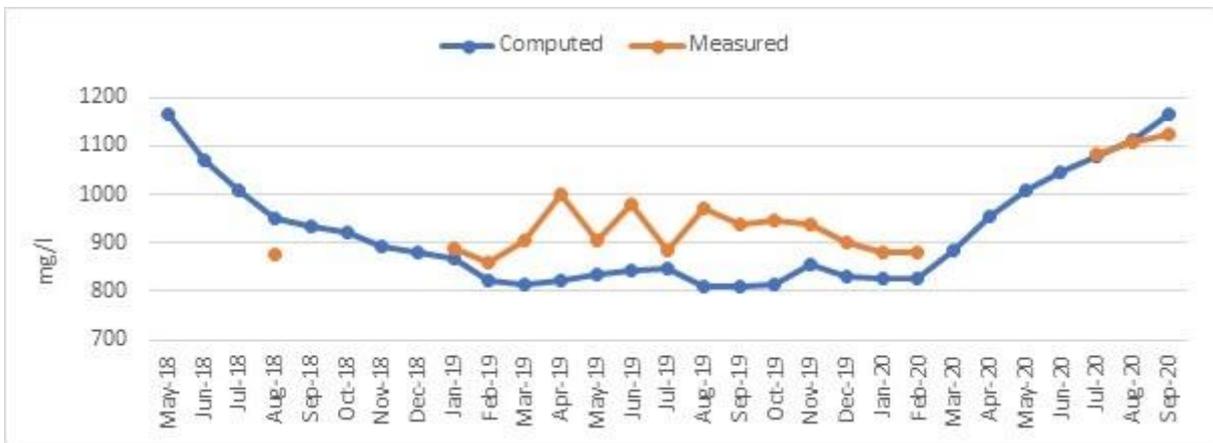


Figura A. 38. Pozo 6 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

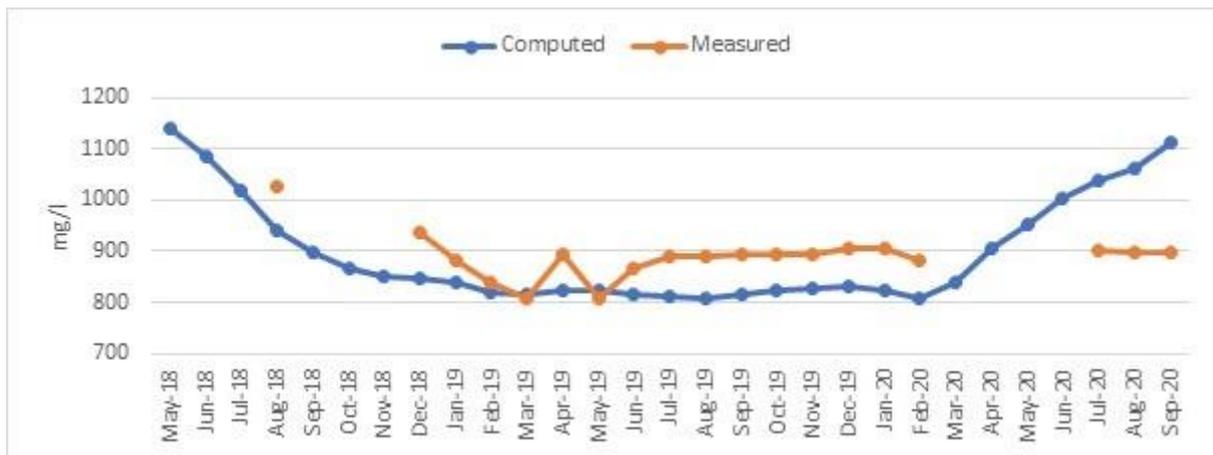


Figura A. 39. Pozo 7 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

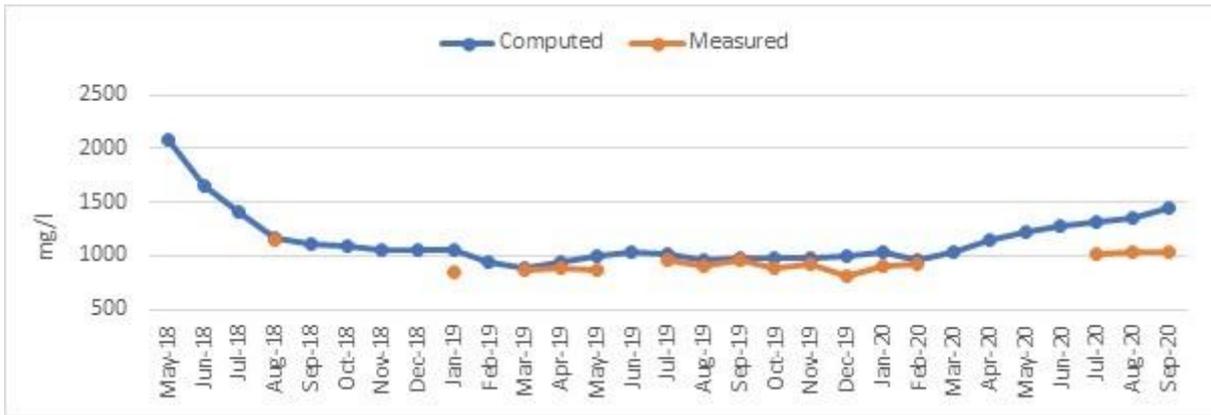


Figura A. 40. Pozo 8 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

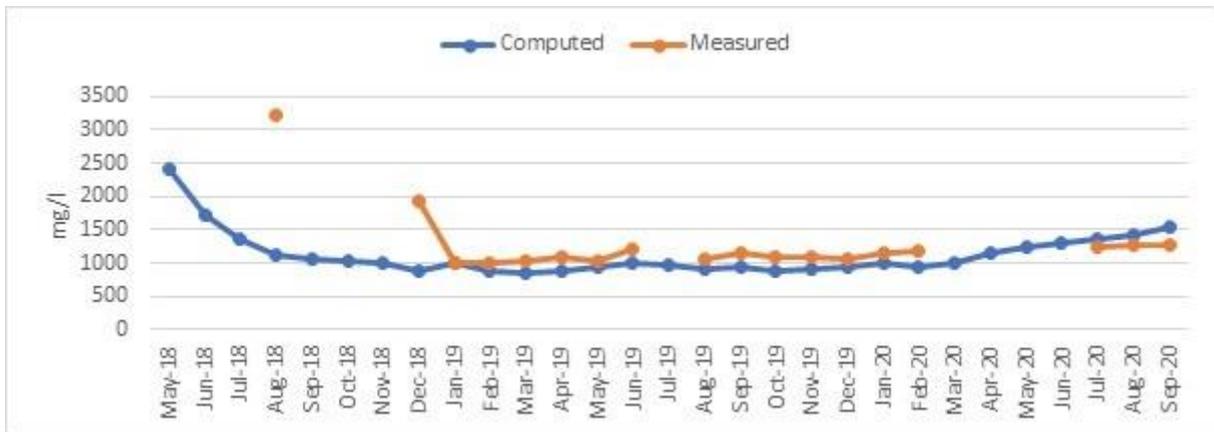


Figura A. 41. Pozo 9 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

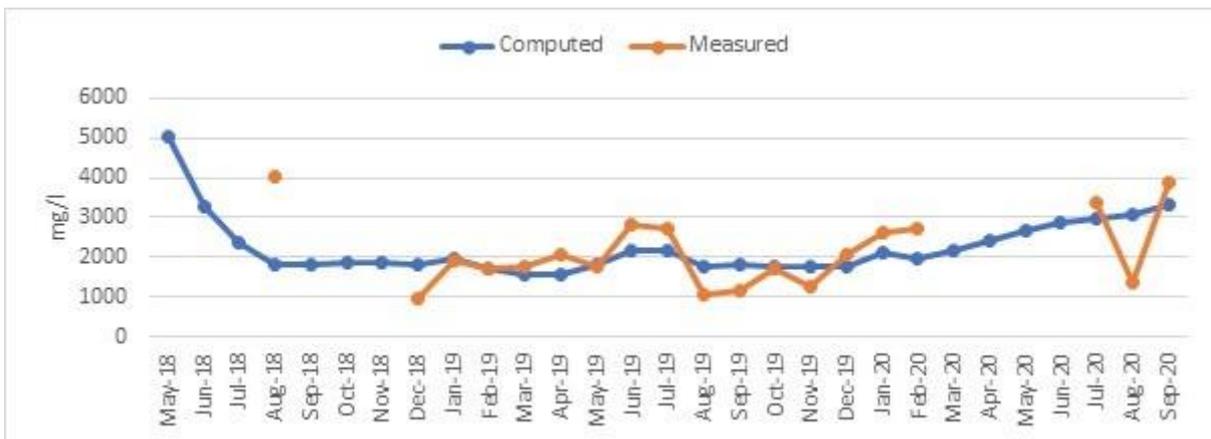


