

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación mediante técnicas
multivariantes en el acuífero costero de Olón.

INGE-2640

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Geología

Presentado por:

Ariana Vanessa Vargas Reyes

Guayaquil-Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

En primer lugar, quiero expresar mi más profunda gratitud a mi papá, mamá, mi mami Clemen y Rita quienes han sido mi pilar fundamental en todo este proceso. Su apoyo incondicional han sido la base sobre la cual he construido este sueño.

A mis amistades Geysil, Elena, Odalis, Jorge, Erick, Nicole, Astrid, José, Elizabeth, Eudes, Adrian, Elvis y Andrei quienes con su compañía lograron convertir los momentos de estrés en instantes más llevaderos.

A mis mentores Mgtr. Joselyne, Dr. Paúl, Mgtr Peter, Mgtr Ángel, Mgtr David, Ing. Enrique quienes fueron parte de mi orientación a lo largo de la carrera.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento, porque sin su apoyo este logro no habría sido posible.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mis tutores Mgtr. Joselyne y Ing. Paúl Carrión, Ph.D, por su invaluable guía, orientación y apoyo durante este proceso. Sus enseñanzas y consejos fortalecieron mi formación personal y profesional.

Al equipo de CIPAT, por brindarme las herramientas y el respaldo necesario para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso y esfuerzo conjunto fueron fundamentales para superar cada desafío.

A los miembros de JASRAPO, por su colaboración y ayuda durante el levantamiento de información en campo. Su contribución fue fundamental para la conclusión de este proyecto.

Declaración Expresa

Yo, Ariana Vanessa Vargas Reyes, acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de Octubre del 2024.



Autor

Ariana Vanessa Vargas Reyes

Evaluadores

Joselyne Bárbara Solórzano Chauca

Profesor de Materia

Joselyne Bárbara Solórzano Chauca

Tutor de proyecto

Resumen

Las aguas subterráneas son una fuente vital especialmente en regiones áridas. En Olón, el reciente crecimiento en la demanda de agua requiere estudios hidrogeológicos para asegurar la sostenibilidad del acuífero. Este estudio tiene como objetivo generar cartografía que zonifique las áreas más vulnerables a la contaminación para el planteamiento de estrategias de sostenibilidad. Se obtuvo el índice DRASTIC y la capacidad de protección del acuífero a partir de ensayos geoelectricos y datos de pozos. Los resultados indican que el 73% del acuífero es altamente vulnerables durante la época lluviosa, debido a niveles freáticos someros, alta permeabilidad de la zona vadosa y elevada recarga que facilita la infiltración de contaminantes. En la época seca, la vulnerabilidad disminuye, pero persiste en algunas áreas. Los pozos de agua son altamente susceptibles debido a la baja capacidad de atenuación de contaminantes de las capas superficiales arenosas. El acuífero presenta una protección moderada debido al espesor delgado de la capa de sobrecarga. El análisis en un entorno SIG permitió identificar zonas críticas con mayor riesgo de contaminación. Se plantearon estrategias sostenibles como la implementación de filtros verdes, la construcción de diques como técnicas ancestrales y actividades enfocadas en la concientización sobre el consumo de agua.

Palabras Clave: vulnerabilidad intrínseca, DRASTIC, conductancia longitudinal, ensayos geoelectricos

Abstract

Groundwater is a vital source, especially in arid regions. In Olón, the recent growth in water demand requires hydrogeological studies to ensure the sustainability of the aquifer. This study aims to generate maps that zone the areas most vulnerable to contamination for the formulation of sustainability strategies. The DRASTIC index and the protection capacity of the aquifer were obtained from geoelectric tests and well data. The results indicate that 73% of the aquifer is highly vulnerable during the rainy season, due to shallow water tables, high permeability of the vadose zone and high recharge that facilitates the infiltration of contaminants. In the dry season, vulnerability decreases, but persists in some areas. Water wells are highly susceptible due to the low attenuation capacity of contaminants in the sandy surface layers. The aquifer has moderate protection due to the thin thickness of the overburden layer. The analysis in a GIS environment allowed to identify critical areas with a higher risk of contamination. Sustainable strategies were proposed, such as the implementation of green filters, the construction of dams using ancestral techniques, and activities focused on raising awareness about water consumption.

Keywords: intrinsic vulnerability, DRASTIC, longitudinal conductance, geoelectrical tests

Índice general

Resumen	1
<i>Abstract</i>	2
Abreviaturas	6
Simbología	8
Índice de figuras	9
Índice de tablas.....	10
Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema.....	5
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Antecedentes.....	7
1.6 Marco teórico.....	9
1.6.1 Principio de las aguas subterráneas	9
1.6.2 Acuíferos y su clasificación	9
1.6.3 Vulnerabilidad de los acuíferos.....	10
1.6.3.1 Método DRASTIC.	12
1.6.3.2 Parámetros Dar Zarrouk.	13
1.6.4 Métodos Geoeléctricos	15
1.6.4.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).	15
1.6.4.1 Tomografía Geoeléctrica (TGE).	16
1.6.5 Métodos Electromagnéticos	17
1.6.5.1 Sondeo Electromagnético (TDEM).....	17
1.6.6 Esquema de sostenibilidad	18

1.6.6.1	Comisión Burtland.	19
1.6.6.2	Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.	19
Capítulo 2		21
2.1	Ubicación geográfica.....	22
2.1.1	Aspecto Socioeconómico	23
2.1.2	Climatología.....	23
2.1.3	Uso y Cobertura del Suelo	24
2.1.4	Relieve.....	25
2.2	Marco tectónico	25
2.3	Marco Geomorfológico	27
2.4	Marco Geológico	27
2.4.1	Marco Geológico Regional	27
2.4.2	Marco Geológico Local.....	30
2.5	Estratigrafía	32
2.6	Hidrogeología	34
Capítulo 3		36
3.1	Metodología.....	37
3.1.1	Diseño de fases.....	37
3.1.2	Materiales	38
3.1.3	Fase I: Revisión bibliográfica	39
3.1.3.1	Fase I–a: Selección de metodología	39
3.1.3.2	Fase I–b: Recopilación base de datos.....	42
3.1.4	Fase II: Levantamiento de información en campo	49
3.1.5	Fase III: Evaluación sostenible de vulnerabilidad.....	56
3.1.5.1	Método DRASTIC.	56
3.1.5.2	Parámetros Dar Zarrouk.	57
3.1.5.3	Propuesta de Sostenibilidad	57

Capítulo 4	59
4.1 Resultados.....	60
4.1.1 Perfiles de TGE	60
4.1.2 Tasas de infiltración	63
4.1.3 Índice DRASTIC.....	64
4.1.4 Parámetros Dar Zarrouk	67
4.1.5 Planteamiento de estrategias de sostenibilidad	68
4.2 Discusión	70
Capítulo 5	74
5.1 Conclusiones.....	75
5.2 Recomendaciones	76
Referencias	78
Anexos.....	87

Abreviaturas

CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIPAT	Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra
COP	Concentration of flow; Overlying layers, Precipitation regime
DELG	Department of the Environment and Local Government
DEM	Modelo de Elevación Digital
DRASTIC	Depth of water table, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity
ECSE	Económico, Cultural, Social, Ecológico
EPIK	Epikarst, protective cover, Infiltration conditions, degree of Karstic network development
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
GALDIT	Groundwater occurrence, Aquifer hydraulic conductivity, Height of groundwater level, Distance from the shore, Impact of the existing status of seawater intrusion, Thickness of the saturated aquifer
GOD	Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth table of the groundwater
IEE	Instituto Espacial Ecuatoriano
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
JASRAPO	Junta Administradora del Sistema Regional de Agua Potable Olón
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud

POWER	Prediction of Worldwide Energy Resources
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SENAGUA	Secretaría Nacional del Agua
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
SINTACS	Water table depth, Effective infiltration, Unsaturated zone, Soil media, Aquifer media, Hydraulic conductivity, Topographic slope
TEM	Métodos electromagnéticos transitorios
TDEM	Sondeo Electromagnético
TGE	Tomografía Geoelectrica
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USGS	United States Geological Survey

Simbología

ρ	Resistividad
h	Espesor
km	Kilómetro
l	Longitud
m	Metro
m^3	Metro Cúbico
msnm	Metros Sobre el Nivel del Mar
mOhm	Mili Ohmnios
$\Omega \cdot m$	Ohmnio metro
pH	Potencial de Hidrógeno
Rx	Receptor
Tx	Transmisor

Índice de figuras

Figura 1. <i>Árbol de problemas para la vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero de Olón</i> ..	5
Figura 2. <i>Cómo ocurren las aguas subterráneas en rocas</i>	9
Figura 3. <i>Representación gráfica de la resistencia transversal y conductancia longitudinal</i>	14
Figura 4. <i>Tipos de configuraciones geoelectricas</i>	16
Figura 5. <i>Ejemplificación de la disposición de una TGE</i>	17
Figura 6. <i>Arreglo loop para un sistema TEM</i>	18
Figura 7. <i>Principal enfoque de los Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>	20
Figura 8. <i>Mapa de ubicación del acuífero Olón</i>	22
Figura 9. <i>Mapa de Isoyetas de la Provincia de Santa Elena</i>	24
Figura 10. <i>Mapa de pendientes de la comuna Olón</i>	25
Figura 11. <i>Mapa de gravedad en aire libre con fallas identificadas</i>	26
Figura 12. <i>Marco Geológico de la Costa Ecuatoriana</i>	28
Figura 13. <i>Modelo de Evolución de la Cordillera Costera Ecuatoriana</i>	30
Figura 14. <i>Mapa Geológico Zona de Estudio–Olón</i>	32
Figura 15. <i>Columna estratigráfica del suroeste del Ecuador</i>	34
Figura 16. <i>Diagrama de fases del proyecto</i>	37
Figura 17. <i>Mapa de ubicación de ensayos geoelectricos anteriores</i>	43
Figura 18. <i>Pasos para hallar la pendiente</i>	45
Figura 19. <i>Pasos en ArcMap para obtener la recarga</i>	47
Figura 20. <i>Pasos para obtener el parámetro de Recarga</i>	48
Figura 21. <i>Mapa de ubicación de las TGE</i>	49
Figura 22. <i>Arreglo de equipos para ensayos de TGE</i>	51
Figura 23. <i>Proceso de inversión en RES2DINV</i>	52
Figura 24. <i>Ensayo de tasa de infiltración</i>	53
Figura 25. <i>Formato de toma de datos para tasa de infiltración</i>	54
Figura 26. <i>Mapa de ubicación de ensayos de infiltración</i>	55
Figura 27. <i>Pasos en ArcMap para determinar el índice de vulnerabilidad DRASTIC</i>	57
Figura 28. <i>Perfil de resistividades para TGE 1</i>	60
Figura 29. <i>Perfil de resistividades para TGE 2</i>	61
Figura 30. <i>Perfil de resistividades para TGE 3</i>	62
Figura 31. <i>Perfil de resistividades para TGE 4</i>	63
Figura 32. <i>Mapas de parámetros DRASTIC</i>	65

Figura 33. Índice de vulnerabilidad DRASTIC para época lluviosa y seca 2024	67
Figura 34. Mapa de Conductancia Longitudinal	68
Figura 35. Registro de datos ensayo de infiltrometría doble anillo Inf-1	93
Figura 36. Registro de datos ensayo de infiltrometría doble anillo Inf-2	94
Figura 37. Registro de datos ensayo de infiltrometría doble anillo Inf-3	95
Figura 38. Registro de datos ensayo de infiltrometría doble anillo Inf-4	96
Figura 39. Registro de datos ensayo de infiltrometría doble anillo Inf-5	97
Figura 40. Gráfica de infiltración acumulada vs tiempo	98

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los acuíferos	10
Tabla 2. Principal enfoque de distintos índices de vulnerabilidad	11
Tabla 3. Descripción de cada parámetro DRASTIC	12
Tabla 4. Descripción de los factores ECSE	19
Tabla 5. Especificaciones de equipos utilizados	38
Tabla 6. Matriz de elección de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad	40
Tabla 7. Fuente de obtención de parámetros DRASTIC	41
Tabla 8. Clasificación de los parámetros DRASTIC	42
Tabla 9. Coordenadas de ubicación de los ensayos geoelectricos	43
Tabla 10. Nivel estático de los pozos en Olón 2024	45
Tabla 11. Precipitaciones mensuales (mm) en Olón 2024	46
Tabla 12. Rango de valores de los componentes de recarga neta	46
Tabla 13. Clasificación del coeficiente de permeabilidad según DIN 18130-1	47
Tabla 14. Ubicación geográfica de las TGE en coordenadas UTM	49
Tabla 15. Factor de penetración de los arreglos para tomografías geoelectricas	50
Tabla 16. Caracterización litológica de resistividades	52
Tabla 17. Ubicación geográfica de ensayos de infiltración en coordenadas UTM	55
Tabla 18. Clasificación de la vulnerabilidad del índice DRASTIC	56
Tabla 19. Clasificación de conductancia longitudinal	57
Tabla 20. Indicadores alineados a factores ECSE	58
Tabla 21. Resultados de permeabilidad	64

Tabla 22. <i>Estrategias de sostenibilidad para la gestión hídrica en Olón</i>	69
Tabla 23. <i>Datos Geoeléctricos disponibles del acuífero Olón</i>	87

Capítulo 1

1.1 Introducción

Las aguas subterráneas son una fuente vital de agua dulce, especialmente en sectores rurales, donde en su mayoría no existe el acceso a redes de agua potable. Alrededor de 2,500 millones de personas dependen de ellas para cubrir sus necesidades diarias y garantizar la seguridad alimentaria según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (acrónimo en inglés UNESCO, 2012). Los acuíferos son esenciales en regiones áridas, proporcionando agua durante las sequías y manteniendo el flujo en humedales, lagos y ríos (Aslam et al., 2018).

La vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación fue definida por National Research Council (1993, p. 1) como “la tendencia o probabilidad de que los contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de agua subterránea después de su introducción en algún lugar por encima del acuífero superior”.

Se distinguen dos tipos de vulnerabilidad, la intrínseca y la específica. La vulnerabilidad intrínseca describe cómo las características del sistema acuífero influyen en la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea. Mientras que, la específica se enfoca en un contaminante particular, considerando cómo se propaga en relación con los factores de vulnerabilidad intrínseca (Civita, 1994; Hentati et al., 2011).

En el Ecuador, los resultados del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2022) señalan que las fuentes de captación de agua subterráneas representan el 53.4% y las fuentes superficiales el 46.6% del suministro hídrico.

La provincia de Santa Elena tiene dependencia del trasvase Chongón – Santa Elena para el abastecimiento hídrico, excepto en algunas zonas del norte, donde pequeñas cuencas locales producen una cantidad limitada de agua proveniente del sistema montañoso Chongón Colonche (Solórzano et al., 2022). Para la parroquia de Manglaralto, el 51.23% de las viviendas se abastecen de agua subterránea proveniente de pozos de acuerdo con los resultados del INEC (2010). Sin

embargo, el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD Santa Elena, 2020a) indica que la parroquia enfrenta problemas en cuanto a la cantidad y calidad de agua, sequías, manejo de residuos sólidos y de aguas residuales, lo cual perturba en la protección de las fuentes hídricas. Para una correcta gestión sostenible del recurso hídrico se recomiendan prácticas como monitoreo y alerta temprana de las aguas subterráneas, innovación en tecnologías de ahorro de agua agrícola y educación pública en ciencia y tecnología (Carrión-Mero, Malavé-Hernández, et al., 2024).

La comunidad Olón tiene como principal fuente de abastecimiento de agua el acuífero Olón, el cual fue clasificado como poroso-libre-costero (Montalván, 2008) y es administrado por la Junta Administradora del Sistema Regional de Agua Potable Olón (JASRAPO) desde 1982.

La gestión comunitaria por parte de la JASRAPO cuenta con la asesoría técnica del Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT) perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Se han realizado estudios geofísicos, topográficos, hidrogeológicos, enfocados en la conservación y gestión sostenible del recurso hídrico, para la ubicación y construcción de pozos de agua, recomendaciones sobre la ubicación de diques y tapes, y el sistema de distribución de agua. La colaboración comunidad-universidad ha permitido impulsar la reforestación, concientizar sobre el agua y mejorar la gestión mediante apoyo técnico, valoración de recursos hídricos y capacitación para la toma de decisiones sostenibles (Carrión-Mero, Morante-Carballo, Herrera-Franco, et al., 2021).

El presente estudio busca delimitar las zonas susceptibles a contaminación del acuífero de Olón a través del índice DRASTIC (**D**epth of water, net **R**echarge, **A**quifer media, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of vadose zone media, and hydraulic **C**onductivity), en conjunto con técnicas geoeléctricas de Dar Zarrouk para las épocas lluviosas (Enero – Abril) y secas (Mayo – Diciembre) en el año 2024. El principal enfoque del estudio es generar cartografía temática que sea útil para la comunidad y la JASRAPO, permitiendo realizar el planteamiento de un esquema de sostenibilidad.

1.2 Descripción del Problema

En las regiones semiáridas de la costa ecuatoriana, las características morfológicas, hidrológicas y climáticas de la zona evidencian una gestión restringida de los recursos hídricos superficiales, lo que resalta la importancia de recurrir a fuentes alternativas, como aguas subterráneas y aguas residuales tratadas (Carrión-Mero, Jaime, et al., 2024). Además, estas zonas son fuertemente afectadas por las sequías generadas por fenómenos naturales como “La Niña” (Carrión-Mero, Morante-Carballo, Vargas-Ormaza, et al., 2021).

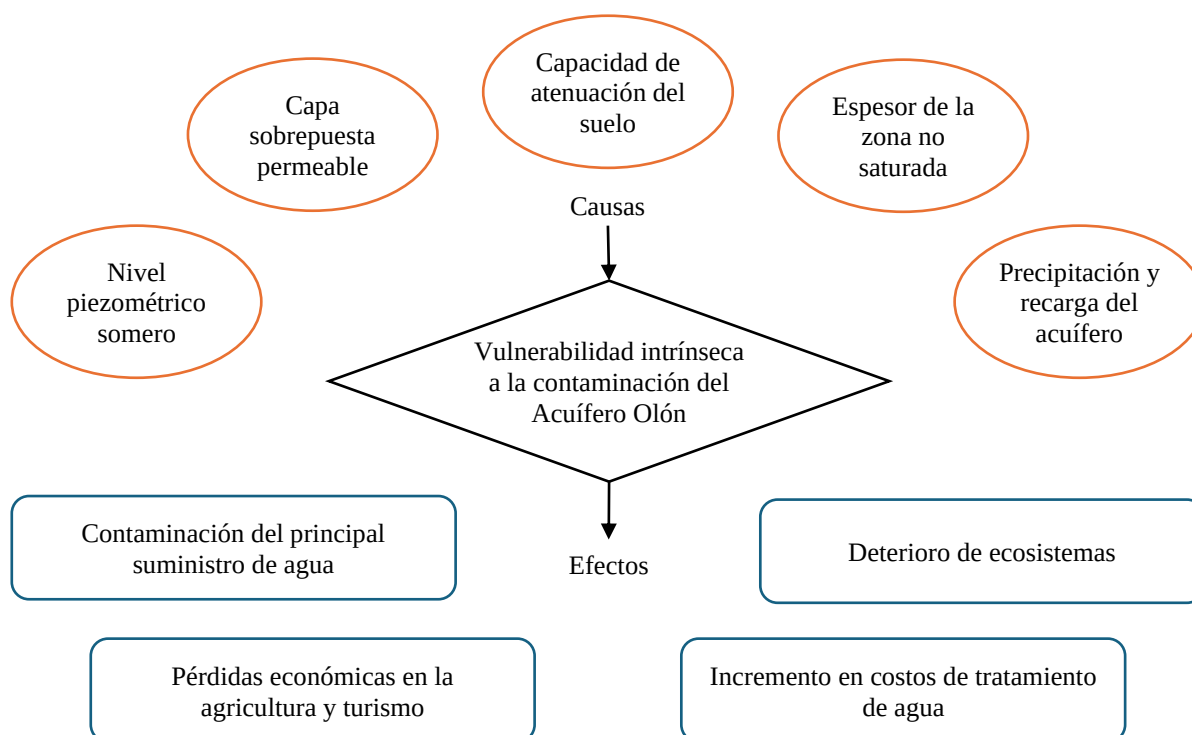
La JASRAPO (2024) se encarga de abastecer agua proveniente del acuífero a 10,480 usuarios permanentes, y 11,000 población flotante, distribuidos en cinco comunidades: Olón, Curia, San José, La Núñez y La Entrada. La gestión hídrica está conformada por diez pozos activos y cinco pozos de observación, cuenta con tres tanques reservorios y tres diques de tierra temporales, el tratamiento de agua se hace mediante la cloración y la red de distribución es por gravedad.

Entre las amenazas que afronta el acuífero se encuentra la sobreexplotación debido a una mayor demanda de agua por el incremento del turismo, la contaminación de las fuentes de agua y daño al entorno comunitario, lo cual pone en riesgo la disponibilidad y calidad del agua en el acuífero (GAD Manglaralto, 2019; Lozano & Márquez, 2024). Además, la intrusión salina en las áreas de los pozos más cercanos a la costa y el uso de pozos sépticos juegan un papel importante en los diversos procesos hidroquímicos que alteran la calidad del acuífero (Carrión-Mero, Montalván, et al., 2021).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) señala que los acuíferos poco profundos o no confinados son más susceptibles a la contaminación, por prácticas agrícolas, saneamiento local o residuos industriales. Al disminuir la contaminación de la fuente de agua, se reduce el nivel y complejidad de tratamiento requerido.

La contaminación de las aguas subterráneas reduce la disponibilidad y calidad de agua para consumo, afectando la salud humana y los ecosistemas que dependen de ella. En Sudamérica, el agua subterránea está principalmente destinada para uso agrícola y doméstico (UNESCO, 2022b). Localmente, el sector del turismo se vería afectado ante una posible contaminación del acuífero de Olón, debido a su constante desarrollo como principal ingreso económico de la comuna Olón (Televistazo, 2024). Las causas y efectos del problema en cuestión se detallan en la **Figura 1**.

Figura 1 Árbol de problemas para la vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero de Olón



1.3 Justificación del Problema

El aumento poblacional en las comunas de la parroquia de Manglaralto ha elevado la demanda de agua, por lo que se requiere llevar a cabo estudios hidrogeológicos, geofísicos y de balance hídrico para garantizar la sostenibilidad del acuífero aluvial (GAD Manglaralto, 2019). Considerando los efectos antropogénicos y el cambio climático sobre la escasez de agua en regiones semiáridas (Morante-Carballo et al., 2022).

La identificación de zonas vulnerables a la contaminación es una práctica clave para proteger estos recursos hídricos, ya que permite implementar medidas de control y regulación de

actividades potencialmente contaminantes, puesto que, al ser un acuífero libre con cercanía al mar, es más propenso a contaminación ya sea antropogénica o por intrusión salina, afectando los pozos de agua de la zona y su calidad (Morante et al., 2019).

La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos es clave para una gestión sostenible y efectiva de las aguas subterráneas. La protección adecuada, mediante cartografía de vulnerabilidad, zonas de protección y planificación del uso del suelo, es la mejor estrategia para prevenir la contaminación y posibles costos de tratamiento (Machiwal et al., 2018; UNESCO, 2022a).

El presente proyecto busca generar un mapa de vulnerabilidad a contaminación en el acuífero de Olón a través de análisis DRASTIC y técnicas geoeléctricas, de manera que identifique los puntos más susceptibles, se evalúe y plantee estrategias de sostenibilidad, alineadas a los siguientes Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015):

ODS 6: Agua limpia y saneamiento. La evaluación de vulnerabilidad por contaminación contribuye a la protección de los ecosistemas relacionados con el agua como lo es la cuenca hidrográfica de Olón, específicamente sus aguas subterráneas que son el principal suministro de agua potable en la comunidad.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. En áreas costeras, el turismo puede incrementar la demanda de agua y contribuir a la contaminación si no se gestiona de manera adecuada. Busca fortalecer los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural, también adoptar políticas para la gestión sostenible del agua y la conservación de acuíferos.

ODS 12: Producción y consumo responsables. Olón es una comunidad con un constante crecimiento económico y desarrollo turístico, por lo tanto, se debe buscar gestionar un turismo sostenible, a través del uso eficiente de los recursos naturales y la reducción considerable de los

desechos, a fin de minimizar efectos adversos en el medio ambiente, particularmente en el acuífero de Olón.

ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres. En la cuenca hidrográfica de Olón se encuentra el Bosque Protector Chongón–Colonche, el cual alberga una gran biodiversidad de flora y fauna, por ende, la focalización de zonas susceptibles a contaminación del acuífero permite gestionar de mejor manera la preservación del ecosistema que depende de fuentes de agua subterránea limpias.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero costero de Olón mediante el análisis comparativo de técnicas multivariadas para la delimitación de zonas susceptibles a la contaminación y planteamiento de estrategias de sostenibilidad.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Valorar la vulnerabilidad a la contaminación por medio del análisis de parámetros hidrológicos durante la época lluviosa y seca.
2. Determinar la capacidad de protección del acuífero mediante el análisis de datos geo-eléctricos
3. Comparar los grados de vulnerabilidad generados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el planteamiento de estrategias de sostenibilidad.

1.5 Antecedentes

El acuífero de Olón fue definido por Montalván (2008) como una unidad hidrogeológica aluvial con características de tipo libre–poroso–costero, con espesores entre 10–40 m y reservas estimadas de 1.3 millones de m³. Años después, un estudio realizado por Calderón (2010) estimó reservas de 1.8 millones de m³, y, además, evidenció la presencia de intrusión salina dentro del acuífero Olón.

La gestión de la JASRAPO fue estudiada por Gabino (2013), en donde evaluó los factores críticos para el éxito de la junta, obteniendo como fortalezas el continuo desarrollo de proyectos, los convenios con instituciones, infraestructura renovada y buen manejo de activos. No obstante, dentro de sus debilidades destaca el mal uso o desperdicio de agua, falta de concientización sobre el consumo del agua y falta de un plan estratégico.

En el talud del Santuario Blanco Estrella del Mar, se presencia materiales asociados a líticos sedimentarios saturados y con alto grado de meteorización, la zona presenta una alta inestabilidad debido a la infiltración de agua del mar, lo que erosiona y desgasta el macizo (Pineda, 2019).

El río Olón es estacional, por lo que se han construido tres tapes como recarga artificial para mantener el abastecimiento y almacenamiento durante las épocas de sequía. Esta práctica ancestral, contribuye al desarrollo económico, ya que muchos de los habitantes dependen del turismo y disponibilidad de agua (Herrera et al., 2020).

Por otro lado, Loor (2023) desarrolló un modelo de transporte para contaminantes, en donde demuestra que “el contaminante avanza según el sentido del flujo subterráneo, es decir, en dirección al mar, afectando al río y pozos de abastecimiento”.

Existen estudios de Montalván et al. (2023), los cuales indican que el acuífero de Olón, en todo su dominio, presenta un alto índice de vulnerabilidad según el índice GOD (**G**roundwater occurrence, **O**verall aquifer class, **D**epth to groundwater).

La creciente demanda de agua conlleva a la realización de más estudios para abastecer a toda la comunidad. En el estudio de Lozano & Márquez (2024) se identificaron zonas factibles para la construcción de pozos, siendo éstas en el lado inferior sur en donde se presenta un mayor espesor y extensión de la capa saturada.

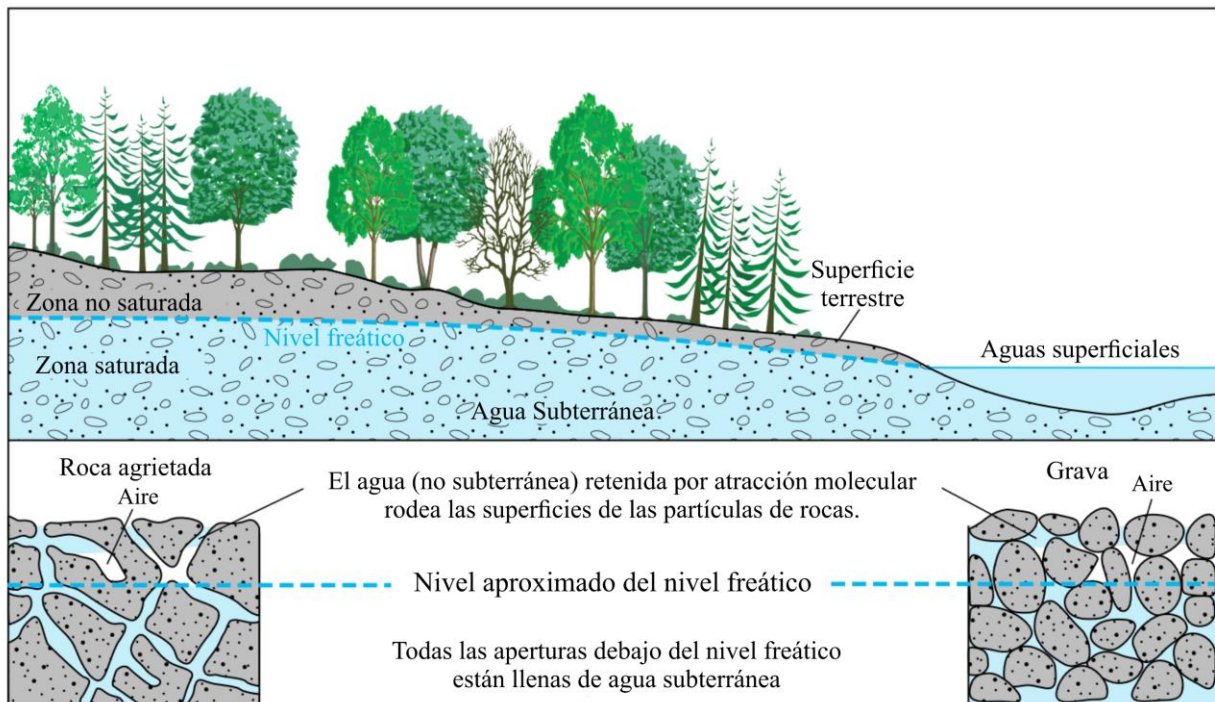
Las características del acuífero de Olón lo convierten en un cuerpo de agua susceptible a la contaminación, al ser el principal suministro de agua, es preferible adoptar medidas de prevención que garanticen la seguridad del agua.

