



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**“DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA  
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO OLÓN POR EL MÉTODO  
GOD”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTORES:**

**TOMALÁ GUALE HÉCTOR MANUEL  
BAILÓN PIGUAVE IDANIA MIRLEY**

**TUTOR:**

**ING. MONTALVÁN TOALA FRANCISCO JAVIER, PhD.**

La Libertad, Ecuador

2021

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**“DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA  
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO OLÓN POR EL MÉTODO  
GOD”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTORES:**

**TOMALÁ GUALE HÉCTOR MANUEL**

**BAILÓN PIGUAVE IDANIA MIRLEY**

**TUTOR:**

**ING. MONTALVÁN TOALA FRANCISCO JAVIER, PhD.**

**La Libertad, Ecuador**

**2021**

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jonny Villao Borbor, MSc.  
**DIRECTOR DE CARRERA**



Ing. Francisco Montalván Toala, PhD.  
**DOCENTE TUTOR**



Ing. Lucrecia Moreno Alcívar, Mg.  
**DOCENTE ESPECIALISTA**



Ing. Lucrecia Moreno Alcívar, Mg.  
**SECRETARIA DEL TRIBUNAL**

Dedico el presente trabajo de titulación a mis padres, quienes me ayudaron a superar obstáculos para continuar con mis estudios.

A mi mamá Nancy Guale, a mis hermanos Michelle Tomalá e Ing. Marcelo Tomalá quienes me brindaron consejos para no desistir cuando los días se complicaban.

A mi pareja, y a la familia Pita Salinas quienes me apoyaron a seguir y poder finalizar esta carrera universitaria.

Y, por último, dedico este logro a todos los que contribuyeron a mi formación universitaria y lo hicieron posible.

*Héctor Manuel Tomalá Guale*

Dedico este proyecto a Dios, quien me sirve de guía en el camino de mi vida, me bendice y me da la fuerza para continuar mis metas sin fallar, además de permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

Para mis padres, que son mis pilares fundamentales, sin duda muestra la dedicación y el amor que como padres ponen en sus hijos por el esfuerzo y las metas alcanzadas, me siento orgullosa de dedicar este proyecto a Juan Bailón Alarcón y Mariana Piguave Santos, que son mis mayores fuentes de inspiración, por su apoyo incondicional, mientras logro mi más anhelada meta.

A mi tío Ricardo Piguave Santos que, a pesar de la distancia, fue quien estuvo siempre interesado sobre el transcurso de mis estudios, sé que este momento hubiese sido de mucha satisfacción para él.

*Idania Mirley Bailón Piguave*



# DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Tomalá Guale Héctor Manuel** y **Bailón Piguave Idania Mirley**, declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUIFERO OLÓN POR EL MÉTODO GOD**” no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,

**AUTORES**



f.

**Tomalá Guale Héctor Manuel**

**CI: 0927961888**



f.

**Bailón Piguave Idania Mirley**

**CI: 2450273616**

# CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Montalván Toala Francisco Javier, PhD

## TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo de titulación “**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUIFERO OLÓN POR EL MÉTODO GOD**”, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, elaborado por el Sr. TOMALÁ GUALE HÉCTOR MANUEL, y la Srta. BAILÓN FIGUAVE IDANIA MIRLEY, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

### TUTOR



f. Montalván

Ing. Francisco Javier Montalván Toala, PhD.

La Libertad, del año 2021

# CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Yo, Figueroa Guale Pedro Jefferson, Magister en Tecnología e Innovación Educativa, con registro en la SENESCYT No. 1049-2019-2103682, por medio del presente tengo a bien CERTIFICAR: Que he revisado la redacción y ortografía del trabajo de titulación **“DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO OLÓN POR EL MÉTODO GOD”**, elaborado por Tomalá Guale Héctor Manuel y Bailón Piguave Idania Mirley, previo a la obtención del título de: **INGENIERO CIVIL.**

Por tal manera he procedido a leer y analizar de manera profunda el estilo y la forma del contenido del texto:

- Se denota pulcritud en la escritura.
- La acentuación es precisa.
- Se utiliza los signos de puntuación de manera acertada.
- No incurre en errores en la utilización de las letras.
- La aplicación de la sinonimia es correcta.
- Se maneja conocimiento y precisión de la morfosintaxis.

Por lo expuesto y en uso de mis derechos como Magister en Docencia y Educación, recomiendo la VALIDEZ ORTOGRÁFICA de sus tesis y dejo a vuestra consideración el certificado de rigor para los efectos legales correspondientes.

Atentamente,



---

Mg. Pedro Figueroa Guale

C.I. 0928122985

E-mail: pjefferson2009@hotmail.com

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí, por brindarme sabiduría y sobre todo salud para poder culminar mis estudios universitarios.

A mi madre Nancy Guale y a mi padre Gregorio Tomalá por ser esa base fundamental y por el gran esfuerzo que hicieron para mi formación académica.

A mi pareja, a mi hijo Alan Tomalá por ser ese impulso para lograr los objetivos propuestos. A mis compañeros de carrera que me brindaron amistad durante esta etapa universitaria.

Agradecer al CIPAT-ESPOL, a su director Dr. Paúl Carrión Mero, a miembros del equipo de trabajo Ing. Carolina Loor, Ing. Joselyn Solórzano, Ing. Ximena Quiñonez, por el trabajo logístico, campo y procesamiento de datos en el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Estatal Península de Santa Elena por permitirme finalizar mi Carrera como Ingeniero Civil. Al Ing. Javier Montalván por compartir todos sus conocimientos a la hora de desarrollar nuestro trabajo de titulación.

*Héctor Manuel Tomalá Guale*

Quiero expresar mi gratitud a Dios cuyas bendiciones siempre han llenado mi vida, y a mis padres que estuvieron en cada paso de este arduo camino demostrándome su confianza desde el primer momento lo que me ha permitido crecer día a día como profesional, gracias por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que conforman la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizarme como profesional en su distinguido establecimiento educativo.

Agradecer al CIPAT-ESPOL, a su director Dr. Paúl Carrión Mero, a miembros del equipo de trabajo Ing. Carolina Loor, Ing. Joselyn Solórzano, Ing. Ximena Quiñonez, por el trabajo logístico, campo y procesamiento de datos en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Ing. Javier Montalván, colaborador clave durante todo este proceso, cuya orientación, conocimiento, enseñanza y colaboración han permitido el desarrollo de este trabajo.

***Idania Mirley Bailón Piguave***

# TABLA DE CONTENIDO

<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO</b> .....	v
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b> .....	vi
<b>CERTIFICACIÓN DEL TUTOR</b> .....	vii
<b>CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA</b> .....	viii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	ix
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xv
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xvii
<b>RESUMEN</b> .....	xviii
<b>ABSTRAC</b> .....	xix
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
Antecedentes.....	4
1.1 Planteamiento del Problema.....	6
1.2 Formulación del Problema.....	8
1.3 Justificación.....	8
1.5.1 Objetivo General .....	9
1.5.2 Objetivos Específicos.....	9
1.6 Hipótesis del Trabajo .....	9
1.7 Delimitación del problema.....	9

1.8	Variables .....	10
1.8.1	Variable dependiente .....	10
1.8.2	Variable independiente .....	10
1.9	Alcance .....	10
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>		<b>12</b>
2.1	Ciclo Hidrológico.....	12
2.1.1	Evaporación.....	13
2.1.2	Precipitación .....	13
2.1.3	Escorrentía superficial.....	13
2.2	Acuífero.....	14
2.3	Tipos de acuíferos .....	14
2.3.1	Acuífero Poroso Interior Libre .....	15
2.3.2	Acuífero Fisurado Libre Interior .....	15
2.3.3	Acuífero Poroso Confinado Interior.....	16
2.3.4	Acuífero Poroso Libre Costero.....	17
2.3.5	Propiedades físicas de los acuíferos .....	17
2.4	Contaminación en aguas subterráneas.....	20
2.4.1	Contaminación por actividades domésticas y urbanas.....	21
2.4.2	Contaminación por actividades agrícolas y ganaderas.....	21
2.4.3	Contaminación por actividades industriales y mineras. ....	21
2.4.4	Contaminación por intrusión marina. ....	22
2.5	Calidad del agua subterránea .....	22
2.6	Vulnerabilidad en los acuíferos .....	23