Figura A. 42. Pozo 10 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

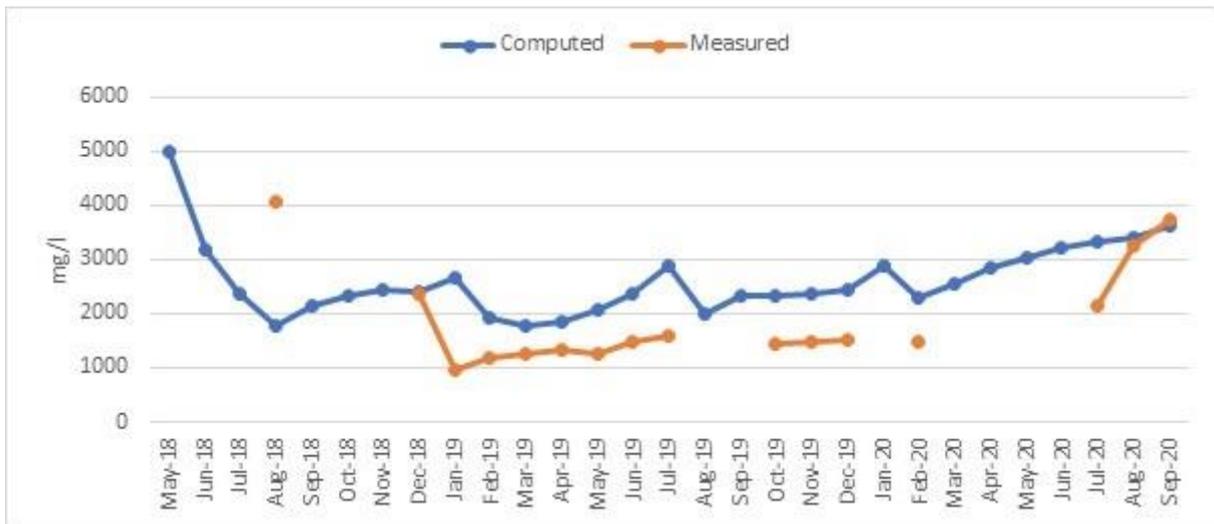


Figura A. 43. Pozo 11 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).



Figura A. 44. Pozo 12 hidrograma (modelo de transporte - densidad variable).

Anexo. 3. Trabajo en campo por CIPAT-ESPOL y JAAPMAN



Figura A. 45. Estudiantes de ESPOL en sus prácticas comunitarias.



Figura A. 46. Trabajo comunitario entre estudiantes de ESPOL y Miembros de JAAPMAN.



Figura A. 47. Vehículo de JAAPMAN usado para el traslado del personal y equipo de trabajo.



Figura A. 48. Registro de los parámetros Físico-Químicos de los pozos del acuífero Manglaralto.



Figura A. 49. Preparación de tubos PVC de ½ pulgada para la inserción del sensor de la sonda en cada pozo.



Figura A. 50. Registro del nivel estático y dinámico de los pozos del acuífero Manglaralto.



Figura A. 51. Vehículo de CIPAT-ESPOL para el traslado de los estudiantes de prácticas comunitarias de ESPOL, herramientas y Miembros de JAAPMAN.



Figura A. 52. Pozo somero ubicado cerca de los pozos del acuífero costero Manglaralto.