1.6 Marco teórico

1.6.1 Principio de las aguas subterráneas

El agua subterránea es aquella que se encuentra bajo la superficie terrestre y se divide en dos zonas: la no saturada, que contiene aire y agua, y la saturada, que es la única fuente disponible para pozos y manantiales (Heath, 1983) como se observa en la **Figura 2**.

Figura 2 *Cómo ocurren las aguas subterráneas en rocas*



Nota. Modificado de USGS (2019).

1.6.2 Acuíferos y su clasificación

Acuífero es la unidad geológica en donde se almacena el agua subterránea para producir cantidades significativas de agua para los pozos y manantiales. Los acuíferos se pueden clasificar de acuerdo con diferentes propiedades tal como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1 *Clasificación de los acuíferos*

Criterio de clasificación	Nombre	Descripción
Según el grado de confinamiento	Acuífero Libre o No Confinado	Acuífero cercano a la superficie con capas continuas de materiales de alta permeabilidad. La recarga del acuífero puede producirse por filtración descendente a través de la zona no saturada o por flujo lateral. Está cubierto por una capa impermeable (llamada capa confinante o acuitardo). El agua está bajo presión, y si se perfora un pozo en un acuífero confinado, el agua puede elevarse por encima del techo del acuífero debido a la presión
	Acuífero Confinado	Hay una mezcla de capas permeables e impermeables. En este tipo, una parte del agua puede moverse de manera más lenta a través de las capas confinantes, lo que permite alguna comunicación con otras capas acuíferas.
	Acuífero Semiconfinado	Formado por materiales granulares como arena o grava, que permiten el paso de agua a través de los poros entre los granos. Este tipo de acuíferos son muy comunes y tienen buena capacidad de almacenamiento y transmisión de agua.
Según la permeabilidad del material	Acuífero Poroso	El agua se mueve a través de fisuras o fracturas en rocas duras (como calizas, areniscas o granitos). La cantidad de agua que almacena depende de la cantidad y tamaño de las fracturas.
	Acuífero Fisurado	Se encuentra en formaciones de roca caliza disuelta, que forman cavidades subterráneas y conductos grandes, lo que permite que el agua fluya rápidamente. Son comunes en regiones con terrenos kársticos.
	Acuífero Kárstico	Formado por depósitos recientes de ríos (aluviones), como arenas y gravas. Son comunes en valles fluviales y tienen alta capacidad de almacenamiento.
Según el tipo de formación geológica	Acuífero Aluvial	Se encuentra en rocas sedimentarias, como areniscas o calizas, y suele tener buena capacidad de almacenamiento.
	Sedimentario	Asociado con rocas volcánicas, donde el agua se acumula en las fisuras o en la porosidad creada por los fragmentos volcánicos.
	Volcánico	

Nota. Modificado de Fetter (2014); Hiscock (2005); Todd & Mays (2004).

1.6.3 Vulnerabilidad de los acuíferos

La vulnerabilidad se refiere a las características geológicas e hidrogeológicas que influyen en qué tan fácilmente las aguas subterráneas pueden ser contaminadas. Esta vulnerabilidad depende de: (i) el tiempo de viaje de los contaminantes en llegar a las aguas subterráneas, (ii) la

cantidad de contaminantes que pueden alcanzarlas, y (iii) la capacidad de los materiales geológicos para reducir la contaminación. Estos procesos están determinados por el tipo de suelo que cubre las aguas subterráneas, el tipo de recarga (puntual o dispersa) y el grosor de la zona no saturada (DELG et al., 1999).

La vulnerabilidad de los acuíferos se ve afectada por factores antropogénicos (tipo de uso de tierra, sistemas sépticos, vertederos, derrames de productos químicos, etc), factores naturales (lluvia, recarga) o características intrínsecas del sistema acuífero (profundidad y flujo del agua subterránea y capacidad de atenuación del sistema acuífero) (Fetter, 2014; Pavlis et al., 2010).

Existen métodos utilizados internacionalmente que evalúan la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, tales como GOD (Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth table of the groundwater), SINTACS (S: Water table depth; I: Effective infiltration; N: Unsaturated zone; T: Soil media; A: Aquifer media; C: Hydraulic conductivity; and S: Topographic slope), GALDIT (G: Groundwater occurrence; A: Aquifer hydraulic conductivity; L: Height of groundwater level; D: Distance from the shore; I: Impact of the existing status of seawater intrusion; T: Thickness of the saturated aquifer), DRASTIC (D: Depth to water; R: Net recharge; A: Aquifer media; S: Soil media; T: Topography; I: Impact of vadose zone; and C: Hydraulic conductivity), COP (C: Concentration of flow; O: Overlying layers; P: Precipitation regime), EPIK (E: Epikarst; P: Protective Cover; I: Infiltration Conditions; and K the Degree of Karstic Network Development) (Aslam et al., 2018). Cada método tiene un enfoque y aplicabilidad diferente (ver **Tabla 2**).

Tabla 2 *Principal enfoque de distintos índices de vulnerabilidad*

Índice	Enfoque
GOD	Este método se utiliza para la evaluación preliminar del área en una situación de escasez de datos, ya que requiere menos datos y proporciona una evaluación rápida de la vulnerabilidad del acuífero.
SINTACS	Desarrollado para mapeos de vulnerabilidad de sistemas acuíferos en condiciones mediterráneas.
GALDIT	Mapea la vulnerabilidad del sistema acuífero costero, enfocándose en la intrusión de agua de mar.

DRASTIC	El índice agrega las características hidrogeológicas intrínsecas del sitio para evaluar el potencial probable de contaminación de un acuífero poroso.
COP	Este índice es flexible para abordar la vulnerabilidad en los acuíferos kársticos, toma en cuenta las condiciones heterogéneas para el transporte de contaminantes al acuífero bajo diversas condiciones de precipitación.
EPIK	Mapa la vulnerabilidad asociada con los acuíferos kársticos (carbonatados).

Nota. Modificado de Goyal et al. (2021).

1.6.3.1 Método DRASTIC.

Esta metodología fue desarrollada por Aller et al. (1987) para evaluar el potencial de contaminación de cualquier entorno hidrogeológico, incorporando factores como profundidad del agua, recarga neta, medio del acuífero, medio del suelo, topografía, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica del acuífero, descritos en **Tabla 3**. Estos factores se clasifican con ponderaciones, y luego se combinan para calcular y categorizar el índice de vulnerabilidad.

Cada factor se compone de clasificaciones con rangos que varían de 1–10 con posibles modificaciones de acuerdo con las condiciones del acuífero, valores más altos describen un mayor potencial de contaminación. Además, en el índice DRASTIC, se asigna un peso (1 a 5) a cada parámetro para poder calcular el índice de vulnerabilidad con la **ecuación (1.1)**.

$$\text{Índice DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1.1)$$

Los términos “r” y “w” denotan la calificación y el peso de cada factor, respectivamente.

Tabla 3 Descripción de cada parámetro DRASTIC

Índice	Factor	Descripción	Peso relativo
D	Depth to water	Representa la profundidad desde la superficie del suelo hasta el nivel freático, en acuíferos no confinado corresponde a la medida desde la superficie hasta el nivel freático. Para acuíferos confinado, es la distancia hasta la parte superior del acuífero. Los niveles freáticos más profundos implican menores posibilidades de que se produzca contaminación.	5
R	Net recharge	Representa la cantidad de agua que penetra la superficie del suelo y llega al nivel freático, el agua de recarga representa el vehículo de transporte de contaminantes. A mayor recarga, mayor potencial de contaminación.	4

A	Aquifer media	Se refiere a los acuíferos de materiales consolidados o no consolidados. Cuanto mayor sea el tamaño de grano, fracturas o aberturas en el acuífero, mayor será la probabilidad de transporte.	3
S	Soil media	Es la zona superficial con alta actividad biológica. La textura tiene un impacto significativo en la cantidad de recarga que puede infiltrarse en el suelo. Materiales finos como limos y arcillas disminuyen la permeabilidad.	2
T	Topography	Se refiere a la pendiente de la superficie del terreno. Cuando las pendientes son pronunciadas, la capacidad de escorrentía es alta y el potencial de contaminación de las aguas subterráneas es menor.	1
I	Impact of vadose zone	Se refiere a las propiedades del material de la zona saturada, que controla los procesos de atenuación de contaminantes. Si el acuífero es libre corresponde a la propia litología del acuífero.	5
C	Hydraulic conductivity	Indica la capacidad del acuífero para transmitir agua, por lo tanto, determina la tasa de flujo de material contaminante dentro del sistema de aguas subterráneas. Los valores de conductividad hidráulica se calculan a partir de pruebas de bombeo. Si no hay información disponible se estiman a partir de valores teóricos.	3

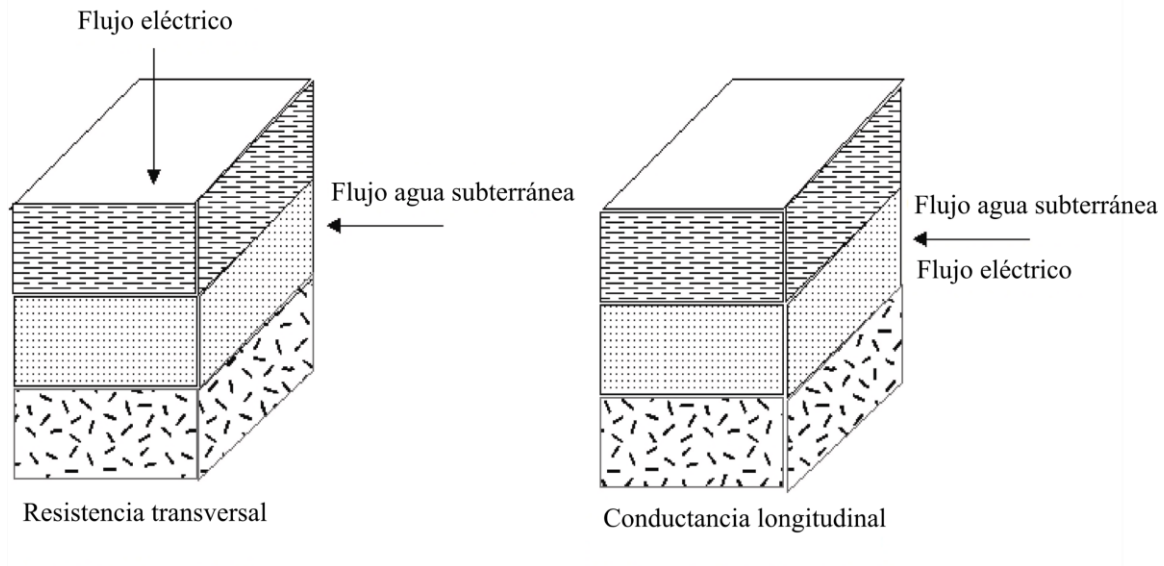
Nota. Modificado de Aller et al. (1987); Zghibi et al. (2016).

1.6.3.2 Parámetros Dar Zarrouk.

Los parámetros Dar Zarrouk están conformados por la conductancia longitudinal (S_L) y resistencia transversal (T_R) (ver **Figura 3**). Fueron desarrollados por Maillet (1947) y se calcula a partir de la resistividad y espesor de las capas geológicas.

La capacidad protectora del acuífero está determinada por la conductancia longitudinal y la potencialidad del acuífero por la resistencia transversal (Aladeboyeje et al., 2024). La resistencia transversal también se utiliza para definir áreas objetivo de buen potencial de aguas subterráneas (Cassiani & Medina, 1997; Simon et al., 2022).

Figura 3 Representación gráfica de la resistencia transversal y conductancia longitudinal



Nota. Modificado de Kelly & Reiter (1984); Mohammed et al. (2023).

La conductancia longitudinal está dada por la **ecuación (1.2)**. La resistencia transversal está dada por la **ecuación (1.3)**.

$$S_L = \sum_{n=1}^i \frac{h_i}{\rho_i} \quad (1.2)$$

$$T_R = \sum_{n=1}^i h_i \cdot \rho_i \quad (1.3)$$

Donde, h = espesor de la i -ésima geocapa de sobrecarga, ρ = resistividad de la i -ésima geocapa de sobrecarga, y n = número de geocapas de sobrecarga.

La capacidad de protección de un acuífero es la habilidad de las capas de roca sobre el acuífero para frenar y filtrar contaminantes. Materiales impermeables como la arcilla tienen alta conductancia longitudinal (debido a sus bajos valores de resistividad), lo que indica una buena capacidad de protección, mientras que, los materiales permeables como la arena tienen baja conductancia (debido a su alta resistividad), lo que refleja una débil capacidad de protección (Oboshenure & Airen, 2021).

Los parámetros Dar Zarrouk derivados de sondeos geoelectricos de superficie han demostrado ser importantes para comprender la distribución espacial de los parámetros hidráulicos del acuífero (Ankidawa et al., 2018).

1.6.4 Métodos Geoelectricos

Los métodos geoelectricos se aplican para mapear la estructura de resistividad del subsuelo. La resistividad de las rocas es de especial interés para fines hidrogeológicos: permite, por ejemplo, discriminar entre agua dulce y salada, entre acuíferos arenosos de roca blanda y material arcilloso, entre acuíferos porosos/fracturados de roca dura, y lutitas y margas de baja permeabilidad, y entre roca fracturada portadora de agua y su roca madre sólida (Kirsch, 2009).

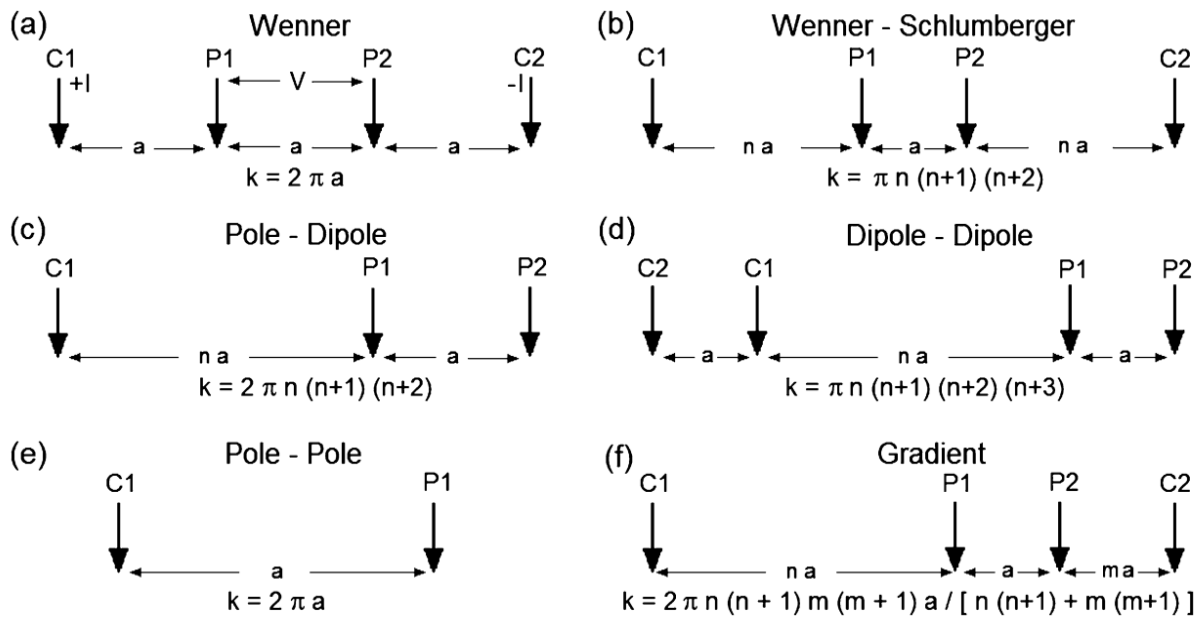
1.6.4.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

Los SEV se utilizan en la hidrogeología para la clasificación de una capa geoelectrica, la cual se distingue por la diferencia de resistividad, espesor, conductancia longitudinal y resistencia transversal (Kelly & Mares, 1993).

Los métodos Wenner, Wenner–Schlumberger, Polo–Dipolo, Dipolo–Dipolo, Polo–Polo y Gradiente son las configuraciones más comunes de electrodos para la medición de la resistividad (ver **Figura 4**). La configuración de Wenner es la más simple, ya que los electrodos de corriente (C1 y C2) y potencial (P1 y P2) se mantienen a una distancia igual de a . Durante los estudios SEV, la distancia a aumenta gradualmente alrededor de un punto central fijo. En la configuración Schlumberger los electrodos de potencial internos tienen una distancia a que es una pequeña proporción de la de los electrodos de corriente externos na (Kearey et al., 2002). En el arreglo dipolo–dipolo los electrodos emisores C1 y C2 se colocan a una distancia a uno del otro, los electrodos receptores P1 y P2 también están separados entre sí por la misma distancia a , el par receptor (P1 y P2) se coloca a una distancia de na del par emisor (C1 y C2), donde n es un factor que se incrementa con cada medición para aumentar la profundidad de investigación (Hölting & Coldewey, 2019). El método **gradiente**, los electrodos de corriente (C1 y C2) están estacionarios

en los extremos de la línea de estudio, mientras que los electrodos de potencial (P1 y P2) se mueven progresivamente a lo largo del perfil y están separados por una distancia a entre sí. El gradiente es una configuración de electrodo eficiente que es fácil de usar y rentable para estudios rápidos de resistividad eléctrica 2D. Sin embargo, el arreglo de gradiente múltiple puede ser más susceptible a las contaminaciones por ruido que el arreglo Wenner (Aizebeokhai & Oyeyemi, 2014).

Figura 4 Tipos de configuraciones geoelectricas



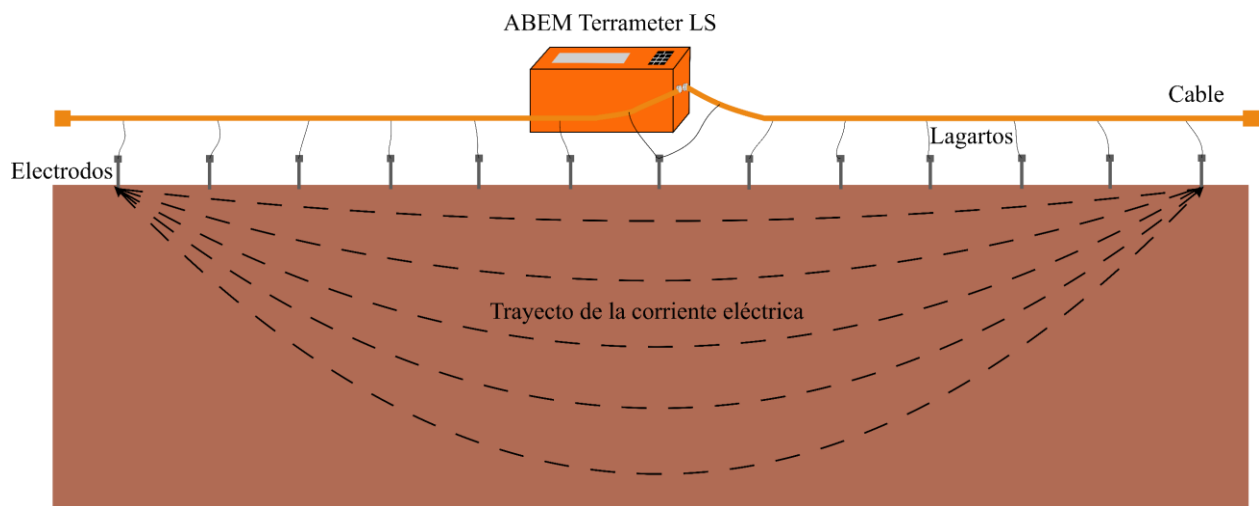
Nota. Tomado de Loke et al. (2020).

1.6.4.1 Tomografía Geoelectrica (TGE).

La TGE bidimensional evalúa los cambios de resistividad en profundidad y también las variaciones laterales a lo largo de la línea de estudio. Utiliza sistemas de múltiples electrodos e inversión de datos bidimensionales, lo que produce un modelo más preciso del subsuelo. La TGE requiere múltiples mediciones de resistividad con varios espaciamientos de electrodos a lo largo de una línea de perfil (2D) o en una cuadrícula bidimensional (3D). Los arreglos más utilizados son Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Gradiente (Kneisel & Hauck, 2008).

En campo, se ubican los electrodos con una separación determinada y se conectan mediante lagartos al cable. En la parte central se ubica la unidad de registro, el cual es un equipo encargado de inyectar la corriente y medir la diferencia de potencial (ver **Figura 5**).

Figura 5 Ejemplificación de la disposición de una TGE



1.6.5 Métodos Electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos transitorios (acrónimo en inglés TEM) se utilizan en la exploración de recursos como el petróleo, las aguas subterráneas, la energía geotérmica, y uranio que se encuentran en estratos horizontales (Spies & Frischknecht, 1991). Como su nombre lo indica, el método implica la propagación de campos electromagnéticos transitorios o de onda continua en la Tierra y sobre ella (desde una aeronave) (Telford et al., 1990).

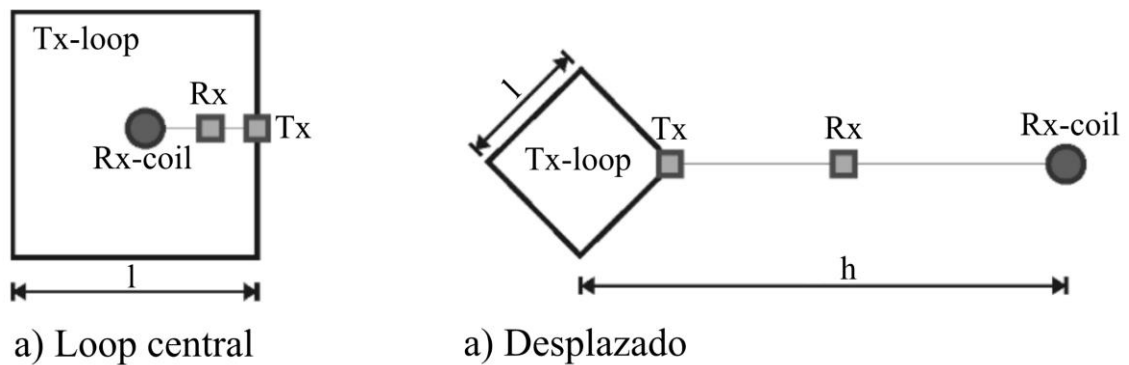
1.6.5.1 Sondeo Electromagnético (TDEM).

Los sondeos electromagnéticos (acrónimo en inglés, Time Domain Electromagnetic Method TDEM) desempeñan un papel importante en las investigaciones hidrogeofísicas, ya que la propiedad física detectada, la conductividad eléctrica, está vinculada petrofísicamente a variables hidrológicas de interés, como el contenido de humedad, la conductividad hidráulica y la porosidad (Yoram & Hubbard, 2005).

El campo magnético se produce al pasar una corriente alterna a través de un bucle (loop) de alambre. Cuando este campo primario se aplica a los materiales de la Tierra, se produce un flujo de corriente eléctrica. La cantidad de flujo de corriente, como en otros estudios eléctricos, depende de la conductividad de las capas. El flujo de corriente produce un campo magnético secundario que tiene la misma frecuencia que el campo primario, pero no la misma fase o dirección. El campo magnético secundario se puede detectar en la superficie del suelo o por encima de ella midiendo el voltaje inducido en otro bucle de alambre, el receptor (Zohdy et al., 1974).

Para los ensayos en campo, Kirsch (2009) menciona que para realizar el sondeo se coloca un cable en un loop cuadrado sobre el suelo. Para los 150 m del suelo, se utiliza habitualmente un cuadrado con un área de $40 \times 40 \text{ m}^2$. Los cables se conectan al transmisor y la bobina receptora con un diámetro de aproximadamente 1 m se coloca en el medio del bucle del transmisor. La bobina receptora se conecta al receptor y el receptor, a su vez, se conecta al transmisor, lo que permite la sincronización entre el transmisor y el receptor (ver **Figura 6**).

Figura 6 Arreglo loop para un sistema TEM



Nota. a) Arreglo loop central, b) Arreglo loop desplazado. Rx receptor, Tx transmisor, l longitud de un lado del loop, h el desplazamiento entre el loop del transmisor y la bobina del receptor Rx-coil. Modificado de Kirsch (2009).

1.6.6 Esquema de sostenibilidad

Para que los programas de gestión de la calidad del agua de consumo humano sean efectivos y sostenibles, es fundamental la participación de las comunidades locales en todas las

etapas. Esto incluye desde los estudios iniciales y decisiones sobre la ubicación de pozos y puntos de captación, hasta el monitoreo de sistemas de abastecimiento, notificación de averías, mantenimiento, medidas correctivas y actividades de saneamiento e higiene (OMS, 2017).

1.6.6.1 Comisión Burtland.

Los cuatro factores Económico, Cultural, Social, Ecológico (ECSE) que la Comisión Brundtland identificó como esenciales para lograr el desarrollo sostenible se detallan en **Tabla 4**. Estos factores ECSE integran los pilares clave de la sostenibilidad, considerando no solo el crecimiento económico, sino también el impacto cultural, social y ecológico de cualquier estrategia de desarrollo.

Tabla 4 Descripción de los factores ECSE

Índice	Factor	Descripción
E	Económico	El desarrollo económico debe estar orientado hacia la mejora del bienestar humano, pero sin explotar los recursos naturales de manera insostenible. Es fundamental encontrar un equilibrio entre el crecimiento económico y la preservación de los recursos naturales.
C	Cultural	La sostenibilidad también requiere la consideración de los valores, tradiciones y conocimientos locales. El respeto por la diversidad cultural y la integración de los saberes tradicionales en las estrategias de desarrollo son fundamentales para su éxito.
S	Social	El desarrollo debe promover la equidad y la justicia social, asegurando que los beneficios del crecimiento económico se distribuyan de manera equitativa entre todas las personas y comunidades. Esto incluye la lucha contra la pobreza y la mejora de la calidad de vida.
E	Ecológico	La protección del medio ambiente y la conservación de los ecosistemas son esenciales. La explotación de los recursos naturales debe realizarse de manera que se mantenga la integridad de los sistemas ecológicos para las generaciones futuras.

Nota. Modificado de UNESCO (1987).

1.6.6.2 Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

La Agenda 2030 desarrollada por la ONU (2015), se enfoca en eliminar la pobreza y el hambre mundial antes de 2030, reducir desigualdades, construir sociedades justas, proteger los derechos humanos, promover la igualdad de género, y garantizar la protección del planeta.

Además, busca un crecimiento económico sostenible y empleo digno para todos, considerando las diferencias de desarrollo entre los países, planteando 17 objetivos de Desarrollo Sostenible con 169 metas, que se ilustran en **Figura 7**.

Figura 7 Principal enfoque de los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Nota. Tomado de Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2017).

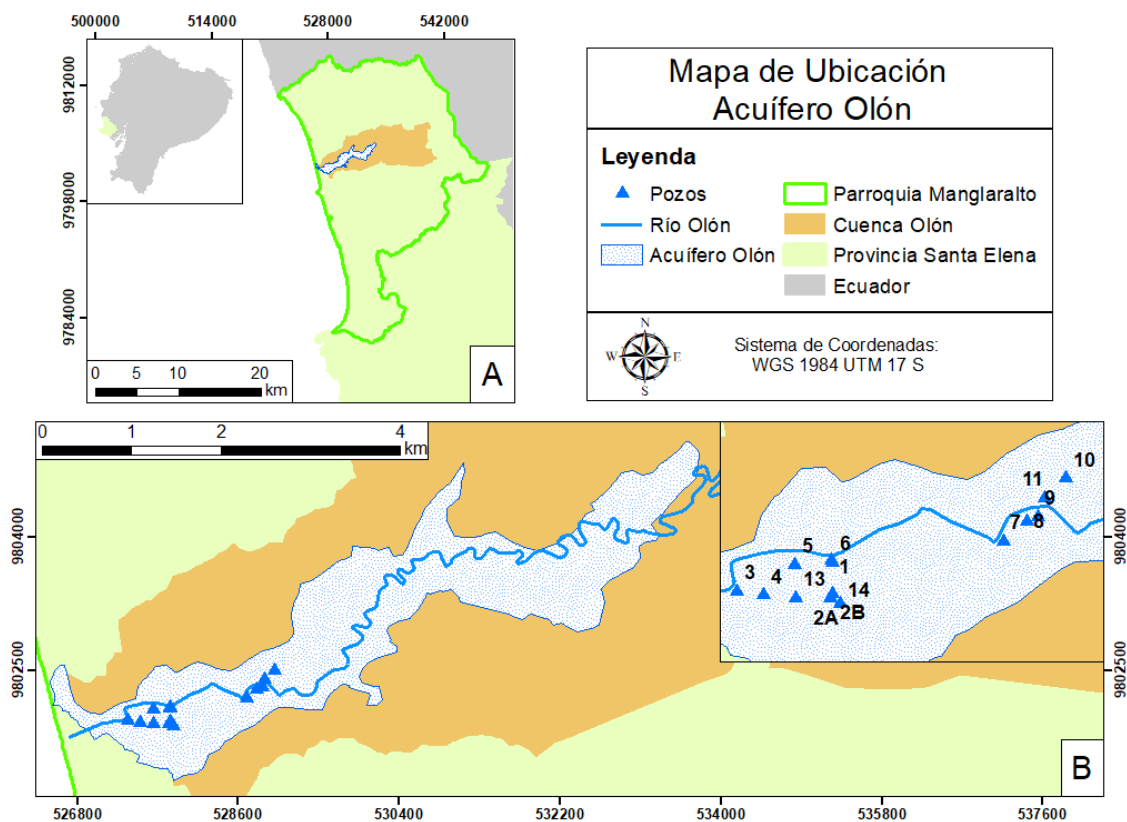
Capítulo 2

2.1 Ubicación geográfica

La comuna de Olón está ubicada a 61.3 km del cantón Santa Elena y a 6.6 km de la comuna Manglaralto. Limita al norte con la comuna Curía, al sur con Montañita, al este con Pajiza y la cordillera Chongón Colonche y al oeste con el Océano Pacífico. Posee una superficie total de 5,728.70 ha y playas que se extienden por más de 2 km.