2.6.1 Clasificación de la vulnerabilidad.....	24
2.6.2 Mapas de vulnerabilidad .....	24
2.6.3 Atributos principales para la construcción de los mapas de vulnerabilidad ....	25
2.6.4 La recarga de acuíferos .....	25
2.6.5 Zona no saturada .....	26
2.6.6 Zona Saturada .....	26
2.7 Metodologías para encontrar la vulnerabilidad de los acuíferos .....	27
2.7.1 Método DRASTIC .....	27
2.7.2 Método GOD .....	28
2.7.3 Aplicación .....	32
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....</b>	<b>33</b>
3.1 Geología de Campo.....	33
3.2 Cartografía Topográfica.....	33
3.3 Delimitación de la Cuenca del Rio Olón .....	34
3.4. Información Climatológica.....	38
3.5 Software Qgis 3.16.9 .....	38
3.6 Software SAGA GIS 2.3.2 .....	39
3.7 Metodología General .....	40
3.7.1 Fase 1: Información Base .....	41
3.7.2 Precipitaciones y temperaturas .....	41
3.7.3 Evapotranspiración Potencial (ETP) .....	42
3.7.3 Trabajo de campo y toma de datos.....	44
3.8 Fase 2: Implementación de la metodología GOD .....	46

3.8.1 Tipo de acuífero (Groundwater) .....	46
3.8.2 Modelo conceptual Acuífero de Olón .....	48
3.8.3 Recursos Hidrogeológicos .....	49
3.8.4 Zona No Saturada (Overlying Strata).....	49
3.8.5 Niveles Piezométricos (Depth).....	50
3.8.6 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) .....	50
3.8.7 Implementación del método GOD .....	51
3.9 Fase 3: Resultados y análisis .....	52
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
4.1 Parámetros físico-químico in situ .....	53
4.2 Evapotranspiración Potencial, ETP .....	54
4.3 SEV.....	54
4.4 Determinación del índice de vulnerabilidad de los pozos del acuífero Olón .....	58
4.5 Mapa de Vulnerabilidad.....	59
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>63</b>
5.1 Conclusiones .....	63
5.2 Recomendaciones .....	64
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>71</b>
Anexo 1.....	71
Anexo 2.....	71
Anexo 3.....	72
Anexo 4.....	72

# LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Representación del ciclo hidrológico.....	12
<b>Figura 2</b>	Acuífero .....	14
<b>Figura 3</b>	Acuífero Poroso interior libre.....	15
<b>Figura 4</b>	Acuífero Fisurado Libre Interior.....	16
<b>Figura 5</b>	Acuífero Poroso Confinado Interior .....	16
<b>Figura 6</b>	Acuífero Poroso Libre Costero .....	17
<b>Figura 7</b>	Porosidad.....	18
<b>Figura 8</b>	Contaminación por intrusión marina .....	22
<b>Figura 9</b>	Componentes de la zona saturada y no saturada .....	26
<b>Figura 10</b>	Valoraciones numéricas de los parámetros del método GOD .....	31
<b>Figura 11</b>	Estratigrafía de columna del río Olón .....	33
<b>Figura 12</b>	Cartografía de Olón.....	34
<b>Figura 13</b>	Imagen satelital de la cuenca del acuífero Olón .....	35
<b>Figura 14</b>	Imagen satelital y recorte de la zona de estudio en archivo ráster .....	35
<b>Figura 15</b>	Imagen en archivo ráster de la zona de estudio .....	36
<b>Figura 16</b>	Modelo digital de elevaciones de la cuenca Olón.....	36
<b>Figura 17</b>	Modelo digital de elevaciones de la cuenca Olón.....	37
<b>Figura 18</b>	Definición de cuenca y drenes de la zona de estudio .....	37
<b>Figura 19</b>	Diagrama de flujo de metodología .....	40
<b>Figura 20</b>	Sondeo para medir niveles de agua en el pozo.....	44

<b>Figura 21</b> Medición de parámetros in situ del agua subterránea en pozo .....	45
<b>Figura 22</b> Acuífero libre costero .....	47
<b>Figura 23</b> Modelo conceptual Acuífero de Olón .....	48
<b>Figura 24</b> Tipos de agua en el subsuelo .....	50
<b>Figura 25</b> Aplicación del método GOD .....	51
<b>Figura 26</b> Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) OL-13 .....	55
<b>Figura 27</b> Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) OL-18 .....	56
<b>Figura 28</b> Ubicación de los pozos y SEV .....	58
<b>Figura 29</b> Mapa de vulnerabilidad .....	60
<b>Figura 30</b> Capa tipo de acuífero G .....	61
<b>Figura 31</b> Capa zona vadosa O .....	61
<b>Figura 32</b> Capa profundidad de nivel D .....	62

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Porosidad de diversas rocas.....	18
<b>Tabla 2</b> Calificación para diferentes valores de permeabilidad .....	19
<b>Tabla 3</b> Significados del factor de ponderación de los parámetros que intervienen en la evaluación de vulnerabilidad en el método DRASTIC.....	27
<b>Tabla 4</b> Clases de vulnerabilidad según el índice DRASTIC.....	28
<b>Tabla 5</b> Clases de vulnerabilidad según el índice GOD .....	29
<b>Tabla 6</b> Definición de las clases de vulnerabilidad.....	30
<b>Tabla 7</b> Registro de datos de cada pozo .....	41
<b>Tabla 8</b> Valores de precipitaciones y temperaturas .....	41
<b>Tabla 9</b> Valores de ETP mensual del año 2018.....	43
<b>Tabla 10</b> Valores de ETP mensual del año 2019.....	43
<b>Tabla 11</b> Coordenadas y profundidades de la cuenca del río Olón .....	45
<b>Tabla 12</b> Parámetros TDS de la cuenca del río Olón .....	46
<b>Tabla 13</b> Modelos de resistividades .....	56
<b>Tabla 14</b> Modelos de resistividades .....	57
<b>Tabla 15</b> Índices de vulnerabilidad .....	59

## RESUMEN

“DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUIFERO OLÓN POR EL MÉTODO GOD”

**Autores:** Tomalá Guale Héctor Manuel  
Bailón Piguave Idania Mirley

**Tutor:** Ing. Montalván Toala Francisco Javier, PhD.

La vulnerabilidad es una herramienta importante para el conocimiento de la contaminación de un sistema. Este proceso se determina para distintas situaciones, ya sea en calidad del aire, calidad del agua, estudios económicos, deslizamientos, entre otros. Los acuíferos son susceptibles a la contaminación por factores extrínsecos e intrínsecos, que inciden en la calidad del agua. El objetivo de este trabajo es determinar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Olón, por la metodología GOD, para el establecimiento de la calidad del agua de abastecimiento. La metodología empleada consistió de tres fases: i) Revisión de la información hidrogeológica existente; ii) Aplicación de un sistema de información geográfica y de la metodología GOD en el acuífero Olón; iii) Análisis de los resultados y obtención del mapa de vulnerabilidad. Los resultados indican que el acuífero en todo su dominio, presenta un alto índice vulnerable. Esta metodología ha permitido ampliar el conocimiento de los factores que inciden en la contaminación, y con ello en la calidad del agua.

**Palabras claves:** *Acuífero costero, Vulnerabilidad, Sistemas de información geográfica, Contaminación.*

# ABSTRAC

“DETERMINATION OF VULNERABILITY TO POLLUTION OF THE OLON  
AQUIFER BY THE GOD METHOD”

**Authors:** Tomalá Guale Héctor Manuel

Bailón Piguave Idania Mirley

**Academic Advisor:** Montalván Toala Francisco Javier

Vulnerability is an essential tool for knowing the contamination of a system. This process is determined for different situations, whether in air quality, water quality, economic studies, landslides, among others. Aquifers are susceptible to contamination by extrinsic and intrinsic factors, which affect water quality. This work aims to determine the vulnerability to contamination of the Olón aquifer, by the GOD methodology, for the establishment of the quality of the supply water. The methodology used consisted of three phases: 1) Review of existing hydrogeological information, 2) Application of a geographic information system and the GOD methodology in the Olón aquifer, y 3) Analysis of the results and obtaining the vulnerability map. The results indicate that the aquifer presents a high vulnerable index in all its domains. This methodology has made it possible to expand knowledge of the factors that affect pollution and water quality with it.

**Keywords:** *Coastal aquifer, Vulnerability, Geographic Information Systems, Pollution.*

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

La vulnerabilidad se define como la situación de fragilidad directamente aplicable a diferentes ámbitos del ser humano y del medio ambiente; es decir, existen poblaciones que enfrentan susceptibilidad por cambios en sus estilos de vida (Brennan, 2017), cabe señalar que la fragilidad en si misma constituye un sistema dinámico, por ser un resultado de una serie de interacción de diferentes factores. Además de otros tipos de vulnerabilidad como los procesos de deslizamientos de tierra que se ven agravados, debido al asentamiento de grupos humanos en lugares inestables con pendientes inadecuadas, provocando diferentes tipos de vulnerabilidades.