Su ubicación geográfica cerca de la cordillera Chongón Colonche, permite el escurrimiento de agua y recarga de los acuíferos que abastecen la comuna (Herrera et al., 2020). La **Figura 8** muestra la ubicación de la zona de estudio del proyecto.

Figura 8 Mapa de ubicación del acuífero Olón



Nota. (A) Acuífero de Olón con respecto a la parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena. (B) Cuenca Olón y los pozos de abastecimiento dentro del acuífero Olón. Información cartográfica obtenida de CIPAT.

2.1.1 Aspecto Socioeconómico

Las principales actividades económicas son el turismo, la gastronomía, la agricultura, la pesca artesanal y la elaboración de artesanías. En la agricultura se encuentran plantaciones de caña guadua y cultivos de maíz y plátano, los cuales son beneficiados por su cercanía a la cuenca del río Olón (GAD Manglaralto, 2019). El ingreso promedio mensual en el 2021 por productor en la comuna Olón fue de \$3,153.10, sin embargo, estos resultados varían de acuerdo con las condiciones estacionales y las limitaciones del recurso hídrico, que no permiten una producción continua de los cultivos (Drouet–Candel et al., 2021).

Los principales atractivos turísticos son: La Playa de Olón, el Santuario Blanca Estrella de Mar, y Las Cascadas de Alex que están dentro del bosque de la comuna, lo cual ha llevado al incremento de establecimientos como alojamiento, restaurantes, bares y servicios turísticos (Fortis et al., 2017). De acuerdo con los datos del Servicio de Rentas Internas, las ventas relacionadas al turismo sumaron un total 64.3 millones de dólares en la provincia de Santa Elena (Prefectura de Santa Elena, 2023).

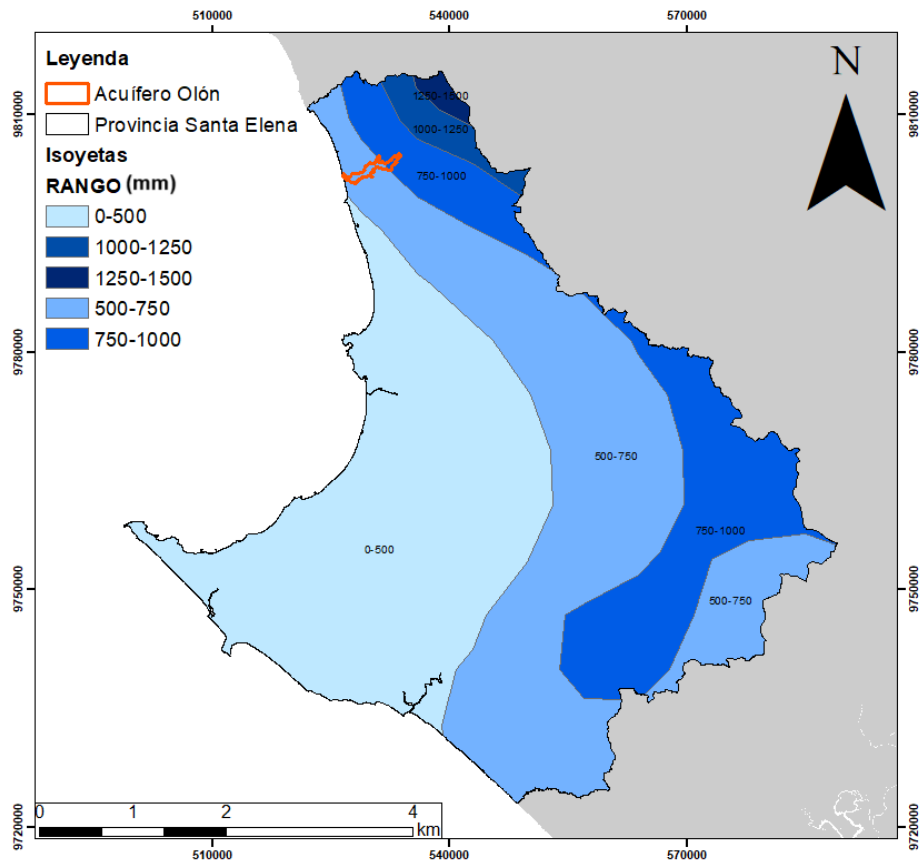
2.1.2 Climatología

Presenta un clima cálido, fresco y seco con temperaturas medias superiores a 23° C–25° C. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) la precipitación anual varía entre 200–700 mm (Herrera Franco et al., 2019).

Los datos climatológicos y de precipitación recopilados en el período 1985–2009, discriminando los valores extremos, señalan una precipitación media anual de 387.33 mm en la estación de Manglaralto, siendo febrero y marzo los meses más lluviosos, y noviembre y diciembre los meses más secos para ese período (IEE & MAGAP, 2012a).

El mapa de isoyetas del período 1985–2015 muestra una media anual de precipitaciones de 500–750 mm en la comuna Olón (ver **Figura 9**).

Figura 9 Mapa de Isoyetas de la Provincia de Santa Elena



Nota. Mapa elaborado con la información de INAMHI series 1985–2015.

2.1.3 Uso y Cobertura del Suelo

Predominancia de ecosistemas de Manglar, Marino, Bosque húmedo de costa y Bosque seco occidental. Los suelos están cubiertos principalmente de vegetación herbácea, también destinados al uso residencial y turístico, y a la agricultura (GAD Manglaralto, 2019). La zona está conformada por suelos agrícolas con cultivos de limón, maíz, maracuyá, plátano, paja toquilla, pechiche, suelos destinados a la producción de caña guadua o bambú, suelos mixtos agropecuarios, bosques protegidos, zonas urbanas y residenciales (Valencia, 2017).

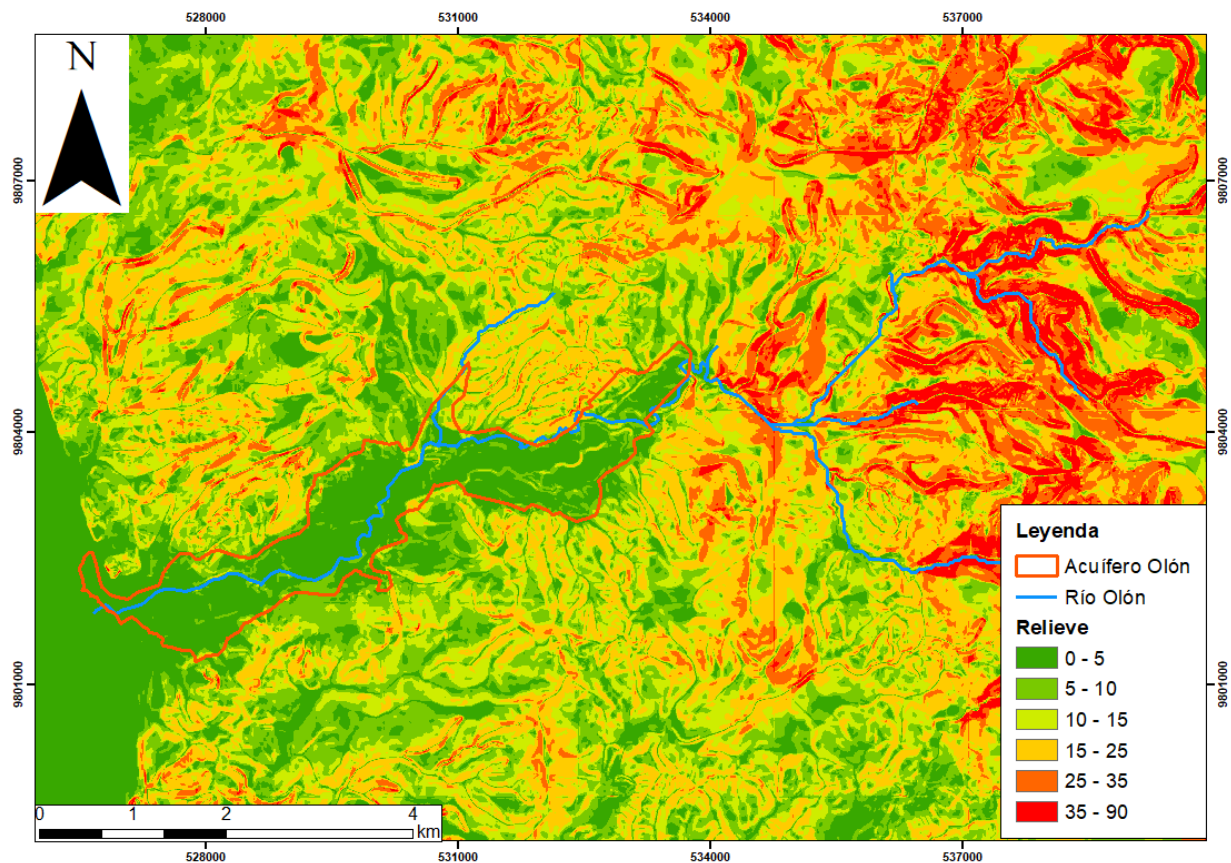
La cordillera Chongón Colonche está cubierta por vegetación arbórea. En los relieves litorales sedimentarios y fluvio-marinos, la cobertura natural son formaciones vegetales de tierra baja, manglar y vegetación herbácea de playa marina (IEE & MAGAP, 2012b).

2.1.4 *Relieve*

El relieve es plano en toda su zona costera, con pequeñas elevaciones hacia el este en la Cordillera Chongón-Colonche (Borja et al., 2012). Los relieves se caracterizan por ser bajos a moderados entre 100 a 200 metros con pendientes bajas y muy bajas, dispuestos sobre material detrítico (GAD Santa Elena, 2020b).

Está constituido por terrenos planos o con poca pendiente, y terrenos ondulados con pendientes inferiores a 5% (GAD Manglaralto, 2019) (ver **Figura 10**).

Figura 10 Mapa de pendientes de la comuna Olón



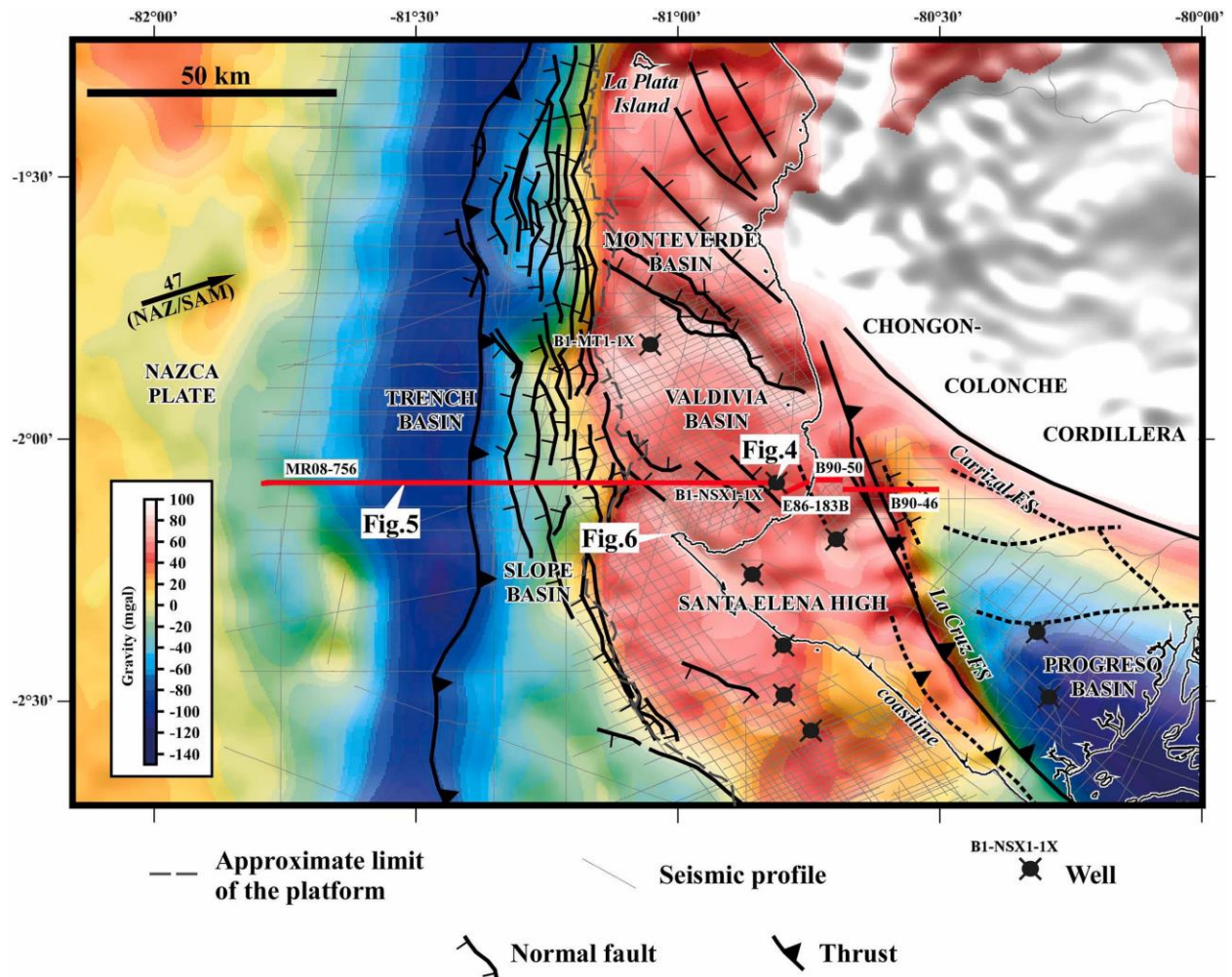
Nota. Mapa elaborado a partir del DEM SIGTIERRAS.

2.2 **Marco tectónico**

El mapeo estructural de Bulois et al. (2023) determinan que el dominio terrestre y el dominio de plataforma entre la Península de Santa Elena y la Isla de La Plata se caracterizan por sistemas de fallas normales con rumbo N130°E y buzamiento noreste, notablemente paralelos al

sistema de fallas normales de la Cordillera Chongón-Colonche y Carrizal, de edad principalmente Cretácico Tardío–Paleoceno (ver **Figura 11**).

Figura 11 Mapa de gravedad en aire libre con fallas identificadas



Nota. El marco de fallas del Cenozoico a la actualidad de la Cuenca Valdivia–Península de Santa Elena y el límite al norte de la Cuenca Progreso fueron determinados por perfiles sísmicos. Tomado de Bulois et al. (2023).

La morfología y el patrón de drenaje del margen costero del Ecuador están estrechamente relacionados con las principales deformaciones neotectónicas. Todas las secciones de los ríos y estuarios aguas abajo están controladas por tectónica de fallas pliocuaternarias. La geometría de la costa central del Ecuador se caracteriza por la subducción de la Dorsal Carnegie, la cual

probablemente también dio origen al levantamiento que produjo la cordillera costera (Dumont et al., 2014).

2.3 Marco Geomorfológico

El Cantón Santa Elena presenta cinco principales unidades geomorfológicas descritas por IEE & MAGAP (2012b): Cordillera Chongón-Colonche, Cordillera Costera Chanduy-Playas, Relieves Estructurales y Colinados Terciarios, Relieves Litorales Sedimentarios y Fluvio-Marinos y Medio Aluvial.

La zona de estudio está conformada por las siguientes unidades geomorfológicas:

- Cordillera Chongón-Colonche. Se extiende desde la parte sur hasta Manglaralto y las Delicias, presentando relieves colinados medios y altos de origen estructural, también superficies y frentes de chevrón de origen tectónico erosivo.
- Relieves Litorales Sedimentarios y Fluvio-Marinos. Presenta superficies disectadas y vertientes de mesas marinas, además se encuentran geoformas marinas y fluvio-marinas, asociados a marismas, estuarios, cordones litorales, planicies costeras, y salitrales.
- Medio Aluvial. Influenciada directamente por la acción de los ríos, lo que ha resultado en formas de relieve de valles fluviales, terrazas altas, medias, bajas e indiferenciadas, y depósitos aluviales.

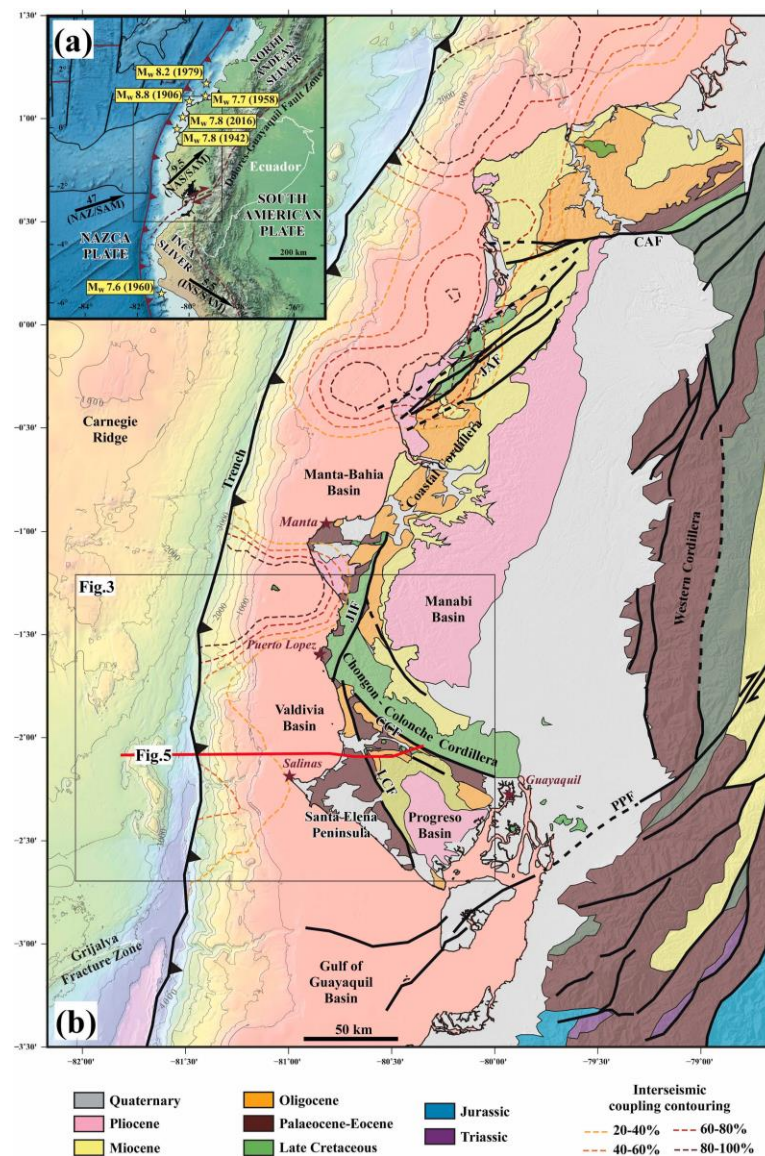
2.4 Marco Geológico

2.4.1 Marco Geológico Regional

Muchas características geológicas de Ecuador se atribuyen comúnmente a la subducción de la dorsal de Carnegie (ver **Figura 12**). Algunas de estas características incluyen: (1) subducción-erosión y **levantamiento costero**, (2) deriva hacia el norte del bloque norandino y apertura del Golfo de Guayaquil, (3) altas tasas de exhumación de materiales volcánicos en los Andes, (4) la presencia de una corteza plana correspondiente a una prolongación hacia tierra de la

Cordillera de Carnegie debajo de la placa superior y (5) cambios en la química del arco volcánico activo relacionados con la geometría de la corteza plana (Kay et al., 2009). Los procesos geodinámicos, como la interacción de las placas de Nazca y la dorsal de Carnegie con el margen continental, han influido en el desarrollo de las cuencas de antearco del Cenozoico en la zona costera del Ecuador (Aizprua et al., 2019; Hernández et al., 2020).

Figura 12 Marco Geológico de la Costa Ecuatoriana



Nota. A) Marco geodinámico convergencia de placas Nazca y Sudamérica. B) Marco geológico. Mapa estructural del margen suroeste del Ecuador. PPF: Falla Puná–Pallatanga. LCF: Falla La Cruz. CCF: Falla Chogon–Colonche. JIF: Falla Jipijapa. JAF: Falla Jama. CAF: Falla Canande. Tomado de Bulois et al. (2023).

El modelo evolutivo propuesto por Reyes (2008) para la cordillera costera del Ecuador incluye ocho etapas:

1) Período Pre–Plioceno Medio (**Figura 13 a**): desarrollo de las cuencas de Progreso, Borbón y Manabí en un ambiente marino y levantamiento parcial de la cordillera Chongón–Colonche.

2) Plioceno superior Pleistoceno inferior (**Figura 13 b**): levantamientos del bloque Portoviejo y segmento sur de la cordillera Chongón–Colonche. La formación Balzar se forma al este del nuevo relieve. La cuenca del Borbón continúa bajo un ambiente marino al igual que la parte noroeste de la cuenca de Manabí.

3) Período Pleistoceno Inferior (**Figura 13 c**): se eleva el bloque norte de la cordillera Chongón–Colonche (NNW–SSE), al sur emerge la cuenca de Progreso.

4) Período Pleistoceno Medio Inferior (**Figura 13 d**): el levantamiento del bloque Jipijapa (NNW–SSE), deforma lateralmente el bloque Portoviejo. El cono de Santo Domingo se deposita, acumula y expande al bloque Portoviejo. Al hacerlo, esta acumulación contribuye a compartir el drenaje entre el Norte (cuenca del Río Esmeraldas) y el Sur (cuenca del Río Guayas).

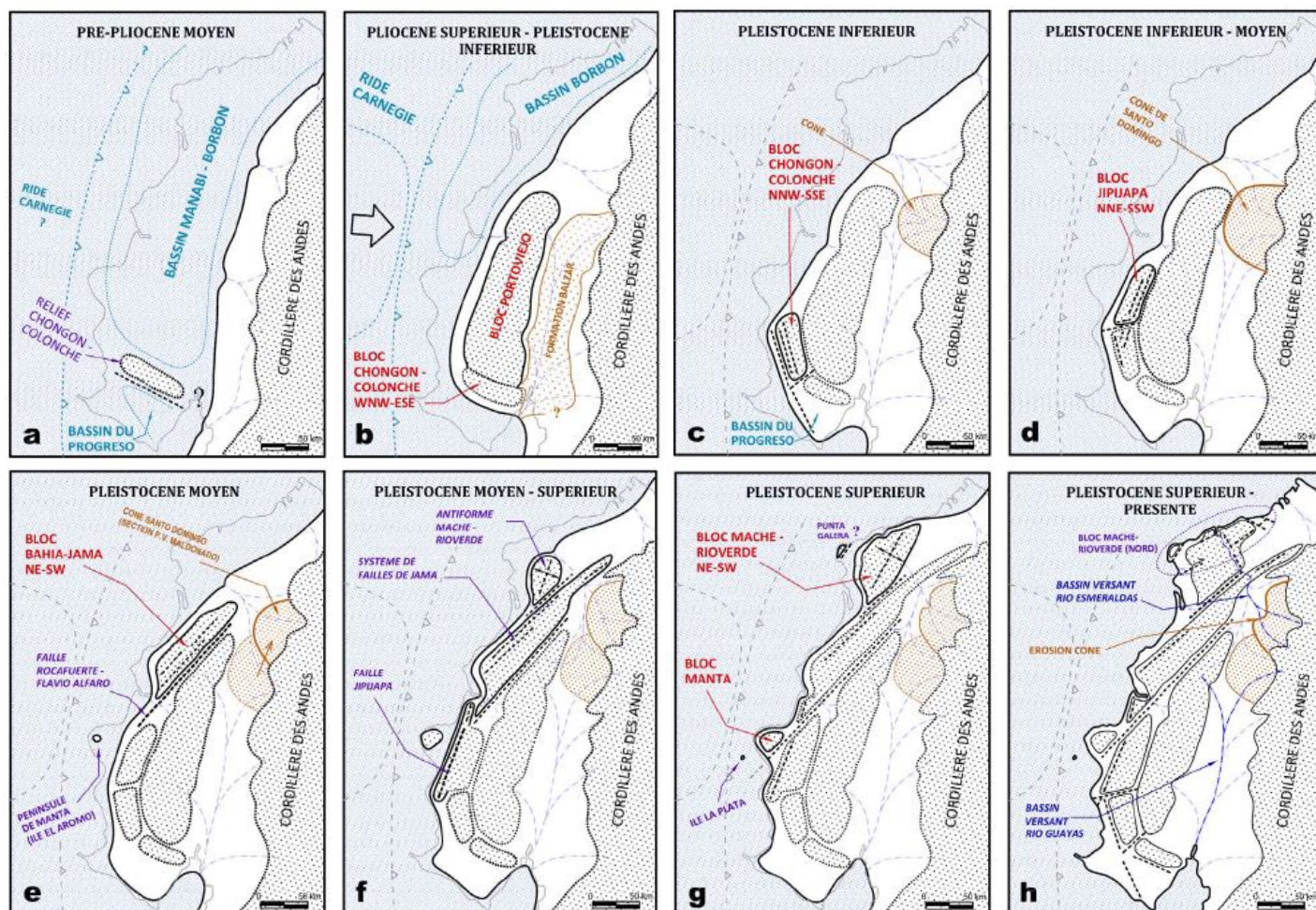
5) Período Pleistoceno Medio (**Figura 13 e**): en el Norte comienza a levantarse el bloque Bahía–Jama. El levantamiento de este bloque deforma localmente el bloque Portoviejo a lo largo de la falla Rocafuerte–Flavio Alfaro. El cono de Santo Domingo migra hacia el norte y la Península de Manta comienza a elevarse.

6) Período Pleistoceno Medio Tardío (**Figura 13 f**): comienza a formarse el antiformal Maché Río Verde (NE–SW). El sistema de fallas Jama se propaga hacia el NE. La falla de Jipijapa al oeste del bloque Jipijapa comienza a interactuar con la Falla Jama.

7) Período Pleistoceno tardío (**Figura 13 g**): se levanta el bloque Manta (interacción entre los sistemas de fallas Jipijapa y Jama). El bloque Maché Río Verde (antiforme) continúa su levantamiento. Punta Galera comienza a emerger a través de la Falla de Galera.

8) Pleistoceno tardío presente (**Figura 13 h**): las cuencas del Río Esmeraldas (Norte) y Río Guayas (Sur) están tomando forma. El bloque Mache–Ríoverde surge mediante el juego de un sistema de fallas NE–SW que desemboca en un sistema NNW–SSE en Ríoverde. El cono de Santo Domingo comienza a ser erosionado por los afluentes del Río Esmeraldas.

Figura 13 *Modelo de Evolución de la Cordillera Costera Ecuatoriana*



Nota. Modelo de evolución. Tomado de Reyes (2008).

2.4.2 Marco Geológico Local

La estratificación del Suroeste de Ecuador comienza con los depósitos volcanoclásticos marino profundo de arcos de islas del Cretácico Tardío pertenecientes a las Formaciones Cayo, Santa Elena y Guayaquil. Luego, fue acrecionado hace ~58 Ma, dando como resultado los depósitos turbidíticos de la Formación Azúcar como relleno de la cuenca de trinchera (Benitez,

1995; Jaillard et al., 1995). Después de la acreción, el antearco del SO de Ecuador puede haber estado en extensión durante la sedimentación del Grupo Ancón. Se sugiere que la compresión se renovó durante el Eoceno (Jaillard et al., 1995; Jaillard et al., 1997; Witt et al., 2019). El antearco moderno se inició durante el Oligoceno con el inicio de la cuenca Progreso, que expone principalmente en orden ascendente las Formaciones Zapotal, Villingota, Dos Bocas, Subibaja y Progreso (Witt et al., 2019).

La península de Santa Elena pertenece a un sistema de antearco terrestre-marítimo del Cretácico Superior al Cuaternario que contiene la Cuenca de Valdivia al norte, la Cuenca de Guayaquil al sur y la Cuenca de Progreso al este, rodeadas por un sistema de cordilleras como la Cordillera Chongón-Colonche (Bulois et al., 2023). La Cordillera Chongón-Colonche tiene como basamento a la Formación basáltica Piñón, sobre esta yace la Formación Cayo, con un contacto erosivo al techo con la Formación Guayaquil, luego sufre un hiato y es depositado por la Formación Santa Elena (Aizprua et al., 2019).

La geología de Olón está representada por afloramientos de la formación Cayo, Grupo Ancón, Socorro (Miembro Javita y Miembro Dos Mangas), Zapotal y Depósitos aluviales, tal como se muestra en la **Figura 14**.

Figura 14 Mapa Geológico Zona de Estudio–Olón



Nota. Da: Depósito aluvial; E2–3: Grupo Ancón; E3–01: M. Zapotal; E–2: M. Dos Mangas, F. Socorro; E2f: M. Caliza Javita, F. Socorro; K4–7: F. Cayo. Mapa realizado a partir de la Hoja Geológica Manglar Alto, escala 1:100,000 del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE).

2.5 Estratigrafía

En la comuna Olón aflora las siguientes formaciones geológicas descritas en la **Figura 15**:

- **Formación Cayo (Cretácico Superior)**

Aflora en la cordillera Chongón–Colonche. Yace sobre el basamento máfico Piñón y se caracteriza litológicamente en su base por brecha volcánica con fragmentos ígneos de andesita, en su parte intermedia por una alternancia de estratos delgados, gruesos y masivos de areniscas finas y gruesas de color verde con lutitas, hacia el techo tobas y cherts (Núñez Del Arco & Dugas, 1985).

En la sección tipo presenta espesores de hasta 3,000 m, en la cordillera Chongón–Colonche aproximadamente 2,600 m y al norte de Guayaquil presenta potencias de 1,400 m (Núñez Del Arco, 2003).

- **Grupo Ancón (Eoceno Medio – Eoceno Superior)**

Comprende las formaciones Socorro y Seca. La formación Socorro está integrada por los miembros Clay Pebble Beds y Socorro. Mientras que, la formación Seca con los miembros Lutita Seca y Punta Ancón. En el flanco sur de la Cordillera Chongón–Colonche no se encuentra el miembro Clay Pebble Bed ni Punta Ancón (Núñez Del Arco & Dugas, 1985).

La secuencia Seca–Socorro exhibe una unidad de brecha de lodo, comenzando por un conglomerado intraformacional y ascendiendo a un olistóstromo. Las capas de areniscas masiva corresponderían a flujos de fondo de alta densidad confinados con el canal. Las capas paralelas y extensas sugieren que se trata de turbiditas distales de baja densidad (Witt et al., 2019).

- **Formación Socorro (Eoceno Medio)**

El **Miembro Javita** consiste en calizas arrecifales desarrolladas en el flanco suroeste de la Cordillera Chongón–Colonche, está conformada por calcarenitas de grano grueso alternadas con conglomerados o brechas. Comúnmente se presentan lutitas calcáreas en la base y raramente nódulos de chert. El **Miembro Dos Mangas** presenta en la localidad tipo un conglomerado basal que descansa en discordancia sobre las areniscas y lutitas inferiores de Socorro, el contacto superior es transicional con Seca. El miembro consiste en areniscas y conglomerados con espesores de 120–150 m (Bristow & Hoffstetter, 1977).

- **Formación Zapotal (Eoceno Superior – Oligoceno Inferior)**

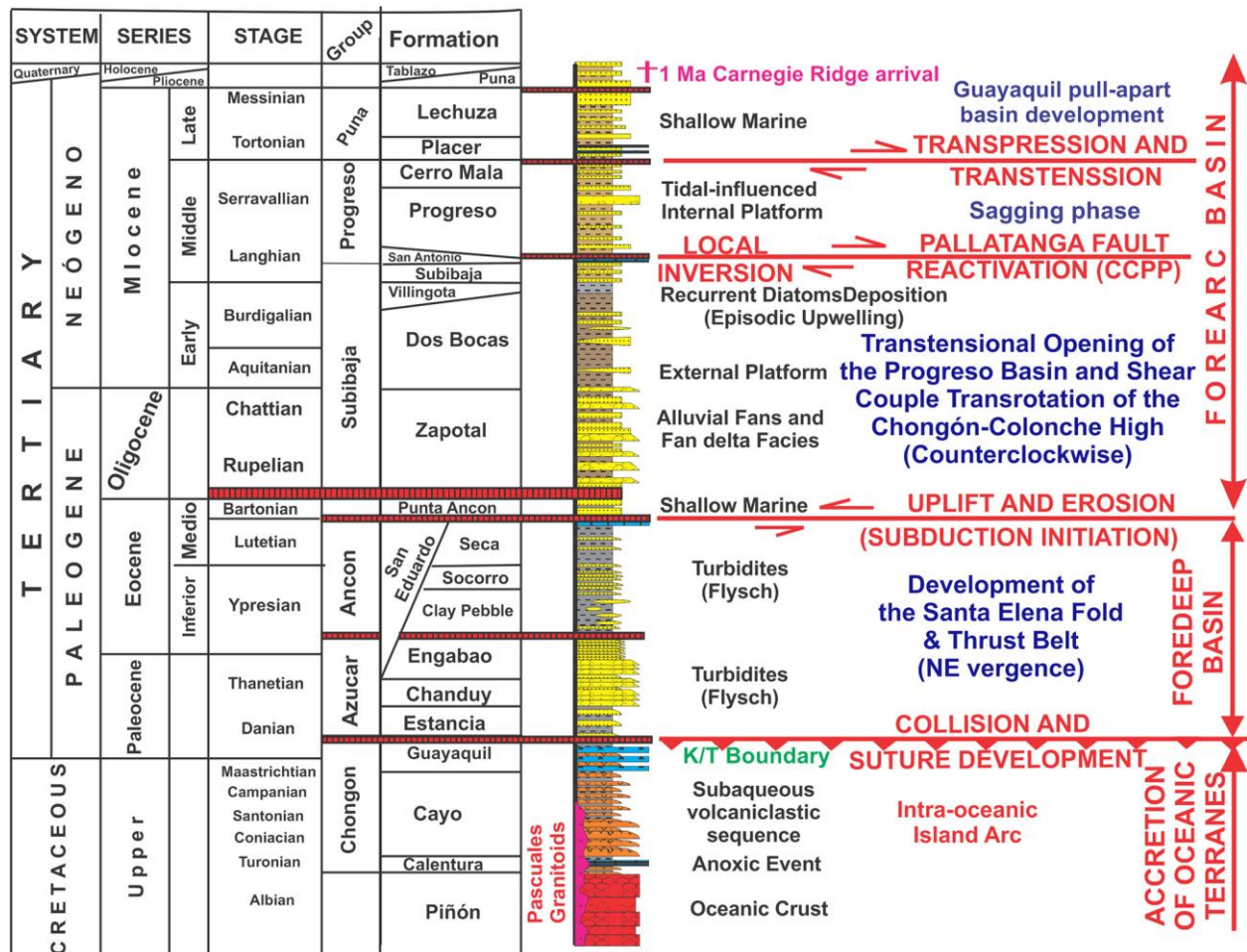
Yace discordantemente sobre el Grupo Ancón, Compuesta de areniscas tobáceas y poligénicas, conglomerados masivos soportado por clastos con elementos redondeados depositados durante el Oligoceno más temprano (Witt et al., 2019).

Los clastos son guijarros de cuarzo, chert, areniscas y calizas provenientes de las formaciones anteriores. Se estima unos 600 m de espesor (Núñez Del Arco & Dugas, 1985).

- **Depósitos Aluviales (Holoceno)**

Constituido por depósitos de gravas, arenas y arcillas no consolidadas, transportadas por corrientes de ríos, esteros y quebradas (Núñez Del Arco, 2003). Son de origen fluvial y cubren principalmente rocas cretácico–terciarias en las partes bajas de la planicie costera (Bristow & Hoffstetter, 1977).

Figura 15 Columna estratigráfica del suroeste del Ecuador



Nota. Se muestra los principales eventos tectónicos del suroeste ecuatoriano, desde la acreción de los terrenos alóctonos oceánicos hasta la formación de las cuencas de antearco. Tomado de Alemán et al. (2021).

2.6 Hidrogeología

La subcuenca hidrográfica del río Olón posee una extensión de 53.29 km², con un régimen intermitente con cambios estacionales en su caudal, debido a fluctuaciones meteorológicas y

variaciones en la cobertura vegetal. Las comunas de Manglaralto se ven afectadas por un balance hídrico negativo general de <400 mm/año (GAD Manglaralto, 2019).

El río Olón tiene su origen en la parte alta de la cuenca, a unos 800 m de la cordillera Chongón-Colonche, y recorre alrededor de 13 km hasta desembocar en el mar, pasando a través de áreas aluviales donde se almacena el recurso hídrico (Loor, 2023).

El acuífero Olón es de tipo poroso-libre-costero con espesores entre 10 y 40 m. Posee un valor de transmisividad $17 \text{ m}^2/\text{día}$, la cual es baja con posibles pozos de 1 y 10 l/s. La permeabilidad es de 1.6 m/día y la porosidad estimada de los aluviales de 20% debido al material arcillosos presente. La superficie piezométrica se encuentra a 9 m de la superficie (Montalván, 2008).

La aplicación de técnicas ancestrales para la recarga artificial del acuífero ha contribuido a la resolución del problema de escasez de agua, la eficacia de las albarradas y tapes, se evidencia en el aumento de los niveles piezométricos de los pozos cercanos a estas estructuras (Herrera-Franco, Carrión-Mero, et al., 2020).

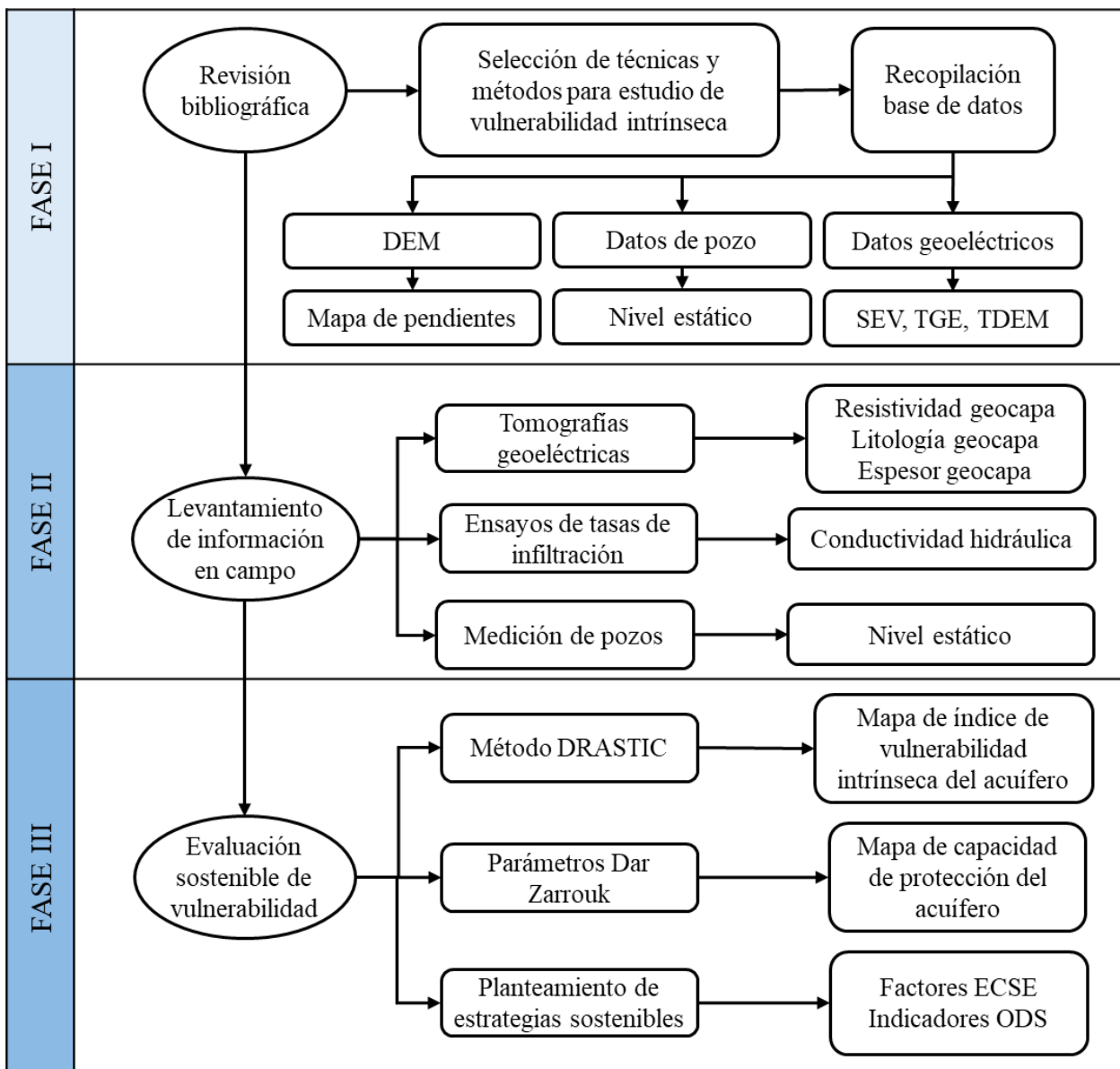
Capítulo 3

3.1 Metodología

3.1.1 Diseño de fases

El estudio de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero es fundamental para evaluar la susceptibilidad natural del acuífero a la contaminación. Para el desarrollo del proyecto se plantearon tres fases, en donde se resumen la búsqueda y recopilación bibliográfica de metodologías y técnicas aplicables a la zona de estudio, la adición de datos tomados en campo y finalmente el análisis de vulnerabilidad para una gestión sostenible (ver **Figura 16**).

Figura 16 Diagrama de fases del proyecto



3.1.2 Materiales

Recursos digitales

Se utilizó el software ArcMap V10.8.2 para el procesamiento del índice de vulnerabilidad y los parámetros Dar Zarrouk, mediante la interpolación de los parámetros obtenidos de los ensayos y datos disponibles. Por otro lado, se empleó el programa RES2DINV V3.55.32, para el procesamiento de datos de las TGE.

El modelo de elevación digital (DEM) se obtuvo de SIGTIERRAS con una resolución espacial de 3 m del portal [Ministerio de Agricultura y Ganadería](#).

Los datos de precipitación mensual se obtienen del Visor de Acceso de Datos (acrónimo en inglés, DAV) perteneciente al proyecto POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (acrónimo en inglés, NASA), el cual proporciona conjuntos de datos meteorológicos y de radiación solar de las investigaciones.

Equipos

Los equipos utilizados para la realización del estudio se resumen en la **Tabla 5**.

Tabla 5 Especificaciones de equipos utilizados

Equipo	Función
Ensayos Geofísicos–TGE	
ABEM TERRAMETER LS2	Es un equipo avanzado para la realización de estudios de resistividad eléctrica y polarización inducida (IP) en investigaciones geofísicas.
Cables multinúcleo	Diseñados para conectar el TERRAMETER LS2 con los electrodos en el suelo. Se utilizaron 2 carretes de longitud 100 m cada uno.
Electrodos	Son instrumentos metálicos que se fijan en el suelo y permiten la conducción de corriente eléctrica en el subsuelo para la medición de las respuestas eléctricas del terreno. Se utilizaron un total de 41 electrodos.

Lagartos	Establecen la conexión del electrodo con el cable. Se emplearon 42 lagartos en total.
Batería de 12 v	Fuente de energía para el funcionamiento del ABEM Terrameter LS2, encargado de la inyección y medición de corriente.

Datos de pozo

Sonda de nivel SEBA modelo Solinst 101B	Es un dispositivo especializado diseñado para medir niveles de agua en pozos, cuenta con un sensor que detecta el nivel del agua mediante un cambio de conductividad al entrar en contacto con la misma.
Multiparamétrico HANNA HI9829	Es un medidor multiparamétrico portátil diseñado para analizar la calidad del agua en campo, capaz de medir parámetros como pH, ORP, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, salinidad y temperatura.

Ensayos de tasa de infiltración

Anillos de metal	Se utilizaron un anillo interno de 32 cm y un anillo externo de 58 cm para los ensayos de infiltración.
Boya de nivel	Mide el nivel de agua en escala milimétrica. Contiene una pieza de ajuste que limita la flotación hasta la altura del anillo interno.
Canecas de agua	Suministra agua al arreglo de anillos para los ensayos de infiltración.

Herramientas generales

Combos	Se emplearon combos para fijar los materiales como electrodos y anillos en el suelo.
GPS Garmin	Se utilizó para tomar las coordenadas UTM de cada ensayo realizado.

3.1.3 Fase I: Revisión bibliográfica

3.1.3.1 Fase I-a: Selección de metodología

Para la selección de la metodología aplicada a la zona de estudio, se realizaron distinciones entre seis índices, GOD, SINTACS, GALDIT, DRASTIC, COP, EPIK, evaluando criterios como la disponibilidad de datos en el CIPAT, la adaptabilidad de los parámetros a las condiciones del acuífero (poroso-libre-costero), la capacidad del método para capturar cambios en los parámetros

hidrogeológicos (como recarga, tipo de suelo, profundidad del acuífero), precisión y confiabilidad de los resultados, y la inversión en mano de obra y tiempo para la realización del método. La evaluación se realiza mediante una matriz de decisión desarrollado por Pugh (1981), asignando puntuaciones del 1 al 5, siendo 1 el de menor puntuación y 5 el de mayor a cada criterio. Los resultados se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Matriz de elección de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad

Métodos Criterios	GOD	SINTACS	GALDIT	DRASTIC	COP	EPIK
Disponibilidad de datos	5	4	3	4	3	2
Adaptable a la zona de estudio	3	4	5	5	3	3
Sensibilidad al cambio de parámetros	3	5	4	5	4	4
Precisión de resultados	3	4	4	5	3	4
Menos inversión mano obra y tiempo	2	3	3	4	4	3
Total	16	20	19	23	17	16

Se descartaron los métodos GOD, COP y EPIK como posibles índices a utilizar en la evaluación de la vulnerabilidad. De acuerdo con la descripción de Goyal et al. (2021) de cada método de la **Tabla 2**, el análisis GOD no es muy preciso, ya que solo considera tres parámetros en su análisis, mientras que, el índice COP y EPIK, fueron desarrollados con un enfoque a acuíferos kársticos, lo cual no se adapta al tipo de acuífero de la zona de estudio. Los métodos con mayor puntuación fueron SINTACS, GALDIT y DRASTIC. El método GALDIT se enfoca principalmente en evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la intrusión salina, para lo cual, requiere de datos de conductividad hidráulica (A) y datos hidroquímicos para hallar el impacto de la intrusión de agua de mar en el área de estudio (I), los cuales no están disponibles en la base de datos y se deben de tomar en campo. Por otro lado, para el método DRASTIC y SINTACS, existe

mayor disponibilidad de datos, en donde solamente el parámetro de conductividad hidráulica (C) se debe de levantar en campo. Sin embargo, el método SINTACS, fue desarrollado como una derivación de DRASTIC por Civita & De Maio (1997), adaptado a condiciones mediterráneas de Italia, en donde se enfrenta a desafíos específicos como sequías, extrema variabilidad climática, y utilización intensiva del recurso hídrico, lo cual no se ajusta a la zona de estudio. Finalmente, se seleccionó el método DRASTIC para el estudio de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero Olón debido a los criterios mencionados anteriormente. En adición, se optó por realizar el análisis del parámetro de conductancia longitudinal para evaluar la capacidad de protección del acuífero, integrando los resultados DRASTIC y delimitando las zonas más susceptibles a contaminación (Udosen et al., 2024).

La fuente de donde se obtuvo cada parámetro se describe en la **Tabla 7**.

Tabla 7 Fuente de obtención de parámetros DRASTIC

Parámetro	Fuente
D	Nivel estático de pozos de CIPAT (2024) Ensayos geoelectricos (2008, 2024) (ver Fase I–b : Recopilación base de datos)
R	Método Piscopo (2001) (ver Fase I–b : Recopilación base de datos) $R = pendiente + precipitación + permeabilidad\ del\ suelo$
A	Ensayos geoelectricos (2008, 2024) (ver Fase I–b : Recopilación base de datos)
S	Ensayos geoelectricos (2008, 2024) (ver Fase I–b : Recopilación base de datos)
T	DEM SIGTIERRAS (ver Fase I–b : Recopilación base de datos)
I	Ensayos geoelectricos (2008, 2024) (ver Fase I–b : Recopilación base de datos)
C	Ensayos de tasas de infiltración (ver Fase II : Levantamiento de información en campo)

Los rangos y clasificaciones asignadas a cada parámetro se detallan en la **Tabla 8**.

Tabla 8 Clasificación de los parámetros DRASTIC

D (depth of water m)		R (net recharge mm)		A (aquifer media)		S (soil media)	
Rango	Clasificación	Rango	Clasificación	Rango	Clasificación	Rango	Clasificación
0–1.5	10	11–13	10	Lutita masiva	2	Delgada o ausente	10
1.5–4.6	9	9–11	8	Metamórfica/ígneas	3	Grava	10
4.6–6.8	8	7–9	5	Metamórfica/ígneas meteorizada	4	Arena	9
6.8–9.1	7	5–7	3	Till glacial	5	Turba	8
9.1–12.1	6	3–5	1	Secuencias estratificadas de arenisca, caliza y lutita	6	Arcilla encogida y/o agregada	7
12.1–15.2	5			Arenisca masiva	6	Franco arenoso	6
15.2–22.9	4			Caliza masiva	6	Franco	5
22.9–26.7	3			Arena y grava	8	Franco limoso	4
26.7–30.5	2			Basalto	9	Franco arcilloso	3
>30.5	1			Caliza kárstica	10	Lodo	2
						Arcilla no encogida y no agregada	1

T (topography)		I (impact of vadose zone)		C (hydraulic conductivity (m/s))	
Rango	Clasificación	Rango	Clasificación	Rango	Clasificación
0–2	10	Capa confinada	1	$>9.5 \times 10^{-4}$	10
2–6	9	Limo/arcilla	3	$5.0 \times 10^{-4} - 9.5 \times 10^{-4}$	8
6–12	5	Lutita	3	$3.3 \times 10^{-4} - 5.0 \times 10^{-4}$	6
12–18	3	Metamórfica/ígneas	4	$1.5 \times 10^{-4} - 3.3 \times 10^{-4}$	4
>18	1	Caliza	6	$5.0 \times 10^{-5} - 1.5 \times 10^{-5}$	2
		Arenisca	6	$1.5 \times 10^{-7} - 5.0 \times 10^{-5}$	1
		Caliza estratificada	6		
		Arena y grava con importante cantidad de limo y arcilla	6		
		Arena y grava	8		
		Basalto	9		
		Caliza kárstica	10		

Nota. Modificado de Aller et al. (1987).

3.1.3.2 Fase I–b: Recopilación base de datos

Datos Geoeléctricos

Se recopilaron datos de resistividad, litología y espesor de las geocapas obtenidos a partir de ensayos geofísicos realizados dentro del área del acuífero, correspondientes a: 23 SEV, 8 TDEM y 7 TGE, en donde se escogieron puntos a lo largo de la sección que representen cambios en espesor y litología (ver **Figura 17**). Las coordenadas de cada ensayo se detallan en la **Tabla 9**. Los datos de SEV corresponden al estudio de Montalván (2008) y los datos de TDEM y TGE al

estudio realizado por Lozano & Márquez (2024), la interpretación de estos se presenta en la **Tabla 23 (ver Anexos)**.

Figura 17 Mapa de ubicación de ensayos geoelectricos anteriores

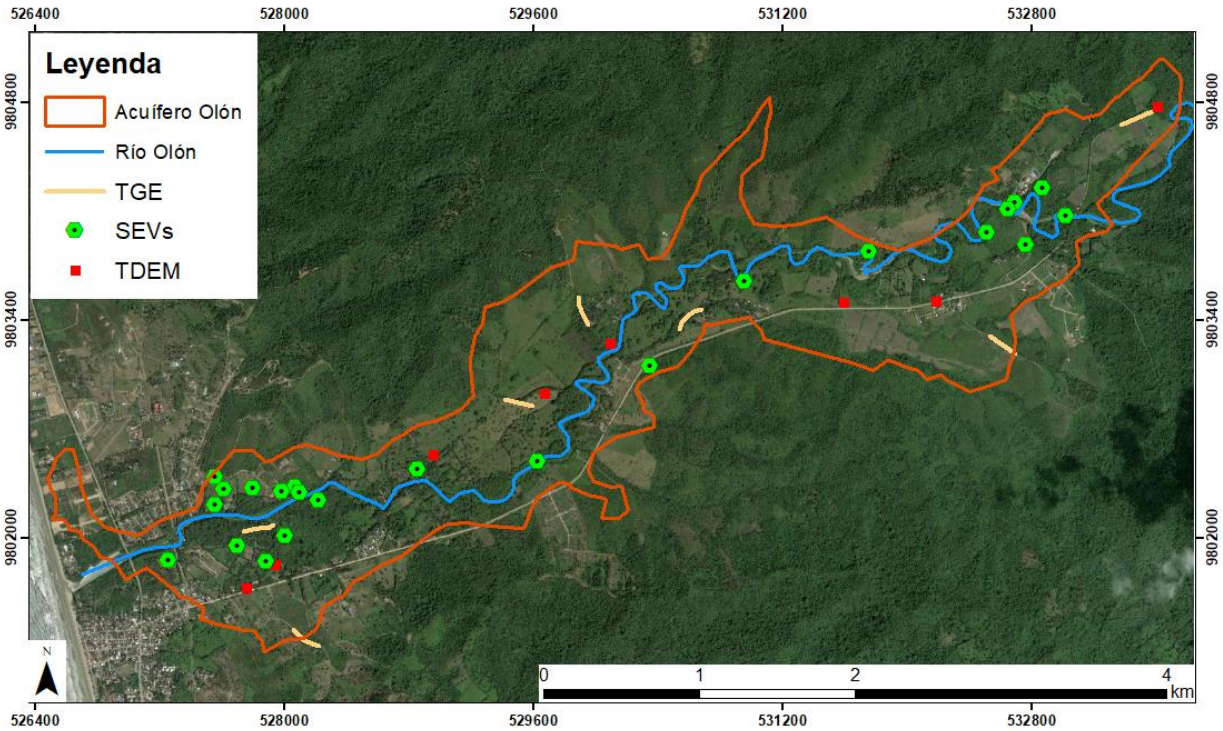


Tabla 9 Coordenadas de ubicación de los ensayos geoelectricos

Ensayo	X	Y	Profundidad
OL-01	527701.00	9801948.00	80.00
OL-02	527892.00	9801846.00	120.00
OL-03	528012.00	9802014.00	180.00
OL-04	528860.00	9802442.00	80.00
OL-05	529630.00	9802490.00	140.00
OL-06	530354.00	9803104.00	470.00
OL-07	530956.00	9803650.00	100.00
OL-08	531757.00	9803838.00	200.00
OL-09	532518.00	9803964.00	20.00
OL-10	533025.00	9804070.00	70.00
OL-11	532693.00	9804152.00	70.00
OL-12	532648.00	9804110.00	110.00
OL-13	532875.00	9804248.00	90.00
OL-14	532766.00	9803886.00	70.00
OL-15	527800.00	9802322.00	90.00
OL-30	527260.00	9801858.00	80.00
OL-31	528075.00	9802328.00	130.00
OL-32	528104.00	9802294.00	20.00
OL-33	527619.00	9802312.00	65.00

OL-34	527563.00	9802212.00	100.00
OL-36	527563.00	9802390.00	150.00
OL-37	527985.00	9802296.00	130.00
OL-38	528221.00	9802242.00	120.00
TDEM1	527763.00	9801677.00	110.00
TDEM2	530098.00	9803248.00	150.00
TDEM3	532189.00	9803518.00	40.00
TDEM4	533606.00	9804767.00	46.00
TDEM5	531597.00	9803510.00	50.00
TDEM6	527946.00	9801830.00	40.00
TDEM7	528957.00	9802537.00	45.00
TDEM8	529674.00	9802925.00	40.00
TG1-A	527783.33	9802054.59	43.00
TG1-B	527847.47	9802065.38	48.00
TG2-A	528115.42	9801354.24	40.00
TG3-A	530549.80	9803381.16	37.50
TG3-B	530604.55	9803438.35	37.00
TG3-C	530638.92	9803457.56	40.00
TG4-A	533382.42	9804661.88	40.00
TG4-B	533460.47	9804695.49	42.00
TG4-C	533520.00	9804721.41	43.00
TG5-A	529889.95	9803535.35	40.00
TG5-B	529892.33	9803515.50	38.00
TG5-C	529906.09	9803467.88	38.00
TG6-A	529424.59	9802885.75	40.00
TG6-B	529448.72	9802879.82	40.00
TG6-C	529571.06	9802853.36	39.00
TG7-A	532562.59	9803276.37	37.00
TG7-B	532660.81	9803207.37	37.00

A partir de estos datos se calculó la conductancia longitudinal y la resistencia transversal para el análisis de la capacidad de protección del acuífero. Adicional, se realizó una campaña en noviembre 2024 para el levantamiento de información en campo, complementando los datos de litología y nivel piezométrico del acuífero mediante cuatro TGE en zonas menos estudiadas ubicadas en la parte media y alta de la cuenca, esto permitió determinar los parámetros Depth, Aquifer media, Soil media, Impacto of vadose zone.

Datos del nivel estático de los pozos de agua

Se tomaron datos de los niveles estáticos de los 14 pozos dentro del área de estudio, el pozo 12 se encuentra en la comuna Las Núñez, fuera del acuífero Olón. La medición de datos se llevó a cabo con la colaboración de CIPAT y JASRAPO. Estos datos comprenden el año 2024 (ver

Tabla 10). A partir de estos datos se clasificaron los niveles freáticos según los rangos y valores del **parámetro D** del método DRASTIC.