La vulnerabilidad producida por actividades antrópicas, podrían alterar de manera significativa la calidad de las aguas subterráneas, teniendo en cuenta que un acuífero es usado para el abastecimiento de la población, así como para la ganadería y agricultura, además para actividades industriales, lo que resalta la importancia de este recurso; por tanto, en ocasiones ciertas actividades del ser humano podrían generar contaminantes que alcancen el acuífero.

La vulnerabilidad natural de un acuífero se da principalmente por las características propias del medio físico, que componen los materiales donde se almacena el agua subterránea. La interacción del agua que se infiltra producto de las precipitaciones y de la escorrentía, que ocurre en la superficie de la cuenca con los materiales presentes, ocasiona diferentes procesos, como la disolución en rocas solubles, mezcla con aguas de mayor concentración, lo que lleva a que disminuya la calidad del agua almacenada.

La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se utiliza para representar las características intrínsecas, que sirven para determinar la susceptibilidad de un acuífero, que se ve afectado adversamente por una carga contaminante. Estas propiedades dependerán de algunos factores como la inaccesibilidad de la zona saturada, características hidráulicas y la capacidad de atenuación del suelo (Foster, Stephen S. D; Hirata, 1991).

En el artículo científico Caracterización Geoeléctrica de la Cuenca del Río Olón para Propuesta de Plan de Explotación (Montalván et al., 2008), manifiesta que, el acuífero que se encuentra sujeto a condiciones de sobreexplotación, por el desequilibrio entre la extracción y recarga, puede ocasionar que la calidad del recurso se vea alterada, por el aumento de la concentración de sales en el agua subterránea, esto se debe por la ausencia de precipitaciones cuando esta es la única fuente de alimentación del acuífero.

Se debe considerar que sí el acuífero se extrae más allá de su límite de suministro, se puede agotar, y peor aún, su calidad disminuirá, por lo que al beber esta agua se debe asegurar que no hay riesgo para la salud de la población. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 80% de las enfermedades gastrointestinales infecciosas y parasitarias están relacionadas con un tercio de las muertes por consumo de agua no potable (Carlos, Daury et al., 2003).

El concepto de contaminación incluye todo proceso que conduce a un deterioro significativo de la calidad física, química y/o biológica de las aguas subterráneas; es decir, al aumentar la demanda y debido a su contaminación, su disponibilidad disminuye generando problemas de suministro. La contaminación tiene su origen en la acción humana, aunque la contaminación de las aguas subterráneas en ocasiones tiene su origen en la naturaleza, pero está estrechamente relacionada con el proceso de degradación ambiental (Auge, 2006).

El concepto de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación tiene en cuenta sí un acuífero se contaminará o no como resultado de actividades en la superficie terrestre. Actualmente, se vienen desarrollando una serie de metodologías para predecir la vulnerabilidad de las aguas subterráneas. Estos modelos matemáticos usan ecuaciones que se aproximan al comportamiento de las sustancias en el medio subterráneo. La mejor manera de representar la vulnerabilidad de un acuífero será mediante la elaboración de mapas, que especifican las zonas de mayor o menor alcance a la contaminación (Carbonell, 1993).

Existen diferentes métodos para determinar la vulnerabilidad en un acuífero, de los cuales, los más empleados son la metodología DRASTIC y GOD. Estos métodos consideran las características hidrogeológicas, que causan una posible fuente de

contaminación del acuífero, por medio de valores de índices de vulnerabilidad, que es la cuantificación ambiental de las características del medio físico (Martínez et al., 1998).

El método DRASTIC fue implementado por Aller (1987) para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), con el objetivo de estudiar la vulnerabilidad inherente de los acuíferos. Además, menciona que los factores más importantes que interfieren con la contaminación de los acuíferos son **D** (nivel manométrico de profundidad), **R** (reposición), **A** (litología del acuífero), **S** (propiedades del suelo), **T** (pendiente topográfica), **I** (propiedades de zonas insaturadas) y **C** (conductividad hidráulica del acuífero) (Aller et al., 1987).

El método GOD fue desarrollado por Foster en el año de 1987. Esta metodología, utiliza tres variables para determinar las zonas de vulnerabilidad: **G**rado de confinamiento hidráulico del acuífero, **O**currencia del sustrato suprayacente en función de su litología y grado de consolidación, **D**istancia al agua como el nivel de profundidad en el acuífero (Foster, Stephen S. D; Hirata, 1991).

Para determinar la vulnerabilidad es necesario obtener información sobre las propiedades físicas y químicas relacionadas con variables que interfieren con el transporte de sustancias, interacciones con suelo, topografía y características del acuífero, estos métodos nos permiten generar un mapa de vulnerabilidad que muestre las áreas más contaminadas con el fin de determinar la capacidad de atenuación de los contaminantes mediante eliminación, retardo y dilución (Carlos et al., 2017).

La provincia de Santa Elena está ubicada en la costa del Ecuador, es actualmente la más joven de las 24 provincias, cuenta con diversos atractivos turísticos arqueológicos, históricos, naturales y culturales. Se divide en tres cantones: Santa Elena, La Libertad y Salinas, aunque sus fuentes estatales en realidad están separadas políticamente, forman un conglomerado urbano. Cubre un área de 3762,8 kilómetros cuadrados y tiene una población permanente de 308,693 personas (INEC, 2010a).

La comuna de Olón fue establecida el 11 de marzo de 1937, se encuentra ubicada en la zona norte de la Provincia de Santa Elena en la denominada ruta del Spondylus,

pertenece a la Parroquia Manglaralto, limita al Norte, Curia; al Sur, Montañita; al Este, Pajiza; y al Oeste Océano Pacífico. Según Jordán & Paute (2019), Olón actualmente cuenta con 4.534 habitantes, tiene un patrimonio natural diverso debido a su ubicación geográfica y a sus hermosas playas con un clima tropical agradable y se caracteriza por tener un tipo de suelo arcilloso.

Esta zona de estudio se localiza sobre sedimentos de origen aluvial. Estos materiales se encuentran a lo largo del valle del río Olón. La composición de estos materiales varía según la disposición en la terraza aluvial, que está conformada por gravas, arenas principalmente, así como un pequeño conglomerado de brechas, envuelto en un material limoso pudiendo encontrarse también betas de arcillas, que se caracteriza por tener baja permeabilidad (Montalván et al., 2008).

En la actualidad, esta zona cuenta con limitados recursos hídricos de agua, dado que la recarga del acuífero se debe a las precipitaciones estacionales, en tiempos de sequía la población es vulnerable al desabastecimiento que puede ocasionar la disminución de los niveles piezométricos, lo que lleva a que los rendimientos de caudal de explotación disminuyan considerablemente.

La falta de agua en los acuíferos en el norte de la provincia de Santa Elena se ha convertido en un problema que afecta de gran manera a las familias. La Junta Regional de Agua de Olón (JRAO), cuenta con 12 pozos para extraer agua del subsuelo y cada pozo tiene una profundidad de entre 25 y 30 metros. Sin embargo, la falta de agua desde noviembre del año pasado sin duda ha agravado el problema, provocando que el agua del manantial se seque (Joffre Lino, 2021).

El propósito de este estudio es determinar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Olón, mediante la metodología GOD, que utiliza parámetros hidrogeológicos del medio físico del entorno del acuífero para identificar las zonas mas vulnerables en un mapa de la zona.

## **Antecedentes**

Santa Elena es una provincia con una gran variedad de atractivos turísticos en toda la zona costera; sin embargo, afronta un grave problema desde hace muchos años, que es

la carencia de agua potable distribuida en la región. En la actualidad, la gestión de este recurso, en gran parte de la zona urbana la realiza la empresa Agua de la Península, AGUAPEN y por medio de Juntas Regionales de Agua, para zonas rurales en el norte de la península (parroquia Manglaralto) (Jiménez et al. 2013).

Esta zona posee una temperatura promedio anual de 25 °C, con precipitaciones, evaporación, evapotranspiración potencial (ETP) promedios anuales, de alrededor de 155 mm, 1100 mm, 1000 mm, respectivamente (Montalván, 2008). En la zona no existen ríos con caudal permanente, haciendo que los acuíferos sean la única fuente para abastecer a las comunidades.

El agua que se extrae del acuífero Olón para abastecimiento de las comunas es gestionada por la Junta Regional de Agua de Olón (JRAO). El agua del subsuelo se distribuye en tres categorías: TIPO 1 dirigidos a todos los comuneros, TIPO 2 destinados a casas residenciales y el TIPO 3 para industrias y fábricas existentes de la zona (Montalván et al., 2008).

La JRAO, posee doce pozos de extracción, con los que se abastece a las comunidades de: Olón, Curía, San José, La Núñez y La Entrada, que alcanzan una población local de aproximadamente 29512 personas (INEC, 2010b). En la temporada playera en los meses de enero a abril puede triplicarse el consumo, ocasionando que el rendimiento de los pozos y la calidad del agua disminuya, debido a la depresión de los niveles piezométricos.