Tabla 10 Nivel estático de los pozos en Olón 2024

Pozo	Seca					Lluviosa							
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1	8,56	8,06	8,84	8,90	7,94	9,02	8,75	8,70	8,80	9,12	8,52	9,06	
2a	9,05	8,34	9,13	9,10	7,70	8,95	8,77	8,85	9,22	9,10	9,1	9,31	
2b	9,19	8,36	9,19	9,28	7,70	9,10	8,92	8,92	9,24	9,24	9,25	9,40	
3	5,53	4,64	5,25	5,32	4,10	4,95	4,90	5,90	5,36	5,25	5,36	5,20	
4	6,65	5,93	6,45	6,05	4,88	5,88	5,70	5,80	6,13	5,88	5,93	5,29	
5	7,61	6,10	7,90	6,93	6,68	7,12	6,70	6,74	6,77	6,55	6,5	7,19	
6	8,50	7,94	8,80	8,73	7,75	8,87	8,65	8,70	9,00	8,91	9,04	9,01	
7	8,15	7,57	7,70	8,22	7,70	8,12	8,30	8,34	8,62	8,06	8,08	8,45	
8	8,11	7,70	9,02	8,30	8,12	7,92	8,00	8,11	7,95	7,88	7,9	8,27	
9	4,51	4,00	4,38	4,50	4,46	4,43	4,38	4,38	4,40	4,40	4,41	4,60	
10	3,49	3,92	3,58	3,45	3,13	3,75	3,65	4,10	4,04	4,08	4,11	4,39	
11	1,77	1,95	1,75	1,73	1,71	1,76	1,80	1,64	1,60	1,58	1,63	1,75	
13	8,00	7,25	7,95	7,80	6,59	7,65	7,40	7,60	7,80	7,69	7,67	7,86	
14	9,01	7,74	9,50	9,00	9,00	8,95	8,85	8,90	9,20	9,02	9,14	9,25	

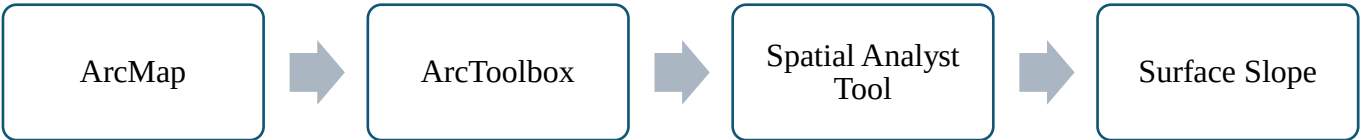
Nota. Datos obtenidos de campañas de CIPAT.

DEM y Precipitación

A partir del modelo de elevación digital (DEM) del acuífero de Olón, se generó un mapa de pendientes empleando el software ArcMap. Este análisis se realizó con una resolución espacial de 3x3 m, lo que garantiza un alto nivel de precisión en la representación de las características topográficas del terreno (ver **Figura 18**).

Posterior, se clasificó de acuerdo con los rangos y valores asignados establecidos en la clasificación del **parámetro R** para obtener la recarga (ver **Tabla 12**), y en los rangos del **parámetro T** del método DRASTIC (ver **Tabla 8**).

Figura 18 Pasos para hallar la pendiente



Las precipitaciones obtenidas de la NASA se muestran en la **Tabla 11**. Para la estación lluviosa (Enero–Abril) se considera una media mensual de 215.53 mm y para la estación seca (Mayo–Diciembre) un promedio de 29.96 mm, posterior se les asigna un factor de acuerdo con la **Tabla 12**.

Tabla 11 *Precipitaciones mensuales (mm) en Olón 2024*

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
496,00	296,28	51,35	18,47	10,87	9,71	29,24	33,84	23,85	73,18	23,93	35,06

Para obtener los valores de recarga se utilizó el método Piscopo (2001), también conocido como el método de balance hídrico en campo o *rainfall infiltration factor method*. Es una técnica simplificada que se utiliza para estimar la recarga de acuíferos, incorpora los componentes de pendiente, precipitación y permeabilidad del suelo, como en la **Ecuación (3.5)**.

$$\text{Recarga neta} = \text{pendiente (\%)} + \text{precipitación} + \text{permeabilidad del suelo} \quad (3.5)$$

Cada componente representa un valor asignado de acuerdo con el rango que pertenece, como se ve en la **Tabla 12**.

Tabla 12 *Rango de valores de los componentes de recarga neta*

Pendiente (%)		Precipitación (mm/mes)		Permeabilidad del suelo		Recarga neta (mm/mes)	
Rango	Factor	Rango	Factor	Rango	Factor	Rango	Factor
<2	4	>71	4	Alta	5	9.2 – 10.8	10
2 – 10	3	59 – 71	3	Moderada a alta	4	7.5 – 9.2	8
10 – 33	2	42 – 59	2	Moderada	3	5.8 – 7.5	5
>33	1	<42	1	Baja	2	4.2 – 5.8	3
				Muy baja	1	2.5 – 4.2	1

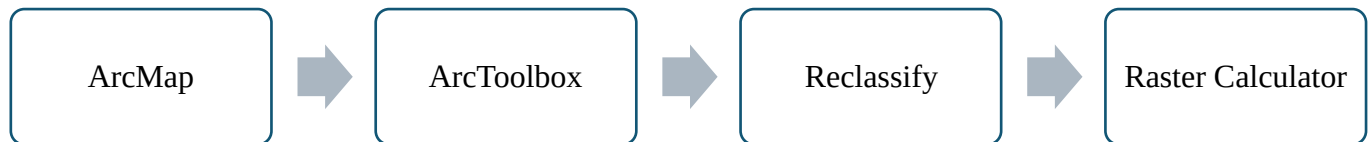
Nota. Modificado de Piscopo (2001).

Se obtuvieron los valores de pendiente a partir del DEM, los valores de precipitación mensuales de la base datos de la NASA. La permeabilidad del suelo se obtuvo a partir de ensayos de tasa de infiltración y se clasificaron según la norma alemana DIN 18130–1 (Hölting & Coldewey, 2019) (ver **Tabla 13**).

Tabla 13 Clasificación del coeficiente de permeabilidad según DIN 18130–1

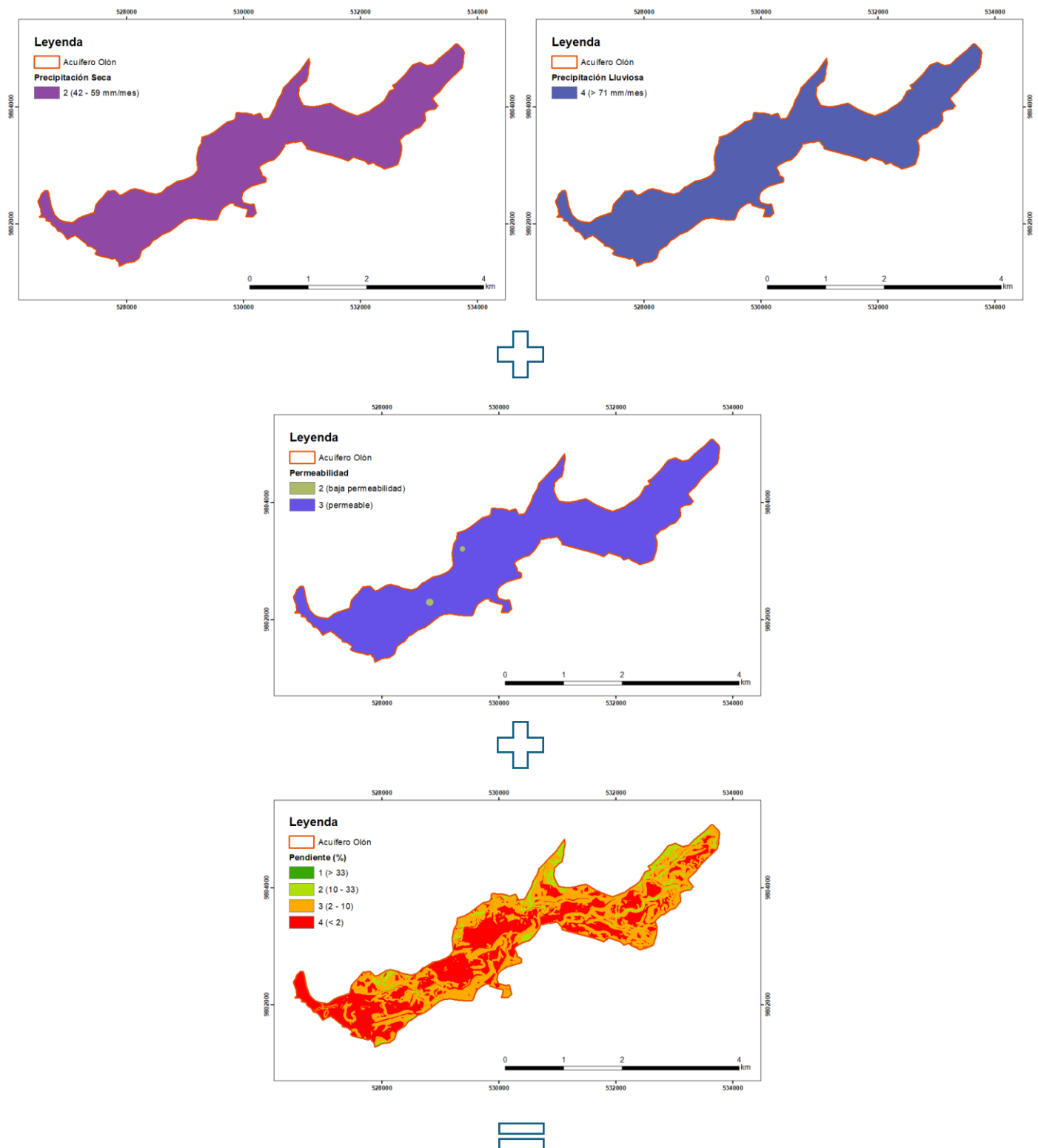
Clasificación	Conductividad hidráulica (k_f)
Muy alta permeabilidad	$> 10^{-2}$ m/s
Alta permeabilidad	$10^{-2} - 10^{-4}$ m/s
Permeable	$10^{-4} - 10^{-6}$ m/s
Baja permeabilidad	$10^{-6} - 10^{-8}$ m/s
Muy baja permeabilidad	$< 10^{-8}$ m/s

Se clasificaron los valores con la herramienta reclassify y posterior se realizó el cálculo de la recarga con la herramienta de Ráster Calculator (ver **Figura 19**).

Figura 19 Pasos en ArcMap para obtener la recarga

Los mapas generados para cada factor considerado en el cálculo de la recarga se muestran en la **Figura 20**. Los valores de precipitación son los únicos que varían en la época lluviosa y seca, la permeabilidad y pendiente se mantienen constantes para ambas épocas, ya que son propiedades intrínsecas que no dependen de las condiciones climáticas.

Figura 20 Pasos para obtener el parámetro de Recarga



Mapa de Recarga para época lluviosa y seca

3.1.4 Fase II: Levantamiento de información en campo

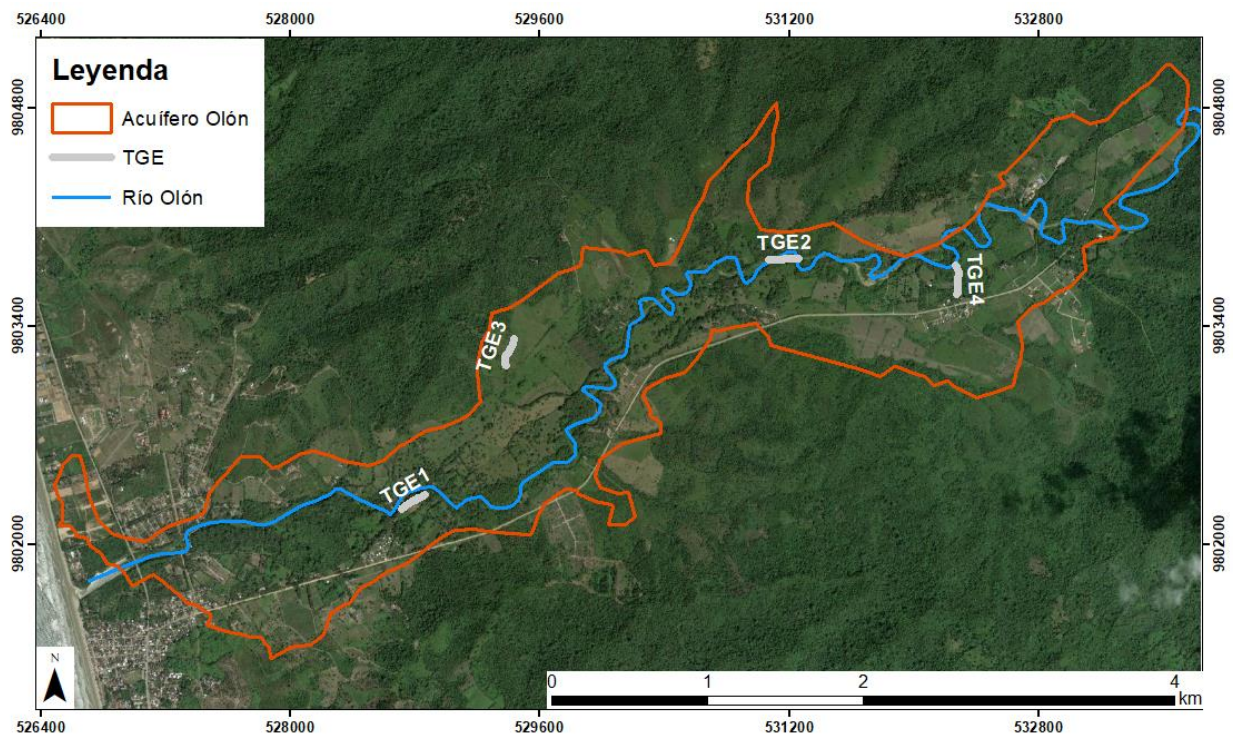
TGE

Se realizaron cuatro TGE adicionales (ver **Tabla 14**) para cubrir la parte media y alta del acuífero Olón (ver **Figura 21**).

Tabla 14 Ubicación geográfica de las TGE en coordenadas UTM

TGE	Punto inicial		Punto final	
	X	Y	X	Y
TGE 1	528706	9802229	528870	9802324
TGE 2	531261	9803832	531069	9803825
TGE 3	529402	9803237	529377	9803144
TGE 4	532275	9803604	532265	9803790

Figura 21 Mapa de ubicación de las TGE



Los ensayos se llevaron a cabo con el ABEM TERRAMETER LS2 en un arreglo tipo gradiente, debido a su mayor profundidad, con un factor de penetración de 19% (Molina et al., 2004) (ver **Tabla 15**).

Tabla 15 *Factor de penetración de los arreglos para TGE*

Arreglo	Factor de penetración
Wenner	16%
Schlumberger	19%
Gradiente	19%
Dipolo–Dipolo	22%

Nota. Tomado de Molina et al. (2004).

Se ubicaron los dos carretes de 100 m cada uno, a lo largo de una línea libre de vegetación y con presencia de suelo natural para ubicar los electrodos. Se colocaron 41 electrodos con espaciamiento de 5 m, conectados a los cables a través de lagartos de doble conexión, asegurando que se encuentren fijos en el suelo para una mejor inyección de corriente. Es recomendable verter agua en los electrodos especialmente si el terreno está muy seco para una mejor inyección de corriente.

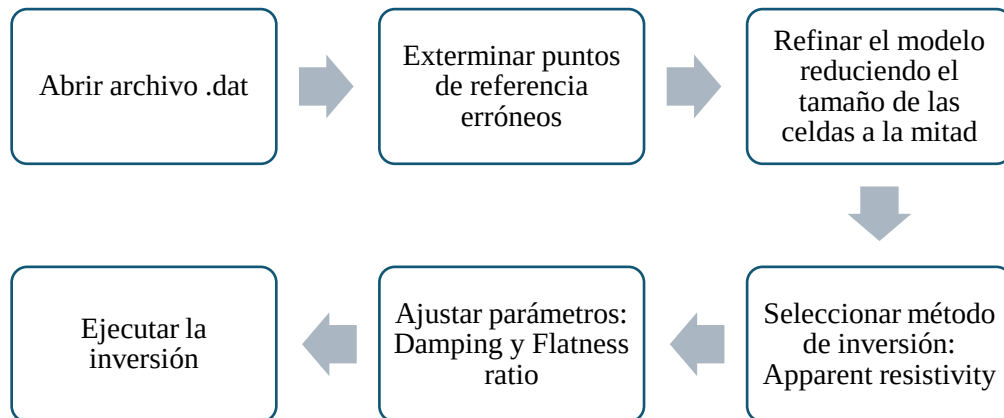
Finalmente, se configuró el equipo de medición para la toma de datos utilizando la configuración gradiente. El dispositivo realiza múltiples combinaciones de electrodos de potencial entre los electrodos de corriente fijos para las mediciones de resistividad (ver **Figura 22**).

Los datos obtenidos se descargaron del equipo en formato .dat para posteriormente procesarlos en el software RES2DINV (licencia CIPAT–ESPOL). En este programa se transformaron las resistividades aparentes medidas en un modelo de resistividades del subsuelo mediante un proceso de inversión matemática.

Figura 22 Arreglo de equipos para ensayos de TGE



Se agregó la topografía en los archivos de cada ensayo realizado. Una vez realizado este proceso, se cargaron los datos al programa y se realizó la inversión con el método *apparent resistivity* considerando de tamaño la mitad de las celdas, es decir 2.50 m de separación entre electrodos para minimizar el error de inversión. Para el primer ensayo TGE 1 se establecieron en los parámetros de inversión, un factor *damping* máximo de 0.35 y mínimo de 0.05, y la relación de *vertical-to-horizontal flatness filter* de 2.0 puesto que los datos contaban con mucho ruido y variación vertical (ver **Figura 23**). Para los demás ensayos se dejaron por defecto los del software *damping* máximo 0.30 y mínimo 0.03 y la relación de *vertical-to-horizontal flatness filter* de 1.0.

Figura 23 Proceso de inversión en RES2DINV

Con base a estudios anteriores de la zona se han establecido los siguientes rangos de resistividades (ver **Tabla 16**) de acuerdo con lo propuesto por Lozano & Márquez (2024); Montalván Toala, 2008. La unidad U II corresponden a la capa que contiene el agua subterránea compuesta de gravas y arenas en una matriz limosa.

Tabla 16 Caracterización litológica de resistividades

Unidad	Resistividad $\Omega \cdot m$	Interpretación	Color
U I	0–3	Limo, arcillas	Azul
U II	3–7	Gravas y arenas en matriz limosa	Celeste
U III	7–20	Arena	Amarillo
U IV	> 20	Arena y grava	Naranja–Rojo

Tasas de infiltración

La prueba de infiltración con el método del infiltrómetro de doble anillo, es una técnica común de medición en campo de la tasa de infiltración de agua en el suelo, desarrollada por Johnson (1963) para el USGS (acrónimo en inglés, United States Geological Survey).

Se utilizaron dos anillos de metal de diferentes diámetros (interno de 32 cm y externo de 58 cm) y un sistema de llenado de agua. Los anillos se insertaron parcialmente en el suelo. El anillo más grande se colocó alrededor del anillo más pequeño.

La profundidad de inserción debe ser suficiente (10 cm) para evitar la filtración lateral y minimizar el escape de agua por los bordes. Se colocó la boya en el anillo interno para medir la

variación del nivel de agua, y se fijó con una pieza que encaja con el anillo. Ambos anillos se llenaron con agua hasta que la boya tope con la pieza. Este primer llenado se realiza para saturar el suelo alrededor de los anillos y minimizar el efecto de absorción inicial (ver **Figura 24**).

Figura 24 *Ensayo de tasa de infiltración*



Posterior, se establecieron intervalos de tiempo cada 1, 2, 3, 4, 5, 10 y 15 minutos para medir el nivel de agua dentro del anillo interior y anotarlo en la ficha de datos (ver **Figura 25**).

La tasa de infiltración (en mm/h) se calculó a partir de la cantidad de agua que se repone en el anillo interior y del tiempo transcurrido. A medida que el suelo se satura, la tasa de infiltración se estabiliza en un valor casi constante, conocido como tasa de infiltración básica.

Figura 25 Formato de toma de datos para tasa de infiltración

	A	B	C	D	E	F	G
1	<u>Prueba de campo del infiltrómetro de doble anillo</u>						Código:
2	<u>(Double-Ring Infiltrometer Field Test)</u>						
3	<u>Datos generales</u>				<u>Características del sitio</u>		
4	Lugar:				Condiciones del suelo:		
5					Suelo removido:		
6	Fecha:				Última precipitación:		
7	<u>Coordenadas</u>				<u>Características del equipo</u>		
8	X:				Anillo interno usado: Grande (32 cm)		
9	Y:				Anillo externo usado: Grande (58 cm)		
10	Zona:						
11	Datos en campo				Datos calculados		
12	Lectura	Tiempo [min.]	Nivel de agua [cm]	Infiltración [mm]	Infiltración acumulada[mm]	Tasa de infiltración [mm/min]	Tasa de infiltración [mm/hora]
13	inicial	0	23,2	-	-	-	-
14	23,2	1	23,1	A14-C14	D14	D14/(B14-B13)	F14*60

El **método de Kostiakov** (1932) es un modelo empírico utilizado para describir la infiltración básica de agua en el suelo. Este método permite calcular la infiltración básica a partir de la tasa de infiltración acumulada y de infiltración instantánea. La infiltración básica es equivalente al coeficiente de permeabilidad.

La infiltración acumulada se halla con la **Ecuación (3.1)**. Cada variable se obtuvo de la gráfica de tendencia tipo potencia de la de infiltración acumulada vs tiempo. Siendo A el valor que acompaña a x, y B el exponente de la ecuación de la recta.

$$I = A \cdot t^B \rightarrow y = A \cdot x^B \quad (3.1)$$

A partir de los valores de A y B, se determinó la ecuación de la tasa de infiltración instantánea (i) **Ecuación (3.2)**:

$$i = a \cdot t^b \quad (3.2)$$

Siendo, $a = A \cdot B$ y $b = B - 1$

La fórmula de tiempo de estabilización [min] se presenta en la **Ecuación (3.3)**:

$$tb = -600 \cdot b \quad (3.3)$$

Finalmente, la infiltración básica se calcula con la variable a y b de la infiltración instantánea y el tiempo de estabilización, la fórmula se muestra en la **Ecuación (3.4)**:

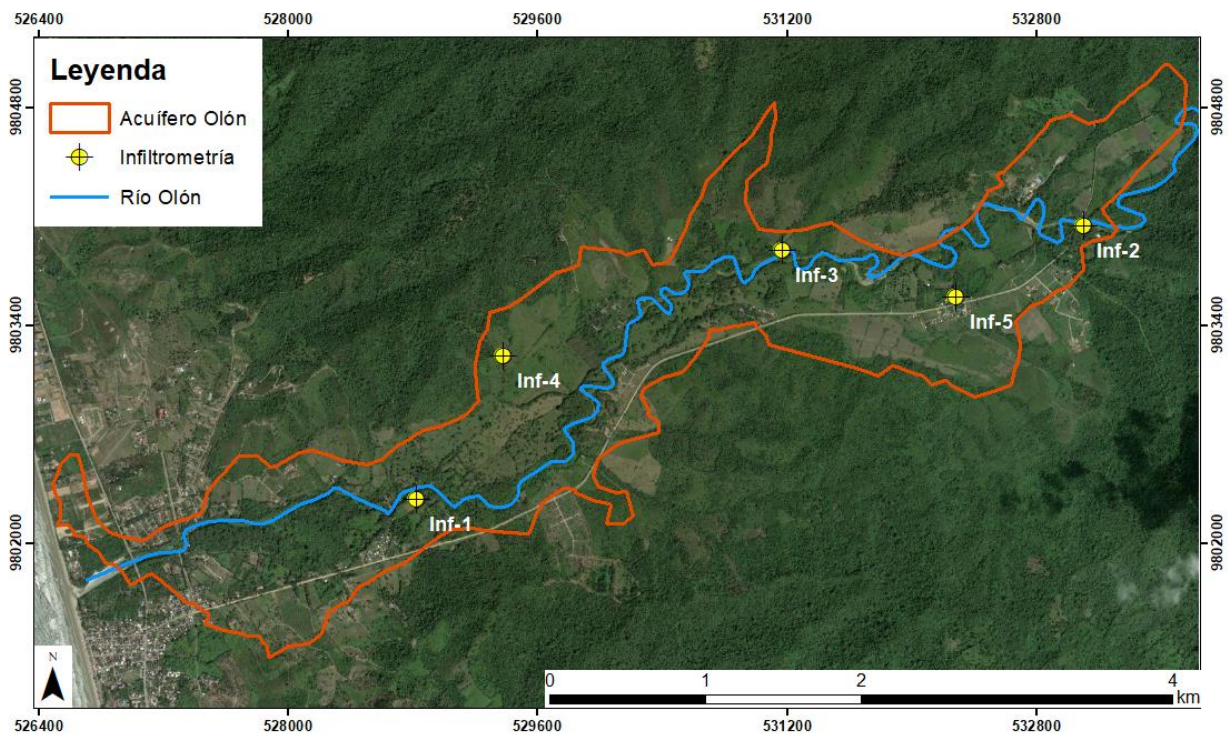
$$I(b) = a \cdot tb^b \quad (3.4)$$

Se realizaron cinco ensayos de infiltración (ver **Tabla 17**) para determinar la conductividad hidráulica correspondiente al **parámetro C** del índice DRASTIC. Los ensayos se realizaron en puntos de variación litológica en la parte baja, media y alta del acuífero (ver **Figura 26**).

Tabla 17 Ubicación geográfica de ensayos de infiltración en coordenadas UTM

Ensayo	X	Y
Inf-1	528811	9802288
Inf-2	533111	9804052
Inf-3	531163	9803890
Inf-4	529377	9803207
Inf-5	532278	9803588

Figura 26 Mapa de ubicación de ensayos de infiltración



3.1.5 Fase III: Evaluación sostenible de vulnerabilidad

3.1.5.1 Método DRASTIC.

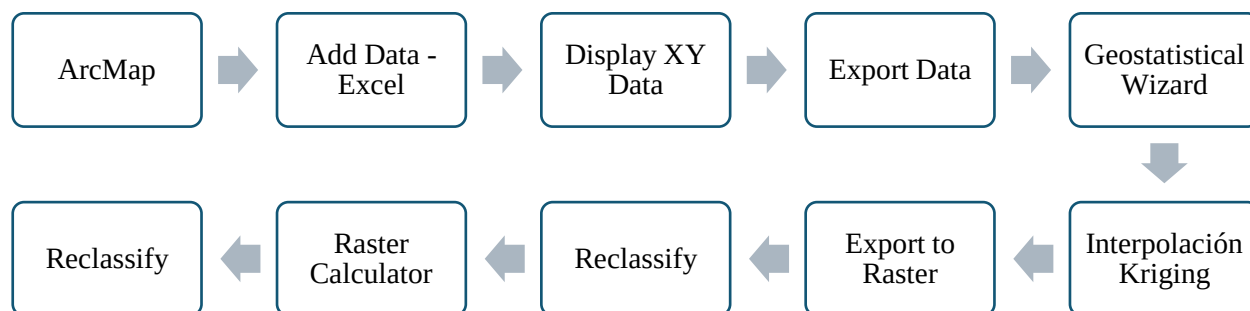
Para el cálculo del índice de vulnerabilidad DRASTIC para la época lluviosa y seca, se cargaron en ArcMap los puntos espaciales con la información correspondiente a cada parámetro mencionado anteriormente. Posterior, se realizó la interpolación de cada parámetro con el método kriging, siendo el kriging cuantil y gaussiano el menos sesgado (Reed et al., 2004). Se realizó la reclasificación de acuerdo con los rangos establecidos de la **Tabla 8**. Una vez establecida la clasificación de cada parámetro, se procedió a realizar el cálculo del índice con la **Ecuación (1.1)** utilizando la herramienta Raster Calculator. Finalmente, se asignó el nivel de vulnerabilidad de acuerdo con la **Tabla 18**.

Tabla 18 Clasificación de la vulnerabilidad del índice DRASTIC

Índice DRASTIC	Vulnerabilidad
<79	Mínima
80–99	Muy baja
100–119	Baja
120–139	Media baja
140–159	Media alta
160–179	Alta
180–199	Muy alta
>200	Extrema

Nota. Modificado de Aller et al. (1987).

Los pasos que se utilizaron para determinar el índice DRASTIC se muestran en la **Figura 27**.

Figura 27 Pasos en ArcMap para determinar el índice de vulnerabilidad DRASTIC

3.1.5.2 Parámetros Dar Zarrouk.

Se obtuvieron los valores de conductancia longitudinal a partir de las resistividades y espesores de las geocapas que yacen por encima de la capa de agua subterránea (acuífero), detectadas en los ensayos geofísicos (ver **Anexos–Tabla 23**). Los valores se calcularon con las fórmulas correspondientes de la Ecuación (1.2) y se realizó la clasificación según los rangos de conductancia longitudinal (ver **Tabla 19**).

Tabla 19 Clasificación de conductancia longitudinal

Rango	Clasificación
> 10mhos	Excelente protección del acuífero
5–10 mhos	Muy buena protección del acuífero
0,7–4,9 mhos	Buena protección del acuífero
0,2–0,69	Moderada protección del acuífero
0,1–0,19	Débil protección del acuífero
< 0.1 mhos	Pobre protección del acuífero

3.1.5.3 Propuesta de Sostenibilidad

Para la propuesta de esquema de sostenibilidad se evalúan los factores ECSE de acuerdo con los indicadores de los ODS que se alineen a cada factor (ver **Tabla 20**). La evaluación se realiza a partir de la situación actual de la gestión hídrica por parte de la JASRAPO y el contexto ambiental de la zona.