La comuna Olón tiene un considerable incremento desarrollo social, aun así, se conoce que uno de sus principales problemas es que carece de servicios básicos principalmente de agua potable y alcantarillado sanitario y pluvial. Este último genera un problema ambiental severo porque no existe un sistema de recolección y tratamiento adecuado de aguas residuales, que provoca que las comunidades utilicen letrinas o fosas sépticas que contaminan las aguas del subsuelo, que en ocasiones alcanzan los acuíferos.

En zonas rurales, uno de los factores de importancia como la falta de disponibilidad de agua, junto con la escasez económica, pueden provocar que familias se encuentren viviendo en entornos insalubres, y con ello, sus oportunidades de salud y desarrollo

están en alto riesgo. Incluso, puede aumentar la mortalidad, especialmente en los niños, porque las aguas residuales contienen patógenos que afectan la calidad del agua de abastecimiento (Rights, 2011).

La ganadería libre, es otro factor que puede afectar el acuífero, debido a que genera purines, que son depositados sobre la superficie de la cuenca y que no son gestionados adecuadamente, ocasionando que las zonas de recarga durante las precipitaciones infiltren parte de estos residuos al subsuelo, lo que provoca contaminación de suelo y agua, con consecuencias al deterioro de los flujos hídricos emplazados en la cuenca.

La JRAO gestiona y maneja información del agua subterránea, mediante seguimientos que realizan en conjunto técnicos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y de la propia Junta. Actualmente existen doce pozos de extracción, de los cuales 9 funcionan las 24 horas y 3 no poseen bombas.

## **1.1 Planteamiento del Problema.**

La Comuna de Olón posee un déficit hídrico, en la que la ETP es mayor que las precipitaciones, afectando el abastecimiento de las comunidades que dependen exclusivamente de este acuífero. Además, la sobreexplotación hace que aumente la vulnerabilidad respecto a la calidad del recurso hídrico, por tanto, se destaca la importancia del agua subterránea en esta zona, para el desarrollo social y económico de los habitantes del sector (Henry & Cabrera, 2015).

Otro factor importante es el suministro de agua potable debido a la falta de recarga artificial del acuífero que se da por las precipitaciones solo en temporadas, esto causa que la mayor parte del año pasen secos, a su vez el dique artesanal de Olón es una fuente de abastecimiento superficial que alimenta a los pozos mediante bombas de extracción; sin embargo, los pozos no dejan de ser explotados lo que hace que el nivel del acuífero baje y aumente la contaminación.

El acuífero es de tipo poroso libre-costero, se caracteriza por poseer una alta conductividad hidráulica, dado que sus poros se encuentran conectados, por tanto,

permite el flujo de agua de los acuíferos hacia el mar. También al ser costero posee una masa de agua salada en forma de cuña, apoyada sobre la base del acuífero y con el vértice hacia tierra adentro (Montalván, 2008), lo que se conoce como cuña de intrusión de agua de mar.

Al ser de tipo libre es vulnerable a actividades antrópicas ganaderas y agrícolas, además cuando el nivel freático se encuentra más próximo a la superficie del terreno aumenta la vulnerabilidad; es decir, se puede contaminar en menos tiempo debido a la infiltración de contaminantes que se encuentran en la superficie mediante el proceso de recarga, principalmente porque está conformado por arcillas, limos, arenas y gravas de origen aluvial.

El riesgo de contaminación de los acuíferos produce un impacto negativo, llegando a un nivel en el que la calidad del agua se vuelve inaceptable. Existen tres maneras en las que estos contaminantes pueden ingresar al agua subterránea: a) esparciendo productos líquidos o solubles en agua en la superficie del suelo, b) colocando alguna sustancia en el suelo por encima del nivel del agua subterránea, y c) inyectando sustancias contaminantes debajo del nivel freático (IGME, 1991b).

La estructura del acuífero puede generar diferentes fuentes de contaminación, su porosidad, profundidad y alta permeabilidad hace que sea más vulnerable al ingreso de sustancias, mediante el proceso de recarga en las terrazas aluviales, que podría mezclarse con patógenos presentes en el suelo. Los pozos de agua que se ubican aguas abajo de una comunidad, la que gestiona las aguas residuales por letrinas y fosas sépticas contamina el agua subterránea, debido al efecto del gradiente hidráulico, alterando la calidad del agua (Carlos, Daury et al., 2003).

Para enfrentar la problemática es importante conocer y comprender las fuentes de contaminación, con el fin de implementar métodos que puedan identificar de manera específica los parámetros definatorios de uso del suelo y con sus respectivos mapas de vulnerabilidad, mostrando las áreas afectadas donde será posible desarrollar medidas específicas permitiendo un control y monitoreo periódico para proteger el acuífero de la cuenca de río Olón, empleando un plan de monitoreo y control en las zonas más críticas del acuífero.

## **1.2 Formulación del Problema**

¿Es posible que la metodología GOD defina las zonas de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Olón?

## **1.3 Justificación**

Las comunas de Olón, Curía, San José, La Núñez y La Entrada, poseen alrededor de 29512 habitantes (INEC, 2010b), todos ellos abasteciéndose de la misma fuente de agua. El acuífero está constituido de materiales de edad Hologénica, principalmente por gravas, arenas, limos, arcillas, que hace que sea muy poroso y permeable, provocando en sí riesgos de contaminación, por infiltraciones de líquidos o sustancias contaminantes.

El agua es vulnerable a la contaminación debido a los diferentes aspectos ambientales, por lo que es necesario conocer y comprender los diferentes factores de vulnerabilidad que permiten definir el tipo de riesgo en el que se encuentra la zona y de esta manera fomentar la utilización de estrategias adecuadas para la protección del agua, pudiendo adoptar métodos que permitan entender la dimensión del problema.

La importancia de este proyecto de investigación es conocer las zonas más vulnerables del acuífero, creando perímetros de protección en puntos estratégicos, consiguiendo de esta manera controlar la calidad del agua del subsuelo, todo esto gracias a que se conocen los diferentes índices de vulnerabilidad a lo largo del acuífero. De esta forma podemos evitar enfermedades y con ello mantener un turismo sostenible y ecológico.

Una vez determinada la vulnerabilidad del acuífero Olón a través del método GOD, se elaborará un mapa que muestre las zonas donde se produce el mayor y menor riesgo de contaminación, lo que permitirá desarrollar medidas para controlar los factores contaminantes que intervienen en los acuíferos, y de esta manera mejorar la calidad del agua.

## **1.5 Objetivo de la Propuesta.**

El proyecto de investigación plantea los siguientes objetivos.

### **1.5.1 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es determinar la vulnerabilidad del acuífero Olón por la metodología GOD para el establecimiento de la calidad del agua.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

Para cumplir el objetivo general planteado en este proyecto de investigación se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Determinar los parámetros hidrogeológicos mediante medidas de campo para obtener las condiciones de contorno de la metodología GOD.
- Elaboración de un mapa de vulnerabilidad por sistema de información geográfica para el conocimiento de las zonas de interés.

## **1.6 Hipótesis del Trabajo**

La calidad del agua para abastecimiento del acuífero Olón puede gestionarse por la vulnerabilidad mediante el método GOD.

## **1.7 Delimitación del problema**

País: Ecuador

Provincia: Santa Elena

Cantón: Santa Elena

Lugar: Comuna Olón

Área: Acuíferos

Tipo: Poroso libre costero

Campos de acción: Sistema de información geográfica

Metodología: Método GOD

Objeto de estudio: Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

Software: Qgis 3.16.9

Programa Informático: SAGAGIS 2.3.2

## **1.8 Variables**

Las variables para determinar el índice de vulnerabilidad del acuífero Olón son:

### **1.8.1 Variable dependiente**

Vulnerabilidad.

### **1.8.2 Variable independiente**

Niveles piezométricos.

Tipo de suelo.

Tipo de acuífero.

## **1.9 Alcance**

La finalidad del proyecto investigativo es determinar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Olón, a través del método GOD, el cual toma en cuenta el tipo de acuífero estudiado, la litología y la profundidad del niveles piezométricos, lo que nos ayuda a determinar y obtener niveles de agua subterránea, información básica de movimiento y comportamiento, como la dirección del flujo, la ubicación de la recarga del acuífero y descarga del acuífero de Olón que nos permite determinar el índice de vulnerabilidad de diferentes sectores mediante los parámetros anteriores y puede reflejarse en el mapa de vulnerabilidad, que conducen a la toma de decisiones preventivas para la correcta gestión del agua (Ordoñez, 2011).

El acuífero de Olón es un reservorio poroso y permeable, por medio de esta investigación se busca comprender todas las características posibles para comprender su comportamiento y el área de interés con la ayuda de la información geográfica, este es el mapa de vulnerabilidad, dado que estos parámetros permiten evaluar la protección del medio geológico frente a la contaminación de las aguas subterráneas.

Cualquier método utilizado para tal fin depende claramente de la cantidad de investigación favorable. Estos estudios contribuyen al desarrollo de programas de

educación ambiental que permitan el uso responsable del suelo sin causar daños en el futuro, es importante gestionar la plena implementación de los recursos hídricos para poder proporcionar agua potable suficiente y de alta calidad para la población, con un uso más detallado para garantizar una gestión sostenible en la comunidad de Olón.

# CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

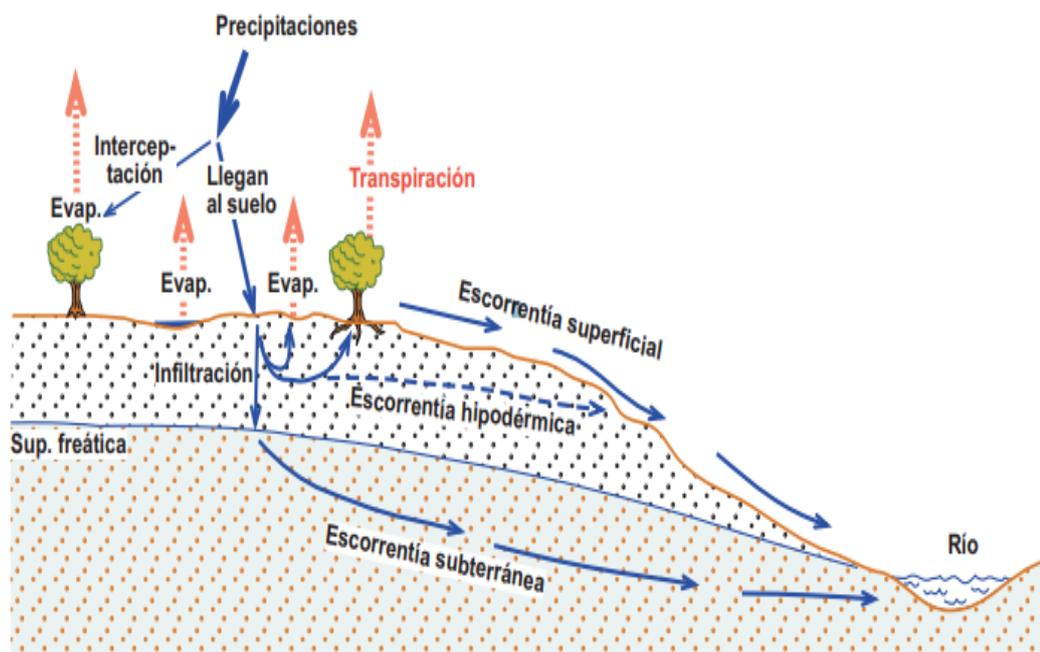
## 2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es de gran importancia para los entornos naturales y la regulación del clima, es el proceso por el cual el agua transporta materia y energía cuando pasa por diferentes estados como son: sólido, líquido y gaseoso. En el ciclo hidrológico ocurren tres fenómenos principales: evaporación, precipitación y escorrentía superficial (Gómez, 2003).

Linsley & Kohler (1977), nos describe que, en condiciones adecuadas, el vapor se condensa en nubes y las nubes pueden convertirse en precipitaciones. La precipitación que cae sobre la tierra se dispersa de diversas formas. La mayor parte se retiene temporalmente por el suelo y regresa a la atmósfera a través de la evaporación y transpiración que producen las plantas.

**Figura 1**

*Representación del ciclo hidrológico*



**Fuente:** (López Rodríguez, 2003)

### **2.1.1 Evaporación**

La evaporación es la formación de vapor, el cual se produce por la evaporación del agua sobre la superficie de los océanos, ríos, lagos y el suelo, el agua también se puede evaporar del tejido de las plantas, especialmente de la superficie de las hojas. Este proceso es llamado evapotranspiración (Gómez, 2003).

### **2.1.2 Precipitación**

Es el fenómeno mediante el cual la humedad que se produce en la atmósfera causa una precipitación sobre la tierra, estas ocurren mediante la lluvia, nieve o granizo (Gómez, 2003). Para medir la precipitación se han desarrollado una variedad de instrumentos y técnicas para la obtención de información en las diferentes etapas de la precipitación. Los instrumentos que miden la cantidad e intensidad de las precipitaciones son los más importantes. Existen otros instrumentos que incluyen dispositivos para medir el tamaño y la distribución de las gotas de agua y determinar cuándo comienza y termina la precipitación (Linsley & Kohler, 1977).

### **2.1.3 Escorrentía superficial.**

La escorrentía superficial es el exceso de agua que se encuentra en la superficie, este exceso de agua debe eliminarse durante el drenaje, esto para evitar posibles problemas al momento de drenar. Su cálculo es muy importante para el diseño del tamaño de los drenes (Villón, 2007).

Existen varios métodos para el cálculo de esta escorrentía superficial, las cuales se tienen:

- Método directo.
- Método del balance hídrico.
- Método del número de curva.

Una forma de calcular la escorrentía superficial es utilizar el método de descarga de drenes, si se conoce la precipitación y la descarga, la diferencia entre ellas representa la escorrentía superficial, el método es bastante exacto sobre todo cuando existe una capa impermeable que reduzca la percolación.

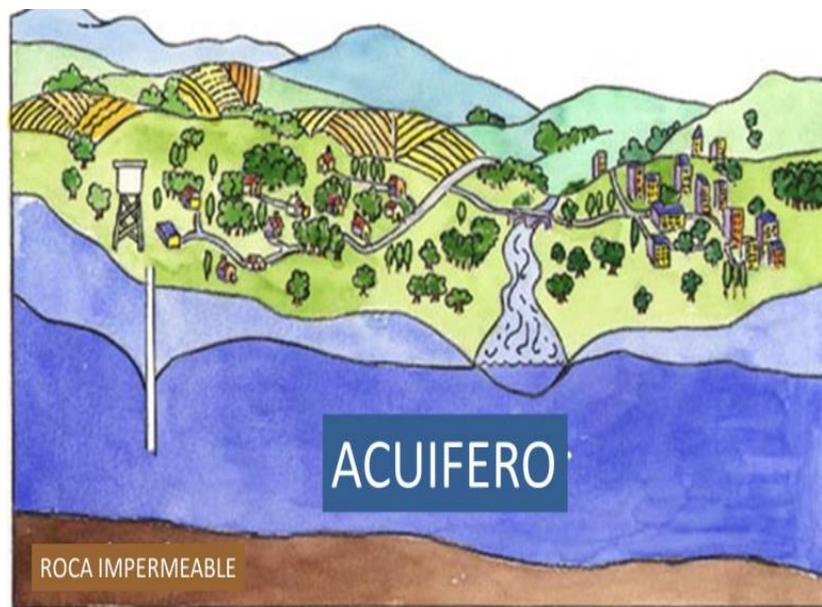
## 2.2 Acuífero

Un acuífero es cualquier estructura geológica que puede almacenar y transportar agua subterránea y puede extraerse en grandes cantidades a través de proyectos de recolección de agua como pozos. El agua almacenada se produce por eventos de precipitación absorbidos por el suelo, donde rellena las cavidades en las piedras de arena, arcilla, grava o subsuelo (Peralta & López Sardi, 2012).

Existen acuíferos que no pueden almacenar ni transportar agua, conocidos como acuífugos porque son materiales impermeables y no porosos, los acuíferos conocidos como acuicludos son los que se permiten retener agua manteniendo una cantidad considerable pero no la transmiten, y los acuíferos tienen la capacidad de almacenar agua, pero poseen dificultad para transmitirla (Collazo & Montaña, 2012).

### Figura 2

*Acuífero*



**Fuente:** (Ordoñez, 2011)

## 2.3 Tipos de acuíferos

Existen algunos tipos de acuíferos, dependiendo sus características se pueden considerar y clasificar los diferentes tipos de acuíferos (IGME, 1991a).