Tabla 20 *Indicadores alineados a factores ECSE*

Factor	Indicador
Económico	6.1.1 Proporción de la población que utiliza servicios de suministro de agua potable gestionados sin riesgos.
	6.4.2 Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles.
	12.2.1 Huella material en términos absolutos, huella material per cápita y huella material por PIB.
	11.4.1 Total de gastos (públicos y privados) per cápita destinados a la preservación, protección y conservación de todo el patrimonio cultural y natural.
	6.4.1 Cambio en el uso eficiente de los recursos hídricos con el paso del tiempo.
Cultural	6.b.1 Proporción de dependencias administrativas locales que han establecido políticas y procedimientos operacionales para la participación de las comunidades locales en la gestión del agua y el saneamiento.
	11.4.1 Total de gastos (públicos y privados) per cápita destinados a la preservación, protección y conservación de todo el patrimonio cultural y natural.
	12.b.1 Número de estrategias o políticas de turismo sostenible y de planes de acción aplicados que incluyen instrumentos de seguimiento y evaluación convenidos.
Social	1.4.1 Proporción de la población que vive en hogares con acceso a los servicios básicos.
	6.1.1 Proporción de la población que utiliza servicios de suministro de agua potable gestionados sin riesgos.
	6.4.1 Cambio en el uso eficiente de los recursos hídricos con el paso del tiempo.
Ecológico	6.3.2 Proporción de masas de agua de buena calidad.
	6.6.1 Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo.
	15.1.2 Proporción de lugares importantes para la biodiversidad terrestre y del agua dulce incluidos en zonas protegidas, desglosada por tipo de ecosistema.

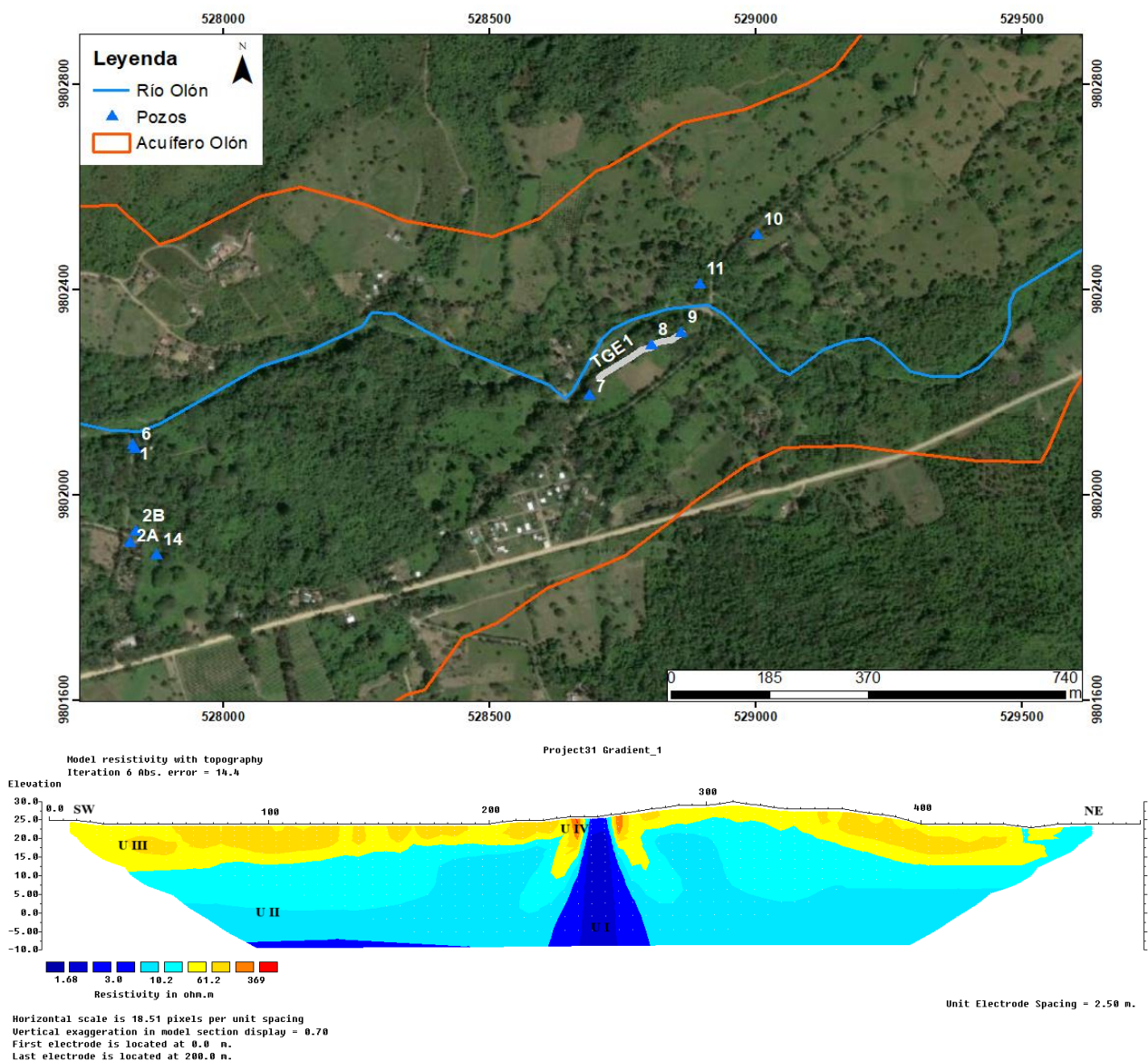
Capítulo 4

4.1 Resultados

4.1.1 Perfiles de TGE

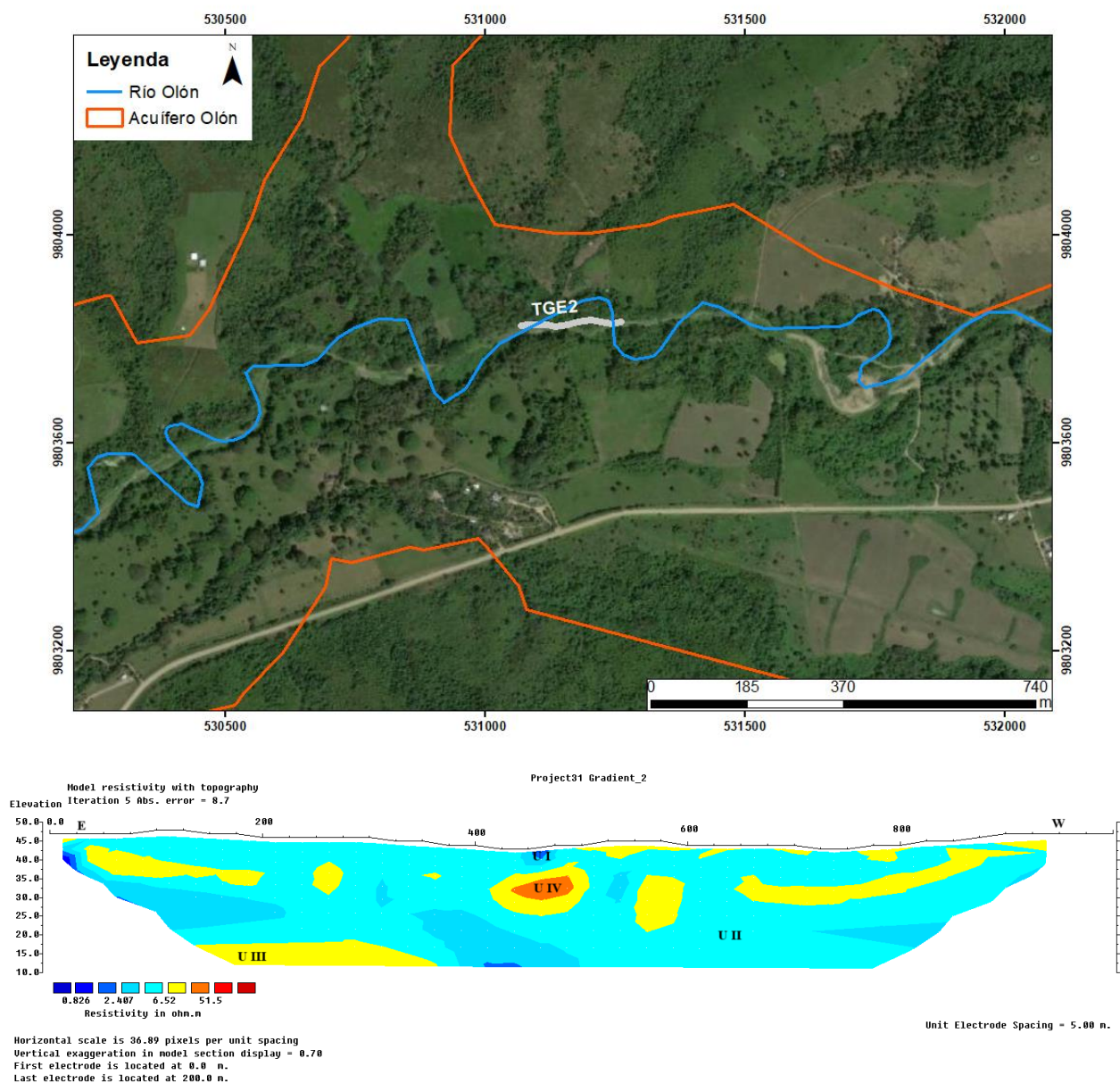
Se distinguieron cuatro unidades geológicas en cada ensayo. Para la TGE 1 (ver **Figura 28**) se diferencia una capa superficial (U III) de arena con espesores entre 4–12 m con resistividades de 12–21 $\Omega \cdot m$. Por debajo de este material, se encuentra una capa de alrededor de 20 m con valores de 5–8 $\Omega \cdot m$ correspondiente a la capa que contiene el agua subterránea (U II). En el centro del ensayo se visualiza una anomalía cónica de resistividades bajas (U I), esto se debe a la cercanía al pozo 8 y el material que constituye la estructura.

Figura 28 Perfil de resistividades para TGE 1



En la TGE 2 (ver **Figura 29**) se distingue una predominancia de la U II con resistividades entre $3\text{--}7\ \Omega\cdot\text{m}$ que corresponde a gravas y arenas en matriz limosa, con algunos lentes de arena (U III) distribuidos por el acuífero y un lente de arena y grava (U IV) con resistividades mayores a $30\ \Omega\cdot\text{m}$ en el centro del ensayo. Cabe recalcar, que el ensayo fue realizado adyacente al canal del río.

Figura 29 Perfil de resistividades para TGE 2

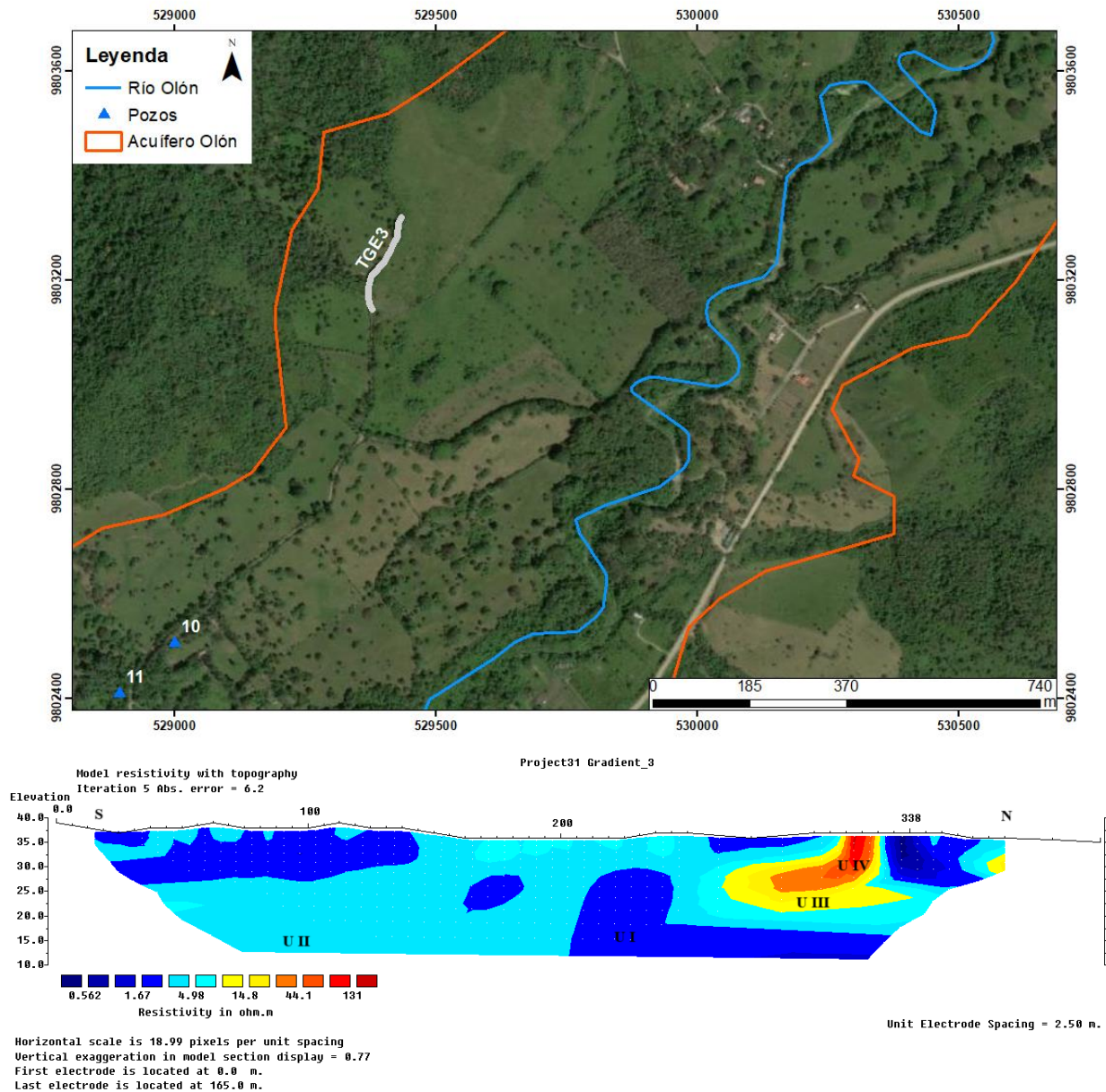


En la TGE 3 (ver **Figura 30**) la capa superior correspondiente a limos y arcillas (U I) se encuentra en el flanco Sur del ensayo con espesores variables de 5–10 m, mientras que en el flanco

Norte se presenta un lente de arena y grava (U III–U IV) con resistividades superiores a $13 \Omega \cdot \text{m}$.

El agua subterránea se halla en la U II, con resistividades entre $4\text{--}6 \Omega \cdot \text{m}$.

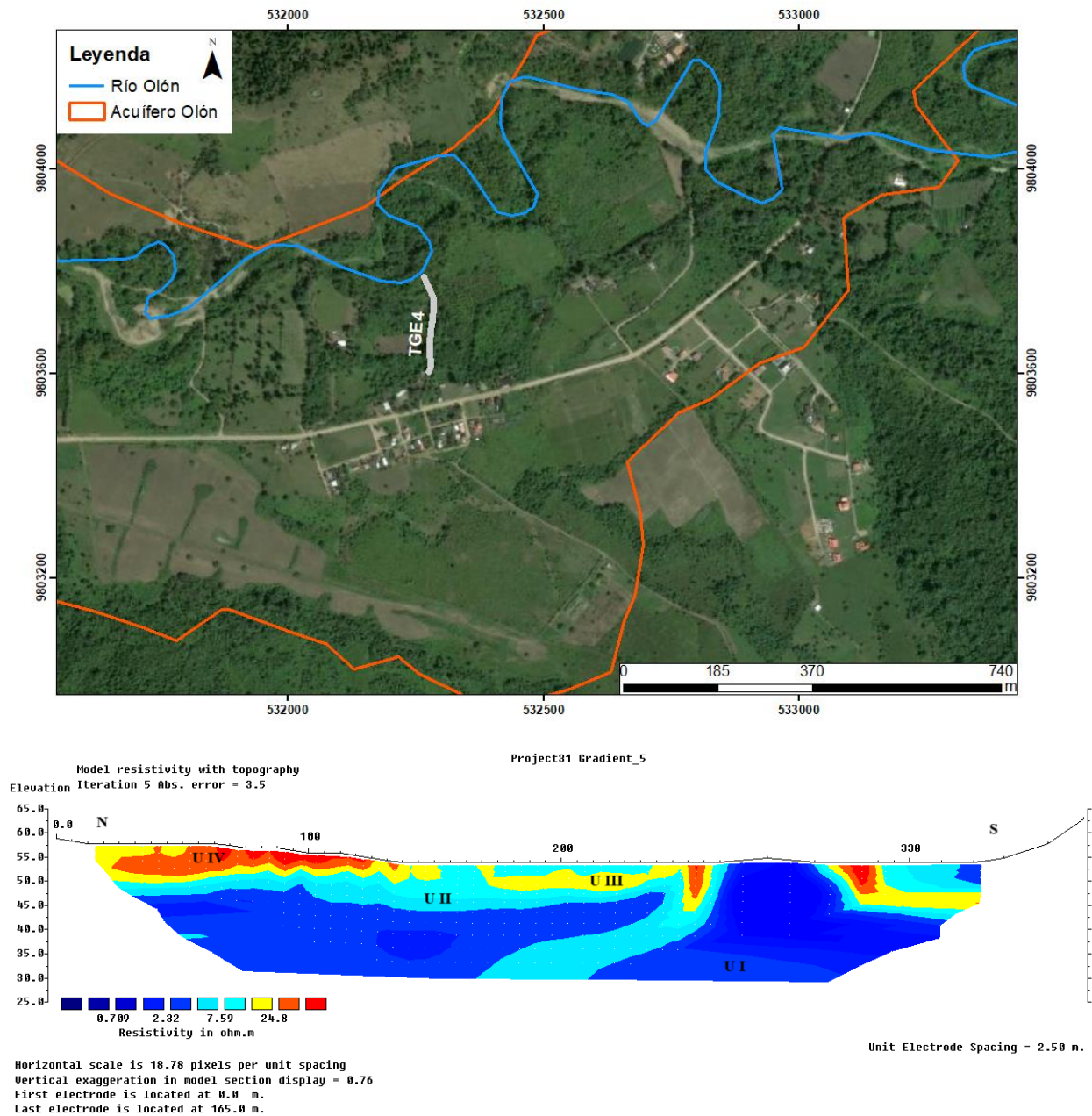
Figura 30 Perfil de resistividades para TGE 3



Finalmente, la TGE 4 (ver **Figura 31**) presenta una capa superficial de arena (U III) con arena y grava (U IV) en el flanco Norte del ensayo y en el flanco Sur con menor extensión. Esta capa tiene espesores de $4\text{--}8 \text{ m}$ y resistividades superiores a $16 \Omega \cdot \text{m}$. La capa que comprende el agua subterránea tiene espesores menores de alrededor de 5 m y resistividades de $5\text{--}8 \Omega \cdot \text{m}$. Por

debajo de esta, subyace la U I con resistividades bajas menores a $4 \Omega \cdot m$, correspondiente a limos y arcillas.

Figura 31 Perfil de resistividades para TGE 4



4.1.2 Tasas de infiltración

Los resultados de los ensayos de infiltración se muestran en la **Tabla 21**. El ensayo Inf-1 presenta un valor bajo, lo que indica que el material tiene una baja permeabilidad al agua, es decir, el agua fluye lentamente a través de este material. En el Inf-2 el valor es mucho más alto, lo que

indica una alta permeabilidad, es decir, el agua pasa rápidamente a través de este material, lo que podría ser un indicativo de un suelo o sustrato muy permeable. El Inf-3 es similar a Inf-2, este valor es muy alto, indicando una alta capacidad de paso del agua, probablemente debido a un material muy poroso. El Inf-4 representa una permeabilidad moderada, mostrando un equilibrio entre lentitud y rapidez en el flujo del agua. Y el Inf-5 es un valor intermedio, que indica una permeabilidad moderada a alta.

Tabla 21 Resultados de permeabilidad

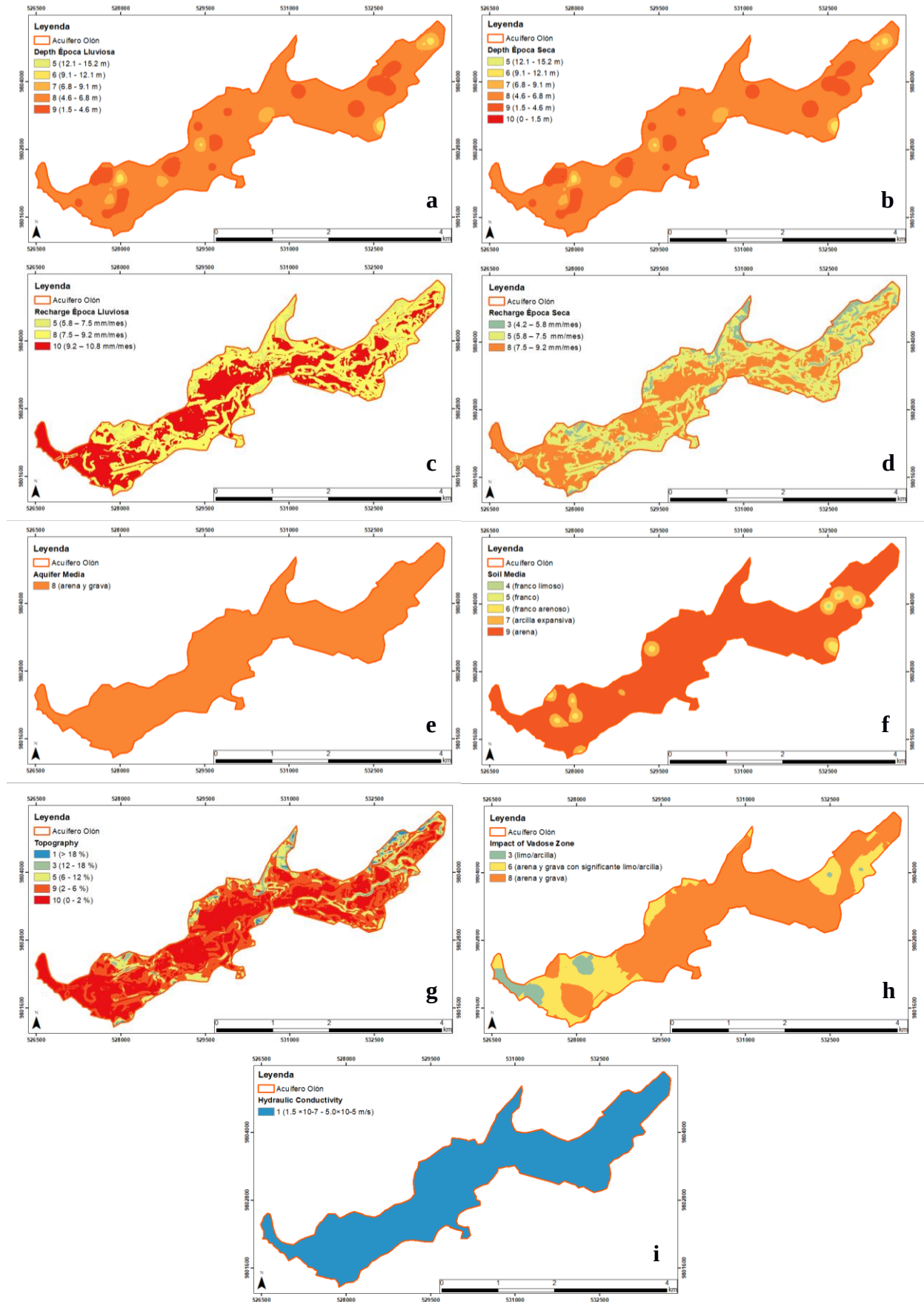
Ensayo	Permeabilidad	
	mm/h	m/d
Inf-1	0.30	0.0072
Inf-2	38.80	0.9312
Inf-3	88.50	2.1240
Inf-4	1.20	0.0288
Inf-5	8.40	0.2016

4.1.3 Índice DRASTIC

Los mapas generados de los parámetros de Depth y Recharge difieren en la época lluviosa y seca, al presentar influencia de las condiciones climáticas. No se visualiza variación en el parámetro de Depth en ambas estaciones (**Figura 32 a-b**). Sin embargo, en el parámetro de Recharge, para la época lluviosa predomina una mayor recarga con una clasificación de DRASTIC de 10 (0.92 – 1.08 cm/mes) en la parte baja y media del aluvial (**Figura 32 c**), mientras que en la época seca tiene un valor de 8 (0.75 – 0.92 cm/mes) para esta misma zona, debido a su permeabilidad media y baja pendiente (**Figura 32 d**).

El Acuífero media corresponde a arena y grava, que es la litología de la capa que almacena el agua subterránea (**Figura 32 e**). El suelo media, se trata de la capa más superficial sobre el acuífero y demuestra una predominancia en arena, ciertas zonas arcillosas y limo arenoso (ver **Figura 32 f**).

Figura 32 Mapas de parámetros DRASTIC para época lluviosa y seca

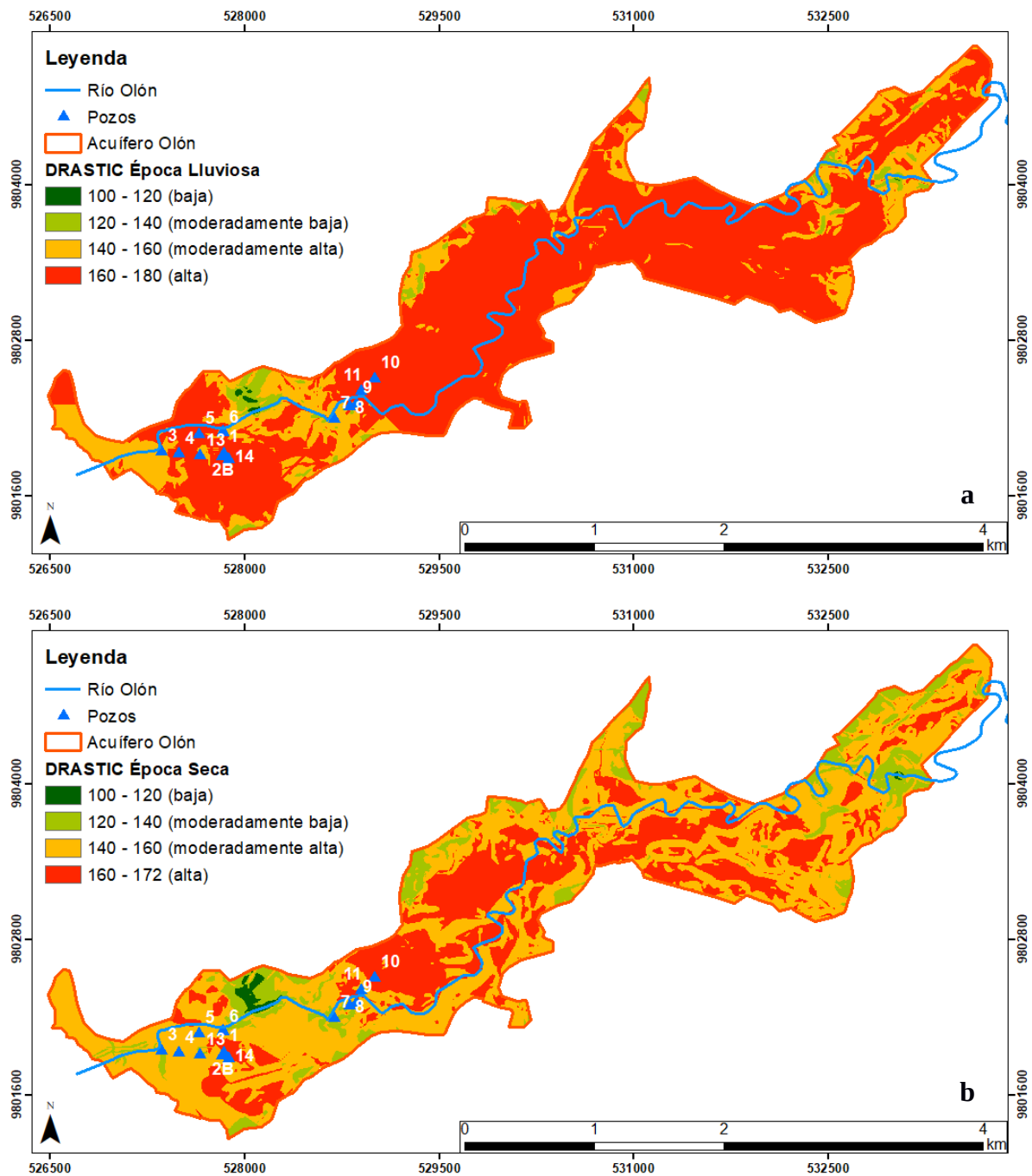


La topografía predominante corresponde a pendientes bajas de 0–6%, y hacia el norte en la parte alta del aluvial se ven pendientes de mayores a 6% (ver **Figura 32 g**). La zona vadosa está mayormente representada por arena y grava en la parte media y alta del aluvial, mientras que en la parte baja arena y grava con limos y arcillas (ver **Figura 32 h**). La conductividad obtenida de los ensayos de infiltración es baja, dentro del rango 1.5×10^{-7} – 5.0×10^{-5} , con un valor asignado de 1 (ver **Figura 32 i**).

El índice de vulnerabilidad DRASTIC obtenido para la época lluviosa (ver **Figura 33 a**) es alto (zonas rojas) en el 73 % del área del acuífero, lo que sugiere una alta susceptibilidad a la contaminación en la época de lluvias, debido a la alta recarga por las intensas precipitaciones y por su relieve muy bajo (0–2%). Existen zonas menores en donde la vulnerabilidad es moderadamente alta (zonas naranjas). Y pequeñas áreas dispersas que ocupan el 4% del territorio, en categoría de baja (verde) y moderadamente baja (amarillo) vulnerabilidad, indicando una mejor protección natural, estas zonas presentan una baja topografía (6–12%), una zona vadosa compuesta principalmente de limo/arcilla y una recarga media baja. De manera general, el bajo nivel freático, la alta permeabilidad del suelo y la baja pendiente incrementan la vulnerabilidad del acuífero Olón a la contaminación. Todos los pozos se encuentran dentro de esta categoría, a excepción del pozo 7 que se encuentra en un área moderadamente alta.