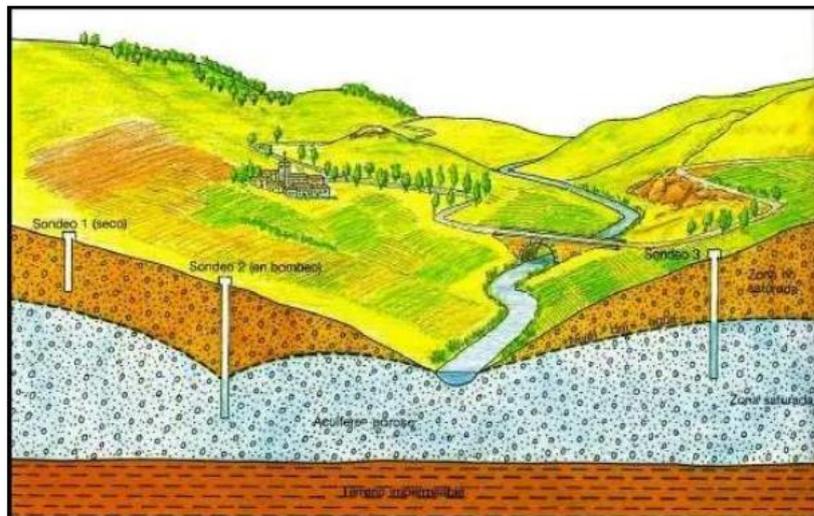
Pueden utilizarse distintos criterios comúnmente empleados, los cuales se establecen según la textura de los materiales que lo conforman, el grado de confinamiento que determina el tipo de acuífero y la situación geográfica.

### 2.3.1 Acuífero Poroso Interior Libre

Este tipo de acuífero generalmente se encuentra constituido por materiales conformado por gravas y arenas lo que hace que posea características de gran porosidad, siendo esta la relación del volumen de vacíos sobre volumen de sólidos; para el caso de las gravas y arenas la porosidad fluctúa alrededor del 45%, la tabla 1 detalla los diferentes tipos de material de suelo con los parámetros promedios de porcentaje de porosidad. El agua circula a través del volumen de poros o vacíos que dejan entre sí las partículas sólidas (IGME, 1991a).

#### Figura 3

*Acuífero Poroso interior libre*



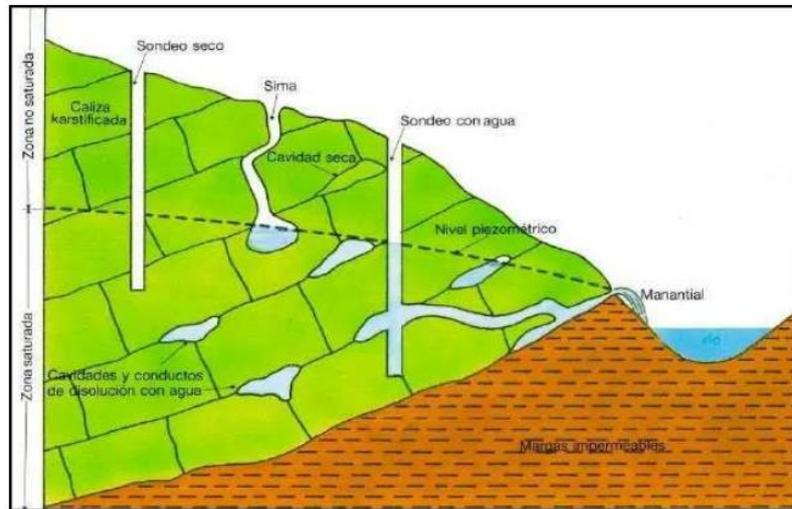
**Fuente:** (IGME, 1991a).

### 2.3.2 Acuífero Fisurado Libre Interior

Este tipo de acuífero está compuesto por rocas consolidadas, por el cual el agua circula por las fisuras y grietas que se forman en las mismas. Por esta razón, es posible que un pozo no encuentre agua y resulte seco a una distancia de otro pozo que haya interceptado alguna cavidad saturada y contenga agua circundante (IGME, 1991a).

## Figura 4

### Acuífero Fisurado Libre Interior



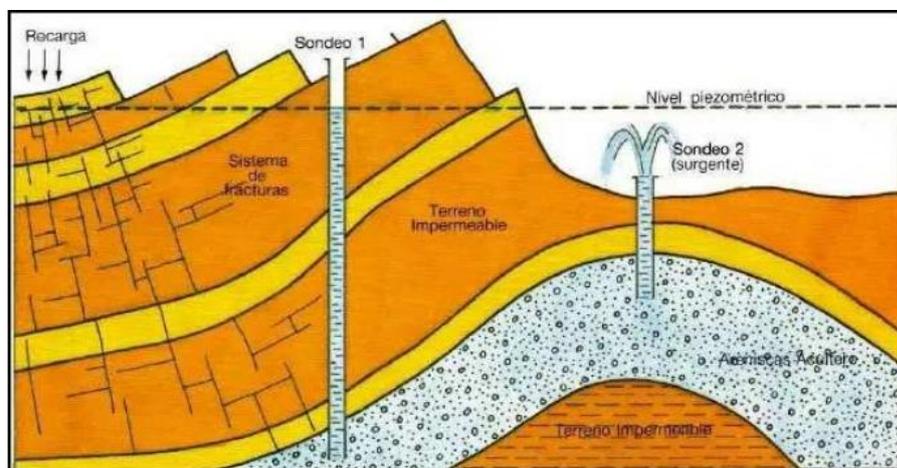
Fuente: (IGME, 1991a).

### 2.3.3 Acuífero Poroso Confinado Interior

En este tipo de acuífero el agua es superior que la presión atmosférica, por tal motivo, al realizar una perforación en los pozos, el agua se eleva por encima del nivel del techo de acuífero (sondeo 1), donde el pozo será surgente si su emboquillado está por debajo del nivel piezométrico, sondeo 2 (IGME, 1991a).

## Figura 5

### Acuífero Poroso Confinado Interior



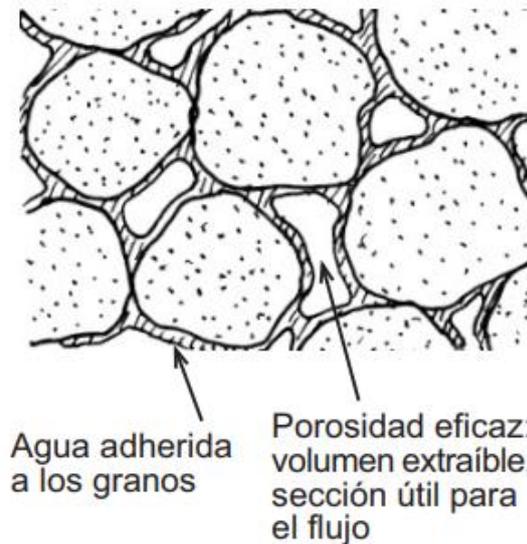
Fuente: (IGME, 1991a).



➤ **Porosidad:** es la relación entre el volumen de espacios vacíos (poros) y el volumen total del suelo. Si tenemos una roca muy porosa esta puede absorber gran cantidad de agua a diferencia a una que no lo sea, influyen varios factores como son su forma, dimensión, tamaño del grano.

**Figura 7**

*Porosidad*



**Fuente:** (Sánchez San Román, 2009)

**Tabla 1**

*Porosidad de diversas rocas*

MATERIAL	POROSIDAD (%)
Arcillas	20-50
Arenas gruesas	25-60
Arena fina	30-60
Arena de playa	80-85
Arenisca	20-35
Caliza	1.5-20
Grava	20-40
Rocas ígneas	0.3-5

**Fuente:** (Silva, 1982)

➤ **Permeabilidad o conductividad hidráulica (K):** Se trata de la facilidad con que el agua atraviesa el acuífero. Depende de características como la porosidad, tamaño, forma y disposición de las partículas, especialmente del tamaño de los poros, porque si las condiciones son las mismas, tendrá mayor permeabilidad. También está determinada por la viscosidad y peso específico que depende en gran medida de la temperatura, por lo que, dado que la temperatura en el agua subterránea es estable, la influencia de estos parámetros es insignificante.

Para calcular la permeabilidad o gradiente hidráulico, se utilizó el caudal de los pozos que están en uso y la sección existente entre ellos.

$$K = \frac{\text{Caudal } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right)}{\text{Sección } (m^2)}$$

**Tabla 2**

*Calificación para diferentes valores de permeabilidad*

<b>K(m/día)</b>	<b>CALIFICACIÓN ESTIMADA</b>
K < 10 <sup>-2</sup>	Muy Baja
10 <sup>-2</sup> < k < 1	Baja
1 < k < 10	Media
10 < k < 100	Alta
K > 100	Muy Alta

**Fuente:** (IGME, 1991a)

➤ **Transmisividad (T):** se refiere a la cantidad de agua y su capacidad para transportar agua horizontalmente a través del espesor saturado del acuífero; es decir, a

la distancia entre la base del acuífero y el nivel freático, esto debido a su gran extensión horizontal.