Por otro lado, el índice DRASTIC para la época seca (ver **Figura 33 b**) presenta una vulnerabilidad moderadamente alta (zonas amarillas) en el 58% del territorio del aluvial, particularmente en la parte baja y alta de la cuenca, mientras que, la parte media presenta áreas dispersas (29% del área total) con valores de vulnerabilidad alta (zonas rojas). Los pozos se hallan en la categoría moderadamente alta, a excepción del pozo 10, que se encuentra en una zona de baja vulnerabilidad.

Figura 33 Índice de vulnerabilidad DRASTIC para época lluviosa y seca 2024

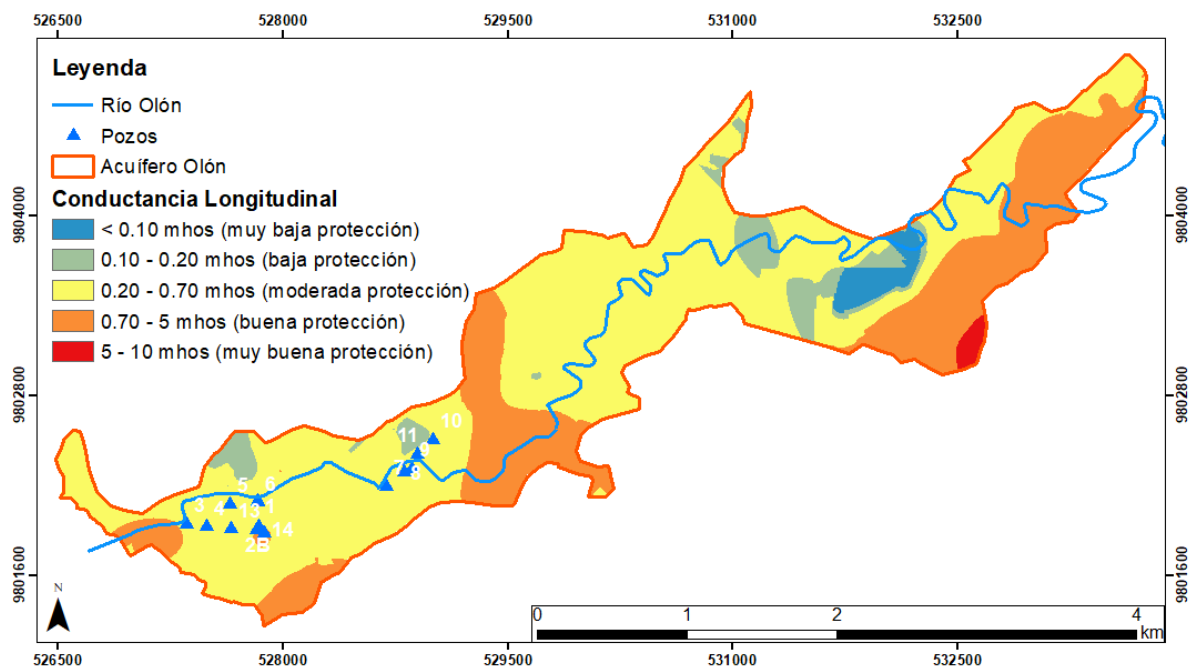


4.1.4 Parámetros Dar Zarrouk

El mapa de conductancia longitudinal para la determinación de la capacidad de protección del acuífero se presenta en la **Figura 34**. El 74% del aluvial, sobretodo la parte baja y media, se ve representada por una capacidad protectora moderada (0.20–0.70 mhos), mientras que el 8% está representado por pequeñas zonas con baja y muy baja capacidad protectora en la parte baja y alta

del aluvial (color azul y verde). En la parte media y alta del aluvial se observa una franja naranja con buena capacidad protectora (0.70–5 mhos). La mayoría de los pozos están ubicados en zonas de moderada vulnerabilidad, a excepción de los pozos 2A, 2B, 14 se encuentran en una zona de buena protección, favorable para minimizar la entrada de contaminantes.

Figura 34 *Mapa de Conductancia Longitudinal*



4.1.5 Planteamiento de estrategias de sostenibilidad

La gestión hídrica en Olón ha sido administrada por la JASRAPO desde 1982. Además, se han implementado prácticas ancestrales, como las albarradas y tapes para fortalecer la recarga artificial y, por ende, el suministro de agua. Estas técnicas tradicionales contribuyen a la conservación y manejo sostenible del recurso hídrico en la región.

La participación activa de la comunidad en la gestión del agua ha permitido un manejo más eficiente y sostenible del recurso, adaptándose a las condiciones locales y promoviendo la resiliencia frente a desafíos ambientales. Las estrategias planteadas para cada factor alineados a los indicadores ODS, se resumen en la **Tabla 22**.

Tabla 22 Estrategias de sostenibilidad para la gestión hídrica en Olón

Factor	ODS	Estado	Estrategias
Económico	6.1.1	Campañas de muestreo, datos hidroquímico de pozos con multiparamétrico.	Realizar estudios hidroquímicos de iones mayoritarios e isótopos para el análisis de procedencia.
	6.4.2	Propuesta de implementación de filtros verdes para tratamiento de aguas residuales.	Implementar una parcela experimental para la depuración de agua.
	12.2.1	Proyectos de vinculación con los estudiantes de ingeniería agrícola de la ESPOL para capacitar a los pequeños agricultores de Olón.	Diseñar módulos de capacitación enfocados en el uso eficiente del agua, manejo de suelos, innovación tecnológica y adaptación al cambio climático.
	11.4.1	Presupuesto parcial destinado a la mejora de servicio de agua potable.	Priorizar presupuestos públicos para proyectos de restauración ecológica.
Cultural	6.b.1	Capacitaciones y actividades dinámicas a la junta administradora de agua de Olón y la comunidad local.	Realizar al menos tres capacitaciones enfocadas en resultados de análisis hidrogeológicos para la toma de decisiones.
	6.4.1	Campañas educativas que promueven el ahorro de agua en actividades domésticas y comunitarias.	Realizar talleres prácticos en las escuelas y comunidad local para fortalecer la concientización ambiental.
	11.4.1	Aplicación de soluciones basadas en la naturaleza como tapes y diques artesanales como reservorio de agua superficial que mejore la recarga del acuífero costero (Morante-Carballo et al., 2024).	Buscar apoyo de las organizaciones gubernamentales para la construcción del dique de hormigón.
	12.b.1	Esterillo Oloncito, parte de la cordillera Chongón-Colonche fue declarado bosque protector en el 2001.	Diseñar y promover rutas ecológicas y actividades turísticas que respeten los límites de carga ambiental.
Social	1.4.1	Existen 10,480 usuarios permanentes y 11,000 población flotante (temporada de playa).	Identificar y priorizar comunidades vulnerables para intervenciones de infraestructura hídrica.
Ecológico	6.3.2	Esterillo Oloncito, parte de la cordillera Chongón-Colonche fue declarado bosque protector en el 2001.	Elaborar un plan de manejo ambiental que regule el acceso y uso de material aluvial del río Olón mediante normativas estrictas.

6.6.1	El tipo de vegetación presente en esta zona incluye bosque en transición y bosque húmedo. Cultivos de ciclo corto: maíz y caña guadua.	Establecer programas de reforestación con especies nativas en zonas de recarga del acuífero.
15.1.2	Esterillo Oloncito, parte de la cordillera Chongón-Colonche fue declarado bosque protector en el 2001.	Realizar estudios de vulnerabilidad ambiental para la identificación de áreas críticas y el planteamiento de estrategias de mitigación.

4.2 Discusión

El acuífero presenta de manera general una moderada protección, de acuerdo con los resultados obtenidos de conductancia longitudinal. Y para ambas estaciones climáticas presenta una vulnerabilidad moderadamente alta a alta, lo cual se resume a una alta susceptibilidad de contaminación en el acuífero ante actividades que pongan en riesgo la calidad de agua de la zona.

Alrededor del 73% del acuífero presenta alta vulnerabilidad durante la temporada lluviosa (ver **Figura 33 a**), en donde el riesgo de contaminación es mayor. La alta vulnerabilidad en esta zona se debe principalmente a tres parámetros:

- Los niveles freáticos someros tienen el mayor peso (5) en el análisis DRASTIC. Las profundidades rodean los 4.6–1.5 m en la mayoría del territorio. Por lo tanto, los contaminantes deben recorrer una menor distancia para alcanzar el agua subterránea y dispersarse. Durante la época lluviosa, el nivel freático suele elevarse, lo que aumenta el riesgo de infiltración de contaminantes.
- La zona vadosa con un peso de 5, está representada en gran parte del acuífero por arena y grava, lo que incrementa la permeabilidad y permite un rápido movimiento vertical del agua debido a la gran cantidad de espacios porosos interconectados. Esto facilita una rápida infiltración de agua de lluvia o agua superficial que pueda arrastrar contaminantes.

- La recarga, el segundo parámetro con mayor peso (4), va desde los 7.5–10.8 mm/mes, indicando una alta y muy alta vulnerabilidad al ser el medio de transporte de posibles contaminantes.

Durante la época lluviosa todos los pozos se encuentran dentro la categoría de alta vulnerabilidad, menos el pozo 7 que posee un nivel freático de (6.8–9.1 m), una topografía de 6–12 % y una recarga media.

Durante la época seca, el 58% del aluvial presente una vulnerabilidad moderadamente alta, el 29% alta y el 11% moderadamente baja. Los niveles de profundidad del acuífero no cambian significativamente, no obstante, la recarga disminuye por las bajas precipitaciones registradas durante ese período con una media mensual de 42–59 mm. Los parámetros que influyen en este resultado son:

- Recarga media a alta con valores de 5.8–9.2 mm/mes. El flujo de agua podría no ser suficiente para diluir los contaminantes en caso de una infiltración de sustancias peligrosas. Además, si la recarga es media, la interacción entre el agua dulce y el agua salada podría generar un frente salino que afecte la calidad del agua subterránea, especialmente en áreas cercanas a la costa.
- Litología permeable en la capa superficial de arena, y una zona vadosa de arena y grava, lo cual no representa una gran capacidad de atenuación y restricción de migración de materiales, en consecuente favorece el movimiento de contaminantes.

Durante la época seca los pozos se enfrentan a una vulnerabilidad moderadamente alta, solamente el pozo 10 se encuentra en una zona de alta vulnerabilidad, ya que posee una recarga media alta (7.5–9.2 mm/mes), se encuentra en una zona vadosa de arena y grava, y un relieve muy bajo (0–2 %).

Para ambas estaciones el parámetro de conductividad hidráulica es bajo 1.5×10^{-7} – 5.0×10^{-5} m/s, por lo tanto, la tasa de flujo de material contaminante dentro del sistema de aguas subterráneas

es lenta, de este modo, les da más tiempo para ser atenuados por procesos naturales como la absorción o la degradación en zonas con capa superficial relacionadas a limos y arcillas. Si la recarga es alta pero la conductividad hidráulica es baja, los contaminantes tardarán más en infiltrarse y propagarse. Sin embargo, en zonas con nivel freático superficial (baja profundidad), incluso con baja conductividad, el acuífero podría ser vulnerable porque los contaminantes tienen un acceso más directo al agua subterránea, tal como ocurre en el acuífero Olón.

Durante la época lluviosa las zonas de alta vulnerabilidad poseen en su mayoría una moderada protección, lo que significa que el acuífero debe ser protegido ya que es más susceptible a la contaminación. En la época seca, ocurre lo mismo para las zonas de alta vulnerabilidad, mientras que las zonas de moderadamente alta se distribuyen en áreas de moderada protección y buena protección en la parte alta del aluvial.

Las estrategias de sostenibilidad propuestas se basan en técnicas aplicadas en zonas similares como la implementación de parcelas de filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales, de modo que se puedan usar las aguas residuales tratadas en la silvicultura y la restauración de áreas verdes (Carrión-Mero, Solórzano, et al., 2024). También está, la búsqueda de apoyo para la construcción de diques de hormigón con la finalidad de retener el agua del río y utilizada durante más meses del año (Carrión-Mero et al., 2023), ya que brinda estabilidad en el tiempo (Carrión-Mero, Briones-Bitar, et al., 2023). La capacitación a los agricultores para el uso eficiente del agua y la aplicación de técnicas sostenibles. La realización de talleres prácticos enfocados en la concientización sobre el consumo del agua, el diseño de rutas ecológicas que respeten los límites de carga ambiental y la elaboración de un plan de manejo ambiental para la protección del ecosistema.

Impulsar enfoques sostenibles en las actividades industriales, agrícolas y urbanas es fundamental para proteger el ciclo de las aguas subterráneas y los ecosistemas hídricos asociados, como ríos, lagos y lagunas (Herrera-Franco et al., 2022).

El estudio realizado por Zghibi et al. (2016) en un acuífero costero en Túnez presenta condiciones similares al presentarse un nivel del acuífero somero, recarga media a alta y zona vadosa conformada por arena y grava, por otro lado, la topografía es más pronunciada que Olón y el medio de acuífero es de arenoso–arenisca. Los resultados obtenidos en este estudio dan una vulnerabilidad moderadamente alta a alta, muy similar a los resultados de Olón.

Finalmente, el estudio de vulnerabilidad GOD de Olón de Montalván et al. (2023) presenta una extrema vulnerabilidad de 0.85, desde la parte media hacia la parte alta de la cuenca. Y una puntuación de 0.81 desde la parte media hacia la baja del aluvial. Durante la época lluviosa se puede observar un escenario similar, pero mejor zonificado, ya que el índice DRASTIC considera más parámetros para la evaluación de vulnerabilidad.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero costero de Olón a la contaminación, basada en el análisis de parámetros hidrológicos, datos geoelectricos y herramientas de SIG, permitió obtener una visión integral de las condiciones de protección del recurso hídrico en la región.

A través del análisis de parámetros hidrológicos durante las épocas lluviosa y seca, se identificaron diferencias significativas en la susceptibilidad del acuífero a la contaminación. La mayor vulnerabilidad se presentó durante la época lluviosa. El 73% del acuífero de Olón presenta una alta vulnerabilidad durante esta época y el 4% presenta una moderadamente baja a baja vulnerabilidad (ver **Figura 33 a**), ya que las intensas precipitaciones generan una alta recarga que intensifica el potencial de arrastre de contaminantes hacia las aguas poco profundas. Mientras que, durante la época seca el 58% del acuífero presenta una vulnerabilidad moderadamente alta y el 13% moderadamente baja a baja. Los pozos se encuentran altamente susceptibles durante el invierno y verano, debido a las capas superficiales arenosas con baja capacidad de atenuación de contaminantes.

El 74% de la cuenca presenta una capacidad de protección moderada, ya que son áreas con capas delgadas, pero resistividades medias a bajas debido a los materiales arenosos arcillosos que sobre yacen al acuífero y poseen una baja permeabilidad. El bajo espesor de la capa de sobrecarga lo pone en riesgo a contaminación.

Debido a la alta y muy alta vulnerabilidad se plantearon estrategias de sostenibilidad alineadas a los ODS 6, 11, 12, 15 para la conservación de las aguas subterráneas enfocadas en cuatro factores. En lo económico, implementar parcelas de filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales, de modo que se puedan llevar a cabo las actividades que impulsan el desarrollo económico con normalidad. En lo cultural, buscar apoyo para la construcción de diques de hormigón como una estrategia de técnicas basadas en la naturaleza que permitan la recarga del acuífero. En lo social, priorizar aquellas zonas más vulnerables para la intervención de

infraestructura hídrica, particularmente en las comunidades rurales aisladas, donde los fondos estatales no contemplan la implementación de proyectos piloto o sistemas de agua potable y saneamiento a gran escala (Herrera-Franco et al., 2024). Y en la parte ecológica, elaborar un plan de manejo ambiental para la conservación de los materiales y elementos que conforman el ecosistema del acuífero.

La integración de los datos en un entorno SIG permitió comparar los niveles de vulnerabilidad en diferentes sectores del acuífero. Las herramientas geoespaciales evidenciaron patrones claros de riesgo, destacando las áreas críticas que requieren una gestión prioritaria. Estas comparaciones fueron clave para identificar las zonas con menor protección y plantear estrategias específicas de sostenibilidad.

5.2 Recomendaciones

Promover el uso sostenible del recurso hídrico mediante la implementación de prácticas de conservación y recarga controlada en las áreas más vulnerables. Se deben establecer prácticas agrícolas y urbanísticas que minimicen el desperdicio de agua, como el uso de sistemas de riego eficiente (riego por goteo, técnicas de captación de agua de lluvia). Implementar más sistemas de recarga artificial, tales como pozos de infiltración, represas de captación de agua de lluvia y áreas de recarga designadas, que permitan la restauración de los niveles de los acuíferos en áreas vulnerables. Esto también implica controlar la extracción de agua para no exceder la tasa de recarga natural.

Implementar monitoreos periódicos utilizando herramientas SIG y métodos geoeléctricos para evaluar cambios en la vulnerabilidad del acuífero a largo plazo. Utilizar SIG para mapear y monitorear el comportamiento del acuífero a través del tiempo, identificando zonas de mayor extracción de agua, áreas de recarga y posibles contaminaciones. Además, establecer estaciones de monitoreo en puntos estratégicos de los acuíferos que permitan la recopilación continua de datos sobre la calidad y cantidad del agua, asegurando respuestas rápidas ante posibles variaciones.

Establecer zonas de protección en los sectores con menor capacidad de protección natural, limitando actividades contaminantes y promoviendo políticas de saneamiento ambiental mediante la identificación de zonas de recarga de acuíferos y áreas de protección crítica donde se prohíban actividades que puedan contaminar el agua

Concientizar a las comunidades locales sobre la importancia de proteger el acuífero y fomentar su participación en la gestión sostenible del agua. Establecer incentivos en las comunidades, para la participación activa en la protección de los acuíferos, tales como financiamientos dirigidos a proyectos de conservación, bonificaciones en tarifas de agua o acceso a programas de educación ambiental.

El estudio de vulnerabilidad fue basado en datos y modelos desde el año 2008 hasta la actualidad, lo que puede no reflejar completamente los cambios en las condiciones climáticas, el uso del suelo o las intervenciones humanas actuales. Es crucial realizar monitoreos constantes para obtener una visión más precisa de las tendencias a lo largo del tiempo. Además, muchos estudios de vulnerabilidad no consideran suficientemente los impactos del cambio climático, lo cual es esencial para proyectos a largo plazo. Se debe incluir el uso de escenarios climáticos futuros basados en modelos climáticos regionales para evaluar cómo eventos como sequías, inundaciones o variaciones en las precipitaciones pueden afectar la vulnerabilidad del acuífero. Finalmente, es vital integrar factores antropogénicos en el estudio, ya que las decisiones humanas tienen un impacto directo en la capacidad de recarga y la calidad de los acuíferos.

Referencias

- Aizebeokhai, A. P., & Oyeyemi, K. D. (2014). The use of the multiple-gradient array for geoelectrical resistivity and induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 111, 364–376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.023>
- Aizprua, C., Witt, C., Johansen, S. E., & Barba, D. (2019). Cenozoic Stages of Forearc Evolution Following the Accretion of a Sliver From the Late Cretaceous-Caribbean Large Igneous Province: SW Ecuador-NW Peru. *Tectonics*, 38(4), 1441–1465. <https://doi.org/10.1029/2018TC005235>
- Aladeboyeje, A. I., Adenoye, T. T., & Agbasi, O. E. (2024). Assessment of groundwater vulnerability using GOD index and Dar Zarrouk parameters: A case study of OAUSTECH main campus, Okitipupa, Ondo State. *Results in Earth Sciences*, 2, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100036>
- Alemán, A. M., Palencia, A. A., Lezama, E. E., & Montenegro, G. (2021). The Chongón/Colonche orocline transrotational bending and the coeval opening of the Progreso basin in southwestern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103480>
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*.
- Ankidawa, B. A., Ishaku, J. M., & Hassan, A. A. (2018). Estimation of Aquifer Transmissivity Using Dar Zarrouk Parameters Derived from Resistivity Soundings on the Floodplain of River Dadin Kowa, Gombe State, Northeastern Nigeria. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 1(4), 36–52. <https://doi.org/10.22115/CEPM.2018.129584.1024>
- Aslam, R. A., Shrestha, S., & Pandey, V. P. (2018). Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology. *Science of The Total Environment*, 612, 853–875. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.08.237>
- Benitez, S. (1995). *Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire* [Université Joseph-Fourier]. <https://theses.hal.science/tel-00542421v1>
- Borja, J., Herrera, P., Sánchez, J., & Gavilanes, J. (2012). *Evaluación del Uso Turístico y Recreativo de Olón en la Provincia de Santa Elena*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Bristow, C. R., & Hoffstetter, R. (1977). *Léxico Estratigráfico del Ecuador* (Segunda). Centre National de la Recherche Scientifique.
- Bulois, C., Saillard, M., Espurt, N., Benítez, P. R., Michaud, F., Barba, D., Peuzin, A., Hernández Salazar, M. J., Schenini, L., Régnier, M., & Ratzov, G. (2023). Structural evolution of the

- southern Ecuadorian forearc in the Santa Elena Peninsula region. *Journal of South American Earth Sciences*, 130, 104503. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104503](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104503)
- Calderón Torres, M. Á. (2010). *Modelo Conceptual Del Acuífero Del Río De Olón*.
- Carrión-Mero, P., Briones-Bitar, J., Rivera-Vinces, G., Chávez, M. Á., & Blanco-Torrens, R. (2023). *Proposal for the Design of an Artisan Dam (Tape) for the Water Resources Sustainability in Libertador Bolivar Commune, Manglaralto-Ecuador* (pp. 409–422). https://doi.org/10.1007/978-3-031-34436-7_24
- Carrión-Mero, P., Jaime, M., Calderón, L., Sánchez-Zambrano, E., Malavé-Hernández, J., Aguilar-Aguilar, M., Merchán-Sanmartín, B., Morante-Carballo, F., & Espinel, R. (2024). Water Use Alternatives to Proposal Agricultural Development in a Semi-Arid Zone: Ayangué Commune, Ecuador. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(10), 3793–3807. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.191009>
- Carrión-Mero, P., Malavé-Hernández, J., Solórzano, J., Martínez-Angulo, J., & Morante-Carballo, F. (2024). A Systematic Review of Groundwater Management Applied to Rural Development. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(9), 3377–3391. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.190909>
- Carrión-Mero, P., Montalván, F. J., Morante-Carballo, F., Heredia, J., Elorza, F. J., Solórzano, J., & Aguilera, H. (2021). Hydrochemical and isotopic characterization of the waters of the manglaralto river basin (Ecuador) to contribute to the management of the coastal aquifer. *Water (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040537>
- Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., Herrera-Franco, G., Jaya-Montalvo, M., Rodríguez, D., Llor-Flores de Valgas, C., & Berrezueta, E. (2021). Community-University Partnership in Water Education and Linkage Process. Study Case: Manglaralto, Santa Elena, Ecuador. *Water*, 13(15), 1998. <https://doi.org/10.3390/w13151998>
- Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., Vargas-Ormaza, V., Apolo-Masache, B., & Jaya-Montalvo, M. (2021). A Conceptual Socio-Hydrogeological Model Applied to Sustainable Water Management. Case Study of the Valdivia River Basin, Southwestern Ecuador. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(7), 1275–1285. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.160708>
- Carrión-Mero, P., Olaya, P., Sanango-Ochoa, L., Cano-Alvarado, F., Bravo-Montero, Lady, Solórzano, J., & Morante-Carballo, F. (2023). Hydrogeological Characterization of a Coastal Area for the Groundwater Exploitation. Hondo River Micro-Watershed, Santa Elena-Ecuador. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(2), 401–410. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180208>

- Carrión-Mero, P., Solórzano, J., Malavé-Hernández, J., Martínez-Angulo, J., Javier, M. F., & Morante-Carballo, F. (2024). Mapping Groundwater Potential Zones for Sustainable Agricultural Development in Entre Ríos, Ecuador. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19(3), 817–830. <https://doi.org/10.18280/ij dne.190312>
- Cassiani, G., & Medina, M. (1997). Incorporating Auxiliary Geophysical Data into Ground-Water Flow Parameter Estimation. *Ground Water*, 35(1), 79–91.
- CEPAL. (2017). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Comisión Económica Para América Latina y El Caribe. <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>
- Civita, M. (1994). *Le carte di vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica* (Pitagora editrice).
- Civita, M., & De Maio, M. (1997). SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automatizzazione. *Pitagora Editrice*, 60.
- DELG, EPA, & GSI. (1999). *Groundwater protection schemes*. Department of the Environment and Local Government ; Environmental Protection Agency; Geological Survey of Ireland.
- Drouet-Candel, A. E., Pérez-Castro, T., Cruz-La Paz, O. V, Elena, S., & Vía La Libertad, E. (2021). Los sistemas de producción agrícola de las parroquias del norte de la provincia Santa Elena, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 42(4), 2. <http://ediciones.inca.edu.cu>octubre-diciembre
- Dumont, J. F., Santana, E., Bonnardot, M.-A., Pazmiño, N., Pedoja, K., & Scalabrino, B. (2014). Chapter 24 Geometry of the coastline and morphology of the convergent continental margin of Ecuador. *Geological Society, London, Memoirs*, 41(1), 327–338. <https://doi.org/10.1144/M41.24>
- Fetter, C. W. . (2014). *Applied hydrogeology*. Pearson Education Limited.
- Fortis, J., Freire, M., Peralta, P., & Linzán, S. (2017). Identificación de Factores de Competividad para el Diseño de un Modelo de Gestión de Destino Sostenible. Comuna Olón. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, IV, 92–97.
- Gabino, O. (2013). *Plan Estratégico Para La Junta Regional Del Sistema De Agua Potable Olón, Parroquia Manglaralto, Cantón Santa Elena, Provincia De Santa Elena 2013-2018*. Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- GAD Manglaralto. (2019). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*.
- GAD Santa Elena. (2020a). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*.
- GAD Santa Elena. (2020b). *Plan de Uso y Ocupación del Suelo del Cantón de Santa Elena*.