➤ **Total de sólidos disueltos (TDS):** Es una fracción del total de sólidos en el agua, compuestos por sustancias orgánicas solubles e inorgánicas coloidales. Los sólidos disueltos en el agua afectan la evaporación cuando se introducen sustancias que hacen que las moléculas sufran alteraciones haciendo que sean pegajosas. Otro efecto es que refleja radiación solar, reduciendo así la cantidad de energía que se le entrega. Este resultado es menos evaporación (Truque, 2017).

La OMS determina una concentración de 1000 mg/l para los sólidos disueltos. Estos valores podrían variar según en la cantidad establecida por cada país, ya sea por encima o por debajo de los estándares de la OMS. La proporción de países que adoptaron las recomendaciones de las Directrices fue del 60%, y la aceptación de los países fue buena (Truque, 2017).

## **2.4 Contaminación en aguas subterráneas**

La contaminación de las aguas subterráneas es la alteración de su calidad natural que inhabilita el recurso para el uso al que se destina, es una consecuencia directa o indirecta del comportamiento humano que perjudica la calidad de las aguas, una de las principales amenazas del deterioro y contaminación de las aguas subterráneas es debido al crecimiento poblacional desordenado en la zona de recarga del acuífero donde esta es su fuente principal de abastecimiento, los desechos sólidos y líquidos generados por los residuos domésticos e industriales provocando incomodidad y malos olores que llevan al deterioro de estas aguas.

De acuerdo con (Fuentes, 2017), existen diversas fuentes de contaminación hacia el recurso hídrico subterráneo, y sus causas se pueden clasificar en cuatro categorías según su origen o procedencia y estas son las siguientes:

- Contaminación por actividades domésticas y urbanas.
- Contaminación por actividades agrícolas y ganaderas.
- Contaminación por actividades industriales y mineras.
- Contaminación por intrusión marina.

### **2.4.1 Contaminación por actividades domésticas y urbanas**

Las principales fuentes de contaminación son producidas por actividades domésticas, industriales y municipales. A pesar de que la contaminación del acuífero no aparecerá de inmediato se puede extender de manera en la que técnicos dedicados a estos temas sean los únicos capaces de evitar o disminuir la contaminación que se esté provocando (la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

Los residuos líquidos de los hogares y de las actividades urbanas se descargan a las cajas de registro y cámaras de los colectores a los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial, en las zonas rurales las aguas residuales suelen ser evacuadas a través de fosas sépticas, letrinas o tanques de aguas residuales, causando un mayor riesgo de contaminación cuando estos líquidos se infiltran desde la capa del terreno natural hasta las del subsuelo que conforman al acuífero (Fuentes, 2017).

### **2.4.2 Contaminación por actividades agrícolas y ganaderas.**

La contaminación agrícola y ganadera es producida por la utilización de fertilizantes químicos en el sector agropecuario y estiércol causado por la actividad ganadera, esto provoca una fuente de contaminación en los acuíferos. El uso de fertilizantes genera un mayor grado de contaminación como toxicidad, persistencia en el suelo, grado de solubilidad y concentración del producto. En tanto la actividad ganadera produce un tipo de estiércol sólido o fluido, que contiene una fuente importante de nitrógeno, por lo que pueden contaminar las aguas subterráneas cuando se concentra con el suelo en zonas inadecuadas (Fuentes, 2017).

### **2.4.3 Contaminación por actividades industriales y mineras.**

Al eliminar el humo y otros compuestos gaseosos, así como el suelo y el agua, las emisiones líquidas, sólidas y semisólidas contaminan la atmósfera, también cae solo o es arrastrado por la lluvia debido a la penetración de contaminantes atmosféricos. La industria produce la mayoría de los tipos de contaminantes y la gama más amplia en los países desarrollados, a fines de la década de 1980 se estimaba que

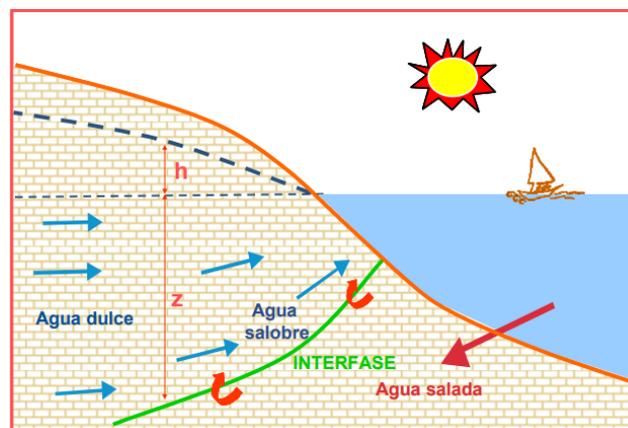
la nómina de los compuestos orgánicos era de alrededor de 1 millón, de estos, unos 40.000 se producen y utilizan de forma rutinaria, aunque algunos tienen diversos grados de toxicidad (Auge, 2006).

#### 2.4.4 Contaminación por intrusión marina.

La contaminación por intrusión marina es causada cuando se introduce agua de mar en el acuífero (Fuentes, 2017). La salinización es una de las formas más comunes de contaminación de agua en el mundo. La extracción de agua subterránea en acuíferos costeros afecta las condiciones naturales de la descarga de agua dulce al mar y conduce a la inversión del flujo de agua subterránea cuando se produce un bombeo en el agua dulce, haciendo que el agua de mar disminuya lo que hace que la cuña de agua salada avance tierra adentro elevando los niveles de interfase (Canales et al., 2016).

#### Figura 8

*Contaminación por intrusión marina*



**Fuente:** (Instituto Geológico y Minero de España, 2009)

### 2.5 Calidad del agua subterránea

El agua subterránea es un recurso limitado muy importante que posee una alta vulnerabilidad a la contaminación por diferentes factores como; naturales o antropogénicos que alteran sus condiciones físicas, químicas y biológicas que a su vez puede transformar este recurso en no apto para las actividades humanas (Castillo-Herrera et al., 2019).

Desde el punto de vista hidrogeológico el agua que va dirigido al consumo humano debe tener características determinadas por los estándares de consumo para que no perjudiquen la salud del ser humano, la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos para ciertos tipos de uso depende fundamentalmente de la calidad fisicoquímica, biológica y radiológica (Gorchev & Ozolins, 1984).

La calidad del agua es definida por su composición y por el conocimiento de los efectos que pueden causar sus componentes, el conjunto de todos los elementos que la componen permite establecer estándares de calidad de agua para clasificarla según las restricciones establecidas y su uso aplicable (humano, agrícola, industrial, o abrevadero de ganado) (Collazo & Montaña, 2012).

## **2.6 Vulnerabilidad en los acuíferos**

La vulnerabilidad de los acuíferos es una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de los impactos humanos y naturales. Estudiar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero nos permite conocer y planificar estrategias de desarrollo para su conservación y uso correcto del mismo, manteniendo las condiciones naturales del acuífero y de esta manera asegurar la calidad y cantidad del embalse (Díaz, Rivera, 2013).

La determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos suele tener en cuenta los tipos generales de diferentes contaminantes, pero en algunos casos es necesario determinar la vulnerabilidad específica que altera la calidad natural del agua subterránea. Esta situación se aplica en regiones que cubren grandes áreas que dependen exclusivamente de este acuífero e implican efectos de riesgos lo que provoca que su vulnerabilidad aumente. Un ejemplo evidente de esta situación es la contaminación agrícola, especialmente causada por la reutilización de aguas residuales y los residuos sólidos que generan malos olores y gases.

Esta es una práctica bastante común en algunos países, en la actualidad la reutilización de aguas residuales se considera una solución alternativa como parte del ciclo hidrológico, ya que tiene un amplio abanico de posibilidades para utilizar adecuadamente los recursos hídricos, lo que nos permite proteger el medio ambiente

evitando la descarga de aguas residuales al océano o en los ríos y provocar efectos adversos, como eutrofización, mal olor, efectos visuales o contaminación directa de otras aguas. Asimismo, se ha confirmado que las aguas residuales contienen altas concentraciones de bacterias coliformes que a menudo se encuentran en el agua.

Al realizar una evaluación a la vulnerabilidad nos proporciona resultados para la obtención de mapas que indican las zonas que tienen un grado de sensibilidad mayor o menor respecto a la contaminación, estos mapas nos permiten estudiar la vulnerabilidad que se presenta en la zona de estudio, pero no podemos hablar de ellas de manera absoluta. Al elaborar un mapa de vulnerabilidad generalmente implica combinar varios mapas temáticos correspondientes a diferentes factores hidrogeológicos para esta investigación (Díaz & Rivera, 2013).