- Goyal, D., Haritash, A. K., & Singh, S. K. (2021). A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods. *Journal of Environmental Management*, 296, 113161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>
- Hentati, I., Zaïri, M., & Ben Dhia, H. (2011). A statistical and geographical information system analysis for groundwater intrinsic vulnerability: A validated case study from Sfax-Agareb, Tunisia. *Water and Environment Journal*, 25(3), 400–411. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00235.x>
- Hernández, M. J., Michaud, F., Collot, J.-Y., Proust, J.-N., & d'Acremont, E. (2020). Evolution of the Ecuador offshore nonaccretionary-type forearc basin and margin segmentation. *Tectonophysics*, 781, 228374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228374>
- 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*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.130>
- Herrera-Franco, G., Bravo-Montero, Lady, Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., & Apolo-Masache, B. (2020). Community management of the Olón coastal aquifer, Ecuador, and its impact on the supply of water suitable for human consumption. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 241, 169–181. <https://doi.org/10.2495/SDP200141>
- Herrera-Franco, G., Carrión-Mero, P., & Briones-Bitar, J. (2020). Ancestral knowledge application via “albarradas” and “tapes” in water management in Santa Elena Province, Ecuador. *Boletin Geologico y Minero*, 131(1), 75–88. <https://doi.org/10.21701/BOLGEOMIN.131.1.005>
- Herrera-Franco, G., Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Mora-Frank, C., & Berrezueta, E. (2022). Bibliometric Analysis of Groundwater's Life Cycle Assessment Research. *Water*, 14(7), 1082. <https://doi.org/10.3390/w14071082>
- Herrera-Franco, G., Morante-Carballo, F., Bravo-Montero, Lady, Valencia-Robles, J., Aguilar-Aguilar, M., Martos-Rosillo, S., & Carrión-Mero, P. (2024). Water Sowing and Harvesting (WS&H) for Sustainable Management in Ecuador: A Review. *Heritage*, 7(7), 3696–3718. <https://doi.org/10.3390/heritage7070175>
- Hiscock, K. M. (2005). *Hydrogeology Principles and Practice*. Blackwell Science Ltd.
- Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). *Hydrogeology*. Springer. <http://www.springer.com/series/15201>

- IEE, & MAGAP. (2012a). *Memoria Técnica Santa Elena “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional Escala 1:25.000” Clima e Hidrología.*
- IEE, & MAGAP. (2012b). *Memoria Técnica Santa Elena “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional” Geomorfología.*
- INEC. (2010). *Base de Datos-Censo de Población y Vivienda 2010.*
- INEC. (2022). *Gestión de Agua Potable y Saneamiento 2021.*
- Jaillard, É., Benítez, S., & Mascle, G. H. (1997). Palaeogene deformations of the forearc zone of south Ecuador in relation to the geodynamic evolution; [Les déformations paléogènes de la zone d’avant-arc sud-équatorienne en relation avec l’évolution géodynamique]. *Bulletin de La Societe Geologique de France*, 168(4), 403 – 412.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031461651&partnerID=40&md5=16aaedc4f881b6562dfcd737cb05d11e>
- Jaillard, E., Ordonez, M., Benítez, S., & Montenegro, G. (1995). Basin development in an accretionary, oceanic-floored fore-arc setting: Southern coastal Ecuador during Late Cretaceous-Late Eocene time. *Petroleum Basins of South America: AAPG Memoir*, 615–631.
<https://www.researchgate.net/publication/32973495>
- JASRAPO. (2024). *Gestión integral de cuencas hidrográficas rurales: factores de éxito y desafíos.*
- Johnson, A. I. (1963). *A Field Method for Measurement of Infiltration.*
- Kay, S. M., Ramos, V. A., & Dickinson, W. R. (Eds.). (2009). *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision.* Geological Society of America.
<https://doi.org/10.1130/MEM204>
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (Third). Blackwell Science.
- Kelly, W. E., & Reiter, P. F. (1984). Influence of Anisotropy on Relations Between Electrical and Hydraulic Properties of Aquifers. In *Journal of Hydrology* (Vol. 74).
- Kelly, W., & Mares, S. (1993). Chapter 3 Geophysical Surveys for Hydrogeological Purposes. In W. E. Kelly & S. Mares (Eds.), *Applied Geophysics in Hydrogeological and Engineering Practice* (Vol. 44, pp. 31–99). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(08\)70371-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-5648(08)70371-X)
- Kirsch, R. (2009). Groundwater Geophysics. In *Groundwater Geophysics* (2nd ed.). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7>
- Kneisel, C., & Hauck, C. (2008). Electrical methods. In *Applied Geophysics in Periglacial Environments* (pp. 3–27). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511535628.002>

- Kostiakov, A. N. (1932). On the Dynamics of the Coefficients of Water Percolation in Soils and on the Necessity of Studying It from a Dynamic Point of View for Purpose of Amelioration. *Transactions of 6th Committee International Society of Soil Science*, 17–21.
- Loke, M. H., Rucker, D. F., Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., & Kuras, O. (2020). Electrical Resistivity Surveys and Data Interpretation. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_46-1
- Lloor, M. (2023). *Análisis del potencial hídrico del acuífero costero Olón (Ecuador) para el abastecimiento de la población, y estudios de distintos escenarios de contaminación mediante modelos de simulación numérica*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Lozano, J. C., & Márquez, D. A. (2024). *Gestión Hídrica mediante Técnicas de Prospección Geofísica Y Modelo 3D del Acuífero de la Cuenca del Río Olón, Provincia de Santa Elena*.
- Machiwal, D., Jha, M. K., Singh, V. P., & Mohan, C. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, 901–927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>
- Maillet, R. (1947). The Fundamental Equations of Electrical Prospecting. *Geophysics. A Journal of General and Applied Geophysics*, XII(4), 529–556. <http://library.seg.org/>
- Mohammed, M. A. A., Szabó, N. P., & Szűcs, P. (2023). Exploring hydrogeological parameters by integration of geophysical and hydrogeological methods in northern Khartoum state, Sudan. *Groundwater for Sustainable Development*, 20, 100891. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100891>
- Molina, G. A. R., Rinaldi, V. A., & Taborda, R. (2004). *Tomografía Geo eléctrica: Desarrollo y Potenciales Aplicaciones en Geotecnia*.
- Montalván, F. J., Solórzano, J., Sánchez-Zambrano, E., Bailón-Piguave, I., Tomalá-Guale, H., Lloor-Flores de Valgas, C., & Carrión-Mero, P. (2023). Vulnerability to Contamination of the Olón Aquifer Using the GOD Method, Olón-Ecuador. In *World Sustainability Series: Vol. Part F1432* (pp. 525–544). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34436-7_31
- Montalván Toala, F. Xavier. (2008). *Caracterización Geoeléctrica del Acuífero de la Cuenca del Río Olón para Propuesta de Plan de Explotación*.
- 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*. 139–149. <https://doi.org/10.2495/WRM190141>

- Morante-Carballo, F., Briones-Bitar, J., Montalván, F. J., Alencastro-Segura, A., Chávez-Moncayo, M. A., & Carrión-Mero, P. (2024). Proposal of an alluvial dike as a nature-based solution for sustainable water management in coastal areas. *Results in Engineering*, 23, 102599. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102599>
- Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Quiñonez-Barzola, X., Jaya-Montalvo, M., & Carrión-Mero, P. (2022). What Do We Know about Water Scarcity in Semi-Arid Zones? A Global Analysis and Research Trends. *Water*, 14(17), 2685. <https://doi.org/10.3390/w14172685>
- National Research Council. (1993). Ground Water Vulnerability Assessment. In *Ground Water Vulnerability Assessment*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/2050>
- Núñez Del Arco, E. (2003). *Geología del Ecuador*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Núñez Del Arco, E., & Dugas, F. (1985). *Guía Geológica del Suoreste de la Costa Ecuatoriana*. ESPOL, CNUEP.
- Oboshenure, K. K., & Airen, O. J. (2021). Aquifer vulnerability assessment using Dar-Zarrouk parameter: A case study of Otofure and Ikhueniro dumpsites, Benin-city, South-South Nigeria. *Australian Journal of Science and Technology*, 5(1). www.aujst.com
- OMS. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST ADDENDUM*.
- ONU. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
- Pavlis, M., Cummins, E., & McDonnell, K. (2010). Groundwater vulnerability assessment of plant protection products: A review. In *Human and Ecological Risk Assessment* (Vol. 16, Issue 3, pp. 621–650). <https://doi.org/10.1080/10807031003788881>
- Pineda, R. P. (2019). *Evaluación geológica, geomecánica y consideraciones para el prediseño de la estabilidad del talud del Santuario Blanca Estrella del Mar en el cerro de Olón, Santa Elena-Ecuador*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Piscopo, G. (2001). *Groundwater vulnerability map explanatory notes - Castlereagh*.
- Prefectura de Santa Elena. (2023). *Plan de Turismo Sostenible de la Provincia de Santa Elena 2023-2028*.
- Pugh, S. (1981). Concept Selection: A Method that Works. *Proceedings of International Conference on Engineering Design*, 497–506.
- Reed, P., Ellsworth, T., & Minsker, B. (2004). Spatial Interpolation Methods for Nonstationary Plume Data. *Ground Water*, 42(2), 190–202. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02667.x>

- Reyes, P. (2008). Quantification Relative du Soulevement de la Cordillere Cotiere (Equateur) a Partir de la Geomorphologie Sur Mnt. In *Dynamique des Systèmes Géologiques et Aléas*. Dynamique des Systèmes Géologiques et Aléas.
- Simon, S. S., Ishaku, J. M., Seli, A. B., & Boniface, F. (2022). Evaluation of Groundwater Potentials Using Dar Zarrouk Parameters in Mapeo and Environs, North-Eastern Nigeria. *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(3b), 124–135. <https://doi.org/10.4314/dujopas.v8i3b.13>
- Solórzano, V., Olives, J., Garzozzi, R., & Coronel, V. (2022). Water And Community Systems: An Approach To The Economic Valuation Of Water Resources In The Watersheds Of The Province Of Santa Elena, Ecuador. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 13(9), 3515–3537. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.S09.438>
- Spies, B. R., & Frischknecht, F. C. (1991). 5. Electromagnetic Sounding. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* (Vol. 2, pp. 285–425). Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch5>
- Televistazo. (2024). *El turismo desplazó a la pesca como el principal ingreso de la comuna Olón de Santa Elena*.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (Second). Cambridge University Press.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater Hydrology (Third Edition)* (Wiley). <https://doi.org/10.1002/gj.3350170407>
- Udosen, N. I., George, N. J., & Ekanem, A. M. (2024). Aquifer vulnerability valorization via DRASTIC index-based assessment within litho-facies of a coastal environment. *Results in Earth Sciences*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100033>
- UNESCO. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland): Nuestro Futuro Común*.
- UNESCO. (2012, June 19). *World's groundwater resources are suffering from poor governance, experts say*.
- UNESCO. (2022a). *Aguas Subterráneas Hacer visible el recurso invisible Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022*. <http://www.unesco>.
- UNESCO. (2022b). *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater : making the invisible visible*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- USGS. (2019, October 16). *Aquifers and Groundwater*. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/aquifers-and-groundwater#overview>

- Valencia, J. (2017). *Análisis Hidrogeológico de la Cuenca del Río Manglaralto para la Caracterización de sus Sistemas Acuíferos*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Witt, C., Reynaud, J. Y., Barba, D., Poujol, M., Aizprua, C., Rivadeneira, M., & Amberg, C. (2019). From accretion to forearc basin initiation: The case of SW Ecuador, Northern Andes. *Sedimentary Geology*, 379, 138–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.11.009>
- Yoram, R., & Hubbard, S. (2005). *Hydrogeophysics* (Vol. 50). Springer.
- Zghibi, A., Merzougui, A., Chenini, I., Ergaieg, K., Zouhri, L., & Tarhouni, J. (2016). Groundwater vulnerability analysis of Tunisian coastal aquifer: An application of DRASTIC index method in GIS environment. *Groundwater for Sustainable Development*, 2–3, 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.10.001>
- Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P., & Mabey Book, D. R. (1974). *Application of Surface Geophysics to Ground-Water Investigations*.

Anexos

Tabla 23 Datos Geoeléctricos disponibles del acuífero Olón

Punto	Profundidad (m)	Espesor (m)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	h/p	h^*p	Conductancia longitudinal (SL)	Resistencia transversal (TR)	Interpretación
OL-01	0,71	0,71	4,00	0,18	2,84	0,49	82,84	Limo arcilloso
	5,70	5,00	16,00	0,31	80,00			Gravas y arenas limosas
	20,00	14,00	4,10	3,41	57,40			Gravas y arenas finas con limos
	64,00	44,00	6,10	7,21	268,40			Gravas, arenas finas en una matriz limosa
	80,00	16,00	2,70	5,93	43,20			Arcillas arenosos
OL-02	2,00	2,00	5,00	0,40	10,00	1,54	31,07	Arenas finas con gravas con limos
	6,90	4,90	4,30	1,14	21,07			Arenas finas con limos y arcillas
	31,00	24,00	5,70	4,21	136,80			Gravas y arenas con limos
	100,00	69,00	4,30	16,05	296,70			Arenas finas con limos y arcillas
	120,00	20,00	24,00	0,83	480,00			Lutitas con intercalaciones de areniscas y arcillas
OL-03	0,84	0,84	4,00	0,21	3,36	0,21	3,36	Limo arcilloso
	3,20	2,40	5,60	0,43	13,44			Gravas y arenas con limos
	4,80	1,60	4,50	0,36	7,20			Arenas finas con limos y arcillas
	154,00	149,00	2,60	57,31	387,40			Arcillas arenosos
	180,00	26,00	2,30	11,30	59,80			Arcillas arenosos
OL-04	0,76	0,76	4,10	0,19	3,12	0,19	3,12	Arenas finas con limos y arcillas
	3,10	2,30	12,00	0,19	27,60			Gravas, arenas limosas y arenas arcillosas
	11,00	7,60	2,60	2,92	19,76			Arcillas arenosos
	69,00	58,00	0,84	69,05	48,72			Limos arcillosos
	80,00	11,00	0,03	366,67	0,33			Limos arcillosos con agua salina
OL-05	0,35	0,35	11,00	0,03	3,85	1,43	9,45	Gravas, arenas limosas y arenas arcillosas
	3,20	2,80	2,00	1,40	5,60			Arcillas limosas con agua salina
	124,00	121,00	5,50	22,00	665,50			Gravas y arenas con limos
	140,00	16,00	0,00	16000,00	0,02			Limo arcilloso con agua salina
OL-06	0,72	0,72	1,90	0,38	1,37			Arcillas limosas con agua salina
	4,30	3,60	1,20	3,00	4,32			Limos arcillosos con agua salina
	9,80	5,50	2,40	2,29	13,20			Arcillas arenosos
	132,00	122,00	1,40	87,14	170,80			Arcillas limosas con agua salina
	462,00	330,00	1,80	183,33	594,00			Arcillas limosas
	470,00	8,00	1,00	8,00	8,00			Limos y arcillas
OL-07	2,50	2,50	4,40	0,57	11,00			Gravas y arenas finas con limos

	5,00	2,50	0,96	2,60	2,40			Arcillas limosas
	61,00	56,00	1,80	31,11	100,80			Limos arcillosos
	87,00	26,00	2,50	10,40	65,00			Arcilla arenoso
	100,00	13,00	4,40	2,95	57,20			Gravas y arenas finas con limos
OL-08	4,10	4,10	7,70	0,53	31,57	0,53	31,57	Gravas con arenas limosas
	181,00	177,00	2,10	84,29	371,70			Arcillas con arena
	200,00	19,00	0,00	19000,00	0,02			Arcillas limosas con salinidad
OL-09	0,97	0,97	2,70	0,36	2,62	0,57	3,23	Arcilla arenoso
	1,30	0,36	1,70	0,21	0,61			Limos arcillosos con agua salina
	8,40	7,10	6,60	1,08	46,86			Gravas con arenas finas y limos
	20,00	11,60	2,00	5,80	23,20			Arcillas limosas con agua salina
OL-10	6,70	6,70	2,90	2,31	19,43	2,31	19,43	Arcilla arenoso
	52,00	45,00	1,80	25,00	81,00			Limos arcillosos con agua salina
	54,00	2,30	23,00	0,10	52,90			Limolitas y lutitas con intercalaciones de arcillas
	70,00	16,00	8,50	1,88	136,00			Gravas, bolos con arenas limosas
OL-11	0,41	0,41	2,60	0,16	1,07	0,68	14,89	Arcillas arenosos
	0,80	0,39	4,20	0,09	1,64			Gravas y arenas finas con limos con agua salina
	3,10	2,30	5,30	0,43	12,19			Gravas y arenas gruesas con limos
	7,80	4,70	5,90	0,80	27,73			Gravas y arenas con limos
	49,00	41,00	2,80	14,64	114,80			Arcillas arenosos
	70,00	21,00	220,00	0,10	4620,00			Arenas y gravas
OL-12	3,80	3,80	11,00	0,35	41,80	0,41	54,68	Gravas, arenas limosas y arenas arcillosas
	4,70	0,92	14,00	0,07	12,88			Gravas y arenas arcillosas
	15,00	10,00	6,80	1,47	68,00			Gravas, arenas finas en una matriz limosa
	94,00	79,00	1,70	46,47	134,30			Limo arcilloso
	110,00	16,00	49,00	0,33	784,00			Limolitas y lutitas con intercalaciones de areniscas y arcillas
OL-13	1,70	1,70	3,37	0,50	5,73	0,50	5,73	Limos con arenas finas
	3,52	1,82	8,87	0,21	16,14			Gravas y arenas gruesas con limos
	82,00	78,50	2,67	29,40	209,60			Limos con arenas finas
					0,00			Arcillas limosas
OL-14	1,20	1,20	5,10	0,24	6,12	0,31	13,84	Gravas y arenas gruesas con limos
	2,00	0,78	9,90	0,08	7,72			Gravas y bolos con arenas limosas
	3,30	1,30	3,60	0,36	4,68			Limos con arenas finas
	23,00	20,00	1,40	14,29	28,00			Arcillas limosas con agua salina
	47,00	24,00	4,10	5,85	98,40			Arenas finas con limos y arcillas
	70,00	23,00	1,00	23,00	23,00			Limos y arcillas
OL-15	27,00	27,00	5,20	5,19	140,40			Gravas y arenas gruesas con limos
	32,00	4,90	11,00	0,45	53,90			Gravas, arenas limosas y arenas arcillosas
	71,00	39,00	4,00	9,75	156,00			Arenas finas con limos y arcillas
	90,00	19,00	0,00	19000,00	0,02			Arcillas limosas con salinidad

OL-30	0,83	0,83	8,00	0,10	6,64	0,87	13,54	Gravas y arenas limosas
	3,10	2,30	3,00	0,77	6,90			Limos arcilloso
	59,00	56,00	2,50	22,40	140,00			Arcillas arenosos con agua salina
	80,00	21,00	4,50	4,67	94,50			Gravas y arenas finas con limos
OL-31	1,20	1,20	18,00	0,07	21,60	0,21	200,10	Gravas y bolos con arenas arcillosas
	6,30	5,10	35,00	0,15	178,50			limolitas y lutitas con intercalaciones de limos
	7,90	1,60	14,00	0,11	22,40			Gravas y bolos con arenas limosas
	57,00	49,00	7,60	6,45	372,40			Gravas y arenas limosas
	113,00	56,00	4,70	11,91	263,20			Arenas con gravas y limos
	130,00	17,00	72,00	0,24	1224,00			limonitas y lutitas con intercalaciones de limos y arcillas
OL-32	1,80	1,80	15,00	0,12	27,00	0,34	184,60	Gravas y bolos con arenas limosas
	4,30	2,50	34,00	0,07	85,00			Limonitas y lutitas con intercalaciones de limos
	7,60	3,30	22,00	0,15	72,60			Limolitas y lutitas con intercalaciones de limos con salinidad
	20,00	12,40	5,00	2,48	62,00			Arenas con gravas y limos
OL-33	2,70	2,70	8,80	0,31	23,76	0,31	23,76	Gravas y arenas limosas
	41,00	38,00	5,70	6,67	216,60			Gravas y arenas gruesas con limos
	65,00	24,00	3,00	8,00	72,00			Limos con arenas finas
OL-34	2,60	2,60	14,00	0,19	36,40	0,19	36,40	Gravas y bolos con arenas limosas
	71,00	68,00	60,00	1,13	4080,00			Limolitas y lutitas con intercalaciones de limos y arcillas
	80,00	9,00	24,00	0,38	216,00			Limolitas y lutitas con intercalaciones de limos con salinidad
	100,00	20,00	5,30	3,77	106,00			Arenas con gravas y limos
OL-36	1,20	1,20	22,00	0,05	26,40	0,09	27,26	Limolitas y lutitas con intercalaciones de limos con salinidad
	1,40	0,18	4,80	0,04	0,86			Arenas con gravas y limos
	43,00	42,00	8,80	4,77	369,60			Gravas y arenas limosas
	67,00	24,00	6,60	3,64	158,40			Gravas con arenas limosas
	127,00	60,00	3,80	15,79	228,00			Limos con arenas finas
	150,00	23,00	0,00	5750,00	0,09			Arcillas limosas
OL-37	3,40	3,40	27,00	0,13	91,80	0,99	286,80	Limolitas y lutitas con intercalaciones de areniscas
	16,00	13,00	15,00	0,87	195,00			Gravas con arenas limosas
	116,00	100,00	6,10	16,39	610,00			Gravas con arenas finas y limo
	130,00	14,00	0,00	7000,00	0,03			Arcillas limosas
OL-38	106,00	106,00	14,00	7,57	1484,00			Gravas con arenas limosas
	106,00	0,45	49,00	0,01	22,05			Limolitas y lutitas con intercalaciones de limos y arcillas
	120,00	14,00	17,00	0,82	238,00			Gravas y bolos con arenas limosas
TDEM-1	2,53	2,53	114,00	0,02	288,42	0,02	288,42	Arena y grava
	53,20	50,60	4,39	11,53	222,13			Limo arenoso

	110,00	57,00	2,41	23,65	137,37			limo arcilloso
TDEM -2	4,76	4,76	12,90	0,37	61,40	0,37	61,40	arena
	11,40	6,69	8,89	0,75	59,47			limo arenoso
	109,00	97,50	2,97	32,83	289,58			limo arcilloso
	150,00	41,00	1,44	28,47	59,04			
TDEM -3	0,33	0,33	27,00	0,01	8,91	0,01	8,91	arena y grava
	13,00	12,70	17,00	0,75	215,90			arena
	20,10	7,14	1,32	5,41	9,42			limo arcilloso
	33,40	13,20	0,33	40,00	4,36			limo arcilloso
	40,00	6,60	17,01	0,39	112,27			arena
TDEM -4	1,17	1,17	19,50	0,06	22,82	0,29	203,78	arena
	7,61	6,44	28,10	0,23	180,96			Arena y grava
	21,80	14,20	5,39	2,63	76,54			limo arenoso
	33,10	11,30	0,40	28,25	4,52			limo arcilloso
	46,00	12,90	30,70	0,42	396,03			Arena y grava
TDEM -5	1,32	1,32	23,90	0,06	31,55	0,16	201,69	arena y grava
	5,47	4,16	40,90	0,10	170,14			Arena y grava
	13,70	8,19	10,20	0,80	83,54			limo arenoso
	38,40	24,80	1,17	21,20	29,02			limo arcilloso
	50,00	11,60	80,20	0,14	930,32			arena y grava
TDEM -6	0,37	0,37	13,10	0,03	4,85	0,03	4,85	arena
	11,60	11,20	22,50	0,50	252,00			Arena y grava
	20,90	9,30	2,45	3,80	22,79			limo arcilloso
	31,20	10,30	0,24	42,92	2,47			limo arcilloso
	39,40	8,20	16,40	0,50	134,48			arena
TDEM -7	1,25	1,25	18,70	0,07	23,38	0,07	23,38	arena
	11,50	10,20	32,10	0,32	327,42			arena y grava
	29,90	11,50	2,31	4,98	26,57			limo arcilloso
	33,50	10,50	0,34	30,88	3,57			limo arcilloso
	45,00	11,50	25,60	0,45	294,40			arena y grava
TDEM -8	0,79	0,79	10,40	0,08	8,22	0,08	8,22	arena
	13,50	12,70	41,50	0,31	527,05			arena y grava
	19,80	6,30	1,04	6,06	6,55			limo arcilloso
	29,70	9,89	0,25	39,56	2,47			limo arcilloso
	40,00	10,30	5,07	2,03	52,22			limo arenoso
TG1-A	5,00	5,00	15,00	0,33	75,00	0,33	75,00	arena
	33,00	27,00	5,75	4,70	155,25			limo arenoso
	43,00	15,00	2,50	6,00	37,50			limo arcilloso
TG1-B	5,00	5,00	35,00	0,14	175,00	0,14	175,00	Arena y grava
	31,00	26,00	6,50	4,00	169,00			limo arenoso
	48,00	22,00	3,00	7,33	66,00			limo arcilloso
TG2-A	3,00	3,00	2,50	1,20	7,50	1,37	22,70	limo arcilloso

	4,60	1,60	9,50	0,17	15,20			arena
	40,00	35,40	6,00	5,90	212,40			limo arenoso
TG3-A	11,00	11,00	14,70	0,75	161,70	0,75	161,70	arena
	15,00	4,00	6,00	0,67	24,00			limo arenoso
	37,50	22,50	3,40	6,62	76,50			limo arcilloso
TG3-B	7,00	7,00	32,30	0,22	226,10	0,22	226,10	Arena y grava
	37,00	30,00	6,00	5,00	180,00			limo arenoso
TG3-C	11,25	11,25	16,00	0,70	180,00	0,70	180,00	arena
	40,00	28,75	6,00	4,79	172,50			limo arenoso
TG4-A	7,40	7,40	20,00	0,37	148,00	0,68	213,70	arena y grava
	11,90	4,50	14,60	0,31	65,70			arena
	40,00	28,10	6,00	4,68	168,60			limo arenoso
TG4-B	7,00	7,00	20,00	0,35	140,00	0,35	140,00	arena y grava
	31,70	24,70	5,50	4,49	135,85			limo arenoso
	42,00	10,30	3,30	3,12	33,99			limo arcilloso
TG4-C	16,30	16,30	10,90	1,50	177,67	1,50	177,67	arena
	31,00	14,70	4,70	3,13	69,09			limo arenoso
	43,00	12,00	2,80	4,29	33,60			limo arcilloso
TG5-A	5,40	5,40	14,40	0,38	77,76	0,38	77,76	arena
	9,70	4,30	5,80	0,74	24,94			limo arenoso
	40,00	30,30	3,20	9,47	96,96			limo arcilloso
TG5-B	3,30	3,30	44,50	0,07	146,85	0,07	146,85	arena y grava
	8,70	5,40	4,20	1,29	22,68			limo arenoso
	38,00	29,30	3,20	9,16	93,76			limo arcilloso
TG5-C	3,20	3,20	12,00	0,27	38,40	0,27	38,40	arena
	14,00	10,80	6,50	1,66	70,20			limo arenoso
	38,00	24,00	3,00	8,00	72,00			limo arcilloso
TG6-A	10,80	10,80	10,00	1,08	108,00	1,08	108,00	arena
	17,30	6,50	6,00	1,08	39,00			limo arenoso
	40,00	22,70	3,40	6,68	77,18			limo arcilloso
TG6-B	5,40	5,40	30,00	0,18	162,00	0,57	237,60	arena y grava
	10,80	5,40	14,00	0,39	75,60			arena
	15,10	4,30	5,00	0,86	21,50			limo arenoso
	40,00	24,90	2,70	9,22	67,23			limo arcilloso
TG6-C	4,30	4,30	16,00	0,27	68,80	0,27	68,80	arena
	21,60	17,30	6,50	2,66	112,45			limo arenoso
	39,00	17,40	3,40	5,12	59,16			limo arcilloso
TG7-A	9,00	9,00	2,40	3,75	21,60	3,75	21,60	limo arcilloso
	37,00	28,00	4,50	6,22	126,00			limo arenoso
TG7-B	19,30	19,30	2,40	8,04	46,32	8,04	46,32	limo arcilloso
	37,00	17,70	4,50	3,93	79,65			limo arenoso
GRAD 1	9,00	9,00	35,00	0,26	315,00	0,26	315,00	arena y grava
	32,50	23,50	8,00	2,94	188,00			limo arenoso
GRAD 2	1,50	1,50	15,00	0,10	22,50	0,10	22,50	arena
	35,00	33,50	5,00	6,70	167,50			limo arenoso

GRAD 3	3,00	3,00	3,00	1,00	9,00	1,00	9,00	limo arcilloso
	19,00	16,00	7,00	2,29	112,00			limo arenoso
	29,00	13,00	2,00	6,50	26,00			limo arcilloso
GRAD 4	5,00	5	30,00	0,17	150,00	0,17	150,00	arena y grava
	14,00	9	8,00	1,13	72,00			limo arenoso
	30,00	21,00	2,50	8,40	52,50			limo arcilloso

Nota. Datos tomados de Lozano & Márquez (2024); Montalván (2008)

Figura 38 Registro de datos ensayo de infiltrometría doble anillo Inf-4

[illegible]

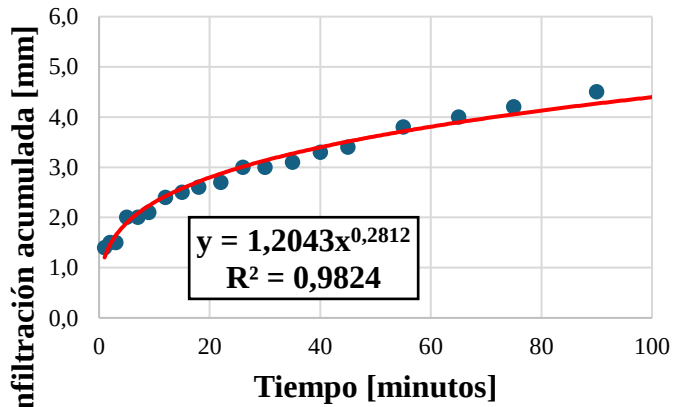
Figura 39 Registro de datos ensayo de infiltrometría doble anillo Inf-5

[illegible]

Figura 40 Gráfica de infiltración acumulada vs tiempo

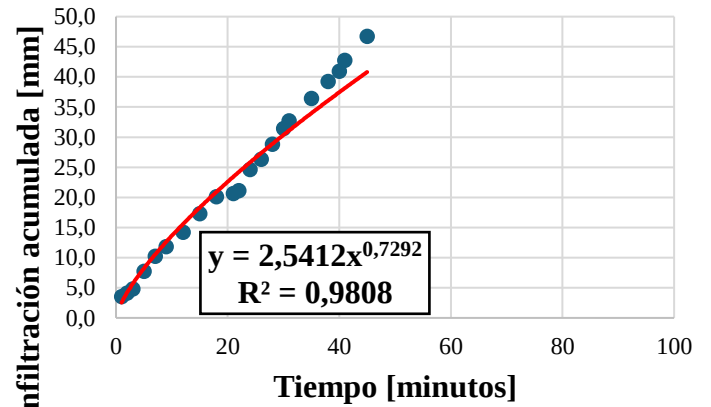
Infiltración acumulada Inf-1

[mm]



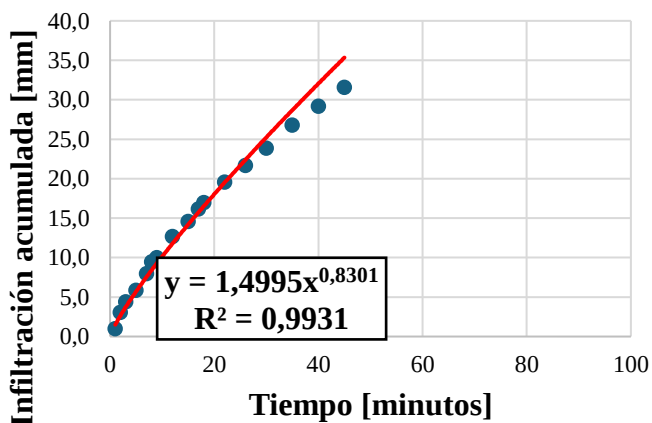
Infiltración acumulada Inf-2

[mm]



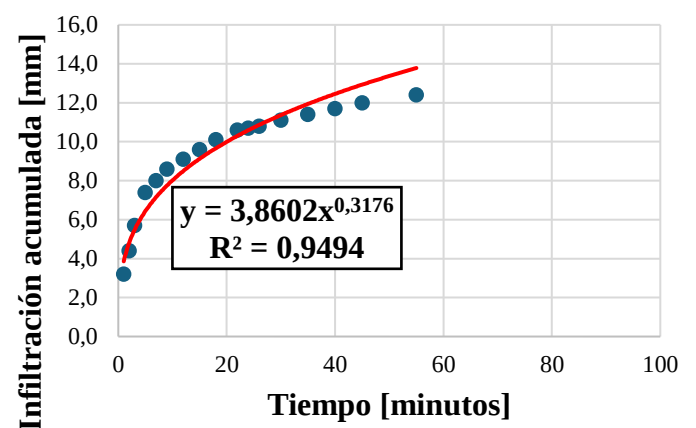
Infiltración acumulada Inf-3

[mm]



Infiltración acumulada Inf-4

4[mm]



Infiltración acumulada Inf-5 [mm]