El propósito de la vulnerabilidad incluye planificar el correcto uso del suelo y el avance de las políticas de protección de las aguas subterráneas, se debe crear un inventario que nos permita identificar las vulnerabilidades exactas que pueden existir en el acuífero a estudiar.

### **2.6.1 Clasificación de la vulnerabilidad**

Según Bereciartua (2003), existen dos tipos de vulnerabilidad: la vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica. La primera está dada por las características hidrológicas, geológicas y bio geofísicas del terreno y la vulnerabilidad específica considera la capacidad de respuesta de uno o varios contaminantes, tiene en cuenta factores como la climatología o actividades antrópica de la región.

### **2.6.2 Mapas de vulnerabilidad**

El mapa de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas se desarrolló en las décadas de 1960 y 1970, donde se llevaron a cabo investigaciones para abordar la contaminación, la protección y la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en varios países. De acuerdo con (Valcarce Ortega & Jiménez Reyes, 2016), se debe considerar como una de las herramientas para la gestión ambiental, además se puede utilizar para elegir decisiones sobre la gestión de los recursos de aguas subterráneas para identificar áreas susceptibles a la contaminación y decidir

sobre las investigaciones y redes de monitoreo, en planes informativos y educativos sobre la necesidad de proteger los acuíferos.

La mejor manera de representar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, será mediante la elaboración de mapas, además con la utilización de los diferentes métodos existentes permiten definir sus respectivos índices, y con la ayuda de parámetros establecidos poder demostrar gráficamente la clasificación y el grado de vulnerabilidad en la que se encuentra la zona a estudiar (Vázquez, 2001). Con respecto a la contaminación del agua, los primeros conceptos y métodos de los mapas de las aguas subterráneas se desarrollaron en los Estados Unidos y otros países desarrollados a mediados de la década de 1960 (Sagua, 2018).

Cuba también ha participado en la elaboración de mapas de vulnerabilidad de los acuíferos basados en una rica información geológica, hidrogeológica y meteorológica, combinada con el desarrollo y asimilación de módulos de cálculo, como los sistemas de información geográfica (SIG) y la cartografía digital, permitiendo la elaboración de estos mapas ambientales (Sagua, 2018).

### **2.6.3 Atributos principales para la construcción de los mapas de vulnerabilidad**

Algunos de los principales atributos reportados en la literatura profesional para evaluar la vulnerabilidad inherente del agua subterránea son: recarga de acuíferos, propiedades del suelo y características de las zonas no saturadas y saturadas del acuífero (Sagua, 2018).

### **2.6.4 La recarga de acuíferos**

La recarga de acuíferos se ha utilizado como forma de reservorio durante décadas, este método sigue el objetivo de desarrollar un sistema que permita el almacenamiento de agua durante los períodos de abundancia, como en la temporada de lluvias, para después utilizarlo en los períodos de escasez. (Cortez, 2012), establece que el objetivo es lograr una gestión más eficiente y la racionalidad de los recursos hídricos de acuerdo con:

- La restauración de los acuíferos sobreexplotados.
- Proteger o mitigar los efectos de las inundaciones.

- Almacenar y distribuir agua.
- Tratar las aguas residuales como un proceso de tratamiento terciario.
- Mejorar la calidad del agua superficial.

### 2.6.5 Zona no saturada

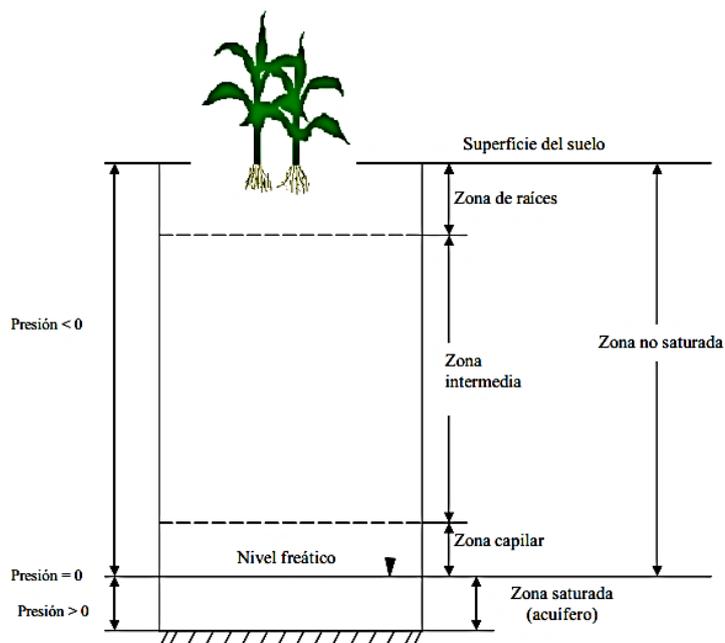
En la zona no saturada del suelo la protección de las aguas subterráneas es sustancial, también en áreas con perfiles de suelo menos desarrollados, debido a procesos importantes como la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo, recargan el sistema de aguas subterráneas y juegan un papel de reabastecimiento (Posada, 2005).

### 2.6.6 Zona Saturada

La zona saturada es la extensión del sistema acuífero, en el que todos los poros se llenan de agua, no es homogéneo y su fragilidad radica en la profundidad. En esta zona, la presión del agua es superior a la de la atmósfera. Además, las características del tipo de acuífero son muy importantes y siempre debe tenerse en cuenta en la evaluación de la vulnerabilidad (Sagua, 2018).

**Figura 9**

*Componentes de la zona saturada y no saturada*



**Fuente:** (Posada, 2005)

## 2.7 Metodologías para encontrar la vulnerabilidad de los acuíferos

En la actualidad existen algunos modelos matemáticos que nos permiten encontrar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. Estos modelos se trabajan mediante información geográfica que nos genera mapas de vulnerabilidad, con la obtención de estos mapas podemos estimar el riesgo de contaminación (Díaz & Rivera, 2013).

El grado vulnerabilidad se puede expresar como el índice de vulnerabilidad de acuíferos (AVI) y la podemos obtener mediante el método DRASTIC y el método GOD (Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater) (Pacheco, 2004).

### 2.7.1 Método DRASTIC

Este método fue realizado por ALLER (1987) para la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA), con el fin de estudiar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos. Además, considera que los factores más significativos que intervienen la contaminación del acuífero son los que asignan el nombre de DRASTIC. Es un método muy difundido para para la obtención del mapa de vulnerabilidad y se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, de acuerdo con las características y comportamiento de las variables consideradas (Aller et al., 1987).

**Tabla 3**

*Significados del factor de ponderación de los parámetros que intervienen en la evaluación de vulnerabilidad en el método DRASTIC*

	<b>Parámetros de Método</b>	<b>Índice</b>
<b>D:</b>	Depth to Water (Profundidad del nivel freático)	5
<b>R:</b>	Recharge (Recarga)	4
<b>A:</b>	Aquifer Media (Litología del acuífero)	3
<b>S:</b>	Soil Media (Tipo de suelo)	2
<b>T:</b>	Topography (Topografía)	1
<b>I:</b>	Impact (Impacto)	5
<b>C:</b>	Conductivity of the aquifer (Conductividad Hidraulica)	3

**Fuente:** (Aller et al., 1987).

El índice DRASTIC se calcula mediante la suma de los datos de los factores de ponderación:

$$\text{Índice de vulnerabilidad DRASTIC} = Dr * Dw + Rr * R_w + Ar * A_w + Sr * S_w + Tr * T_w + Ir * I_w + Cr * C_w.$$

Siendo  $r =$  factor de clasificación y  $w =$  factor de ponderación

#### Tabla 4

*Clases de vulnerabilidad según el índice DRASTIC*

Índice DRASTIC	Vulnerabilidad
> 200	Extrema
180 a 199	Muy Alta
160 a 179	Alta
140 a 159	Moderada
120 a 139	Baja
101 a 119	Muy Baja
< 100	Insignificante

**Fuente:** (Aller et al., 1987).

#### 2.7.2 Método GOD

El método GOD fue desarrollado por FOSTER en el año de 1987, tiene en cuenta tres variables para determinar las zonas de vulnerabilidad. Estas variables son: tipo de acuífero (G), características geológicas (O) y profundidad del nivel piezométrico (D). A este método se les asignan índices entre 0.0 a 1.0 a las tres variables que dan por nombre al método (Foster, Stephen S. D; Hirata, 1991).

**G:** Groundwater occurrence (Tipo de Acuífero).

Estudia las condiciones de confinamiento del acuífero y determina las siguientes categorías: acuífero no confinado, no confinado-cubierto, semi confinado e inexistente. La condición cerrada del acuífero es una función que interfiere

directamente con la vulnerabilidad natural del agua subterránea a la contaminación potencial. En acuíferos confinados, la entrada de contaminantes está más restringida, mientras que, en acuíferos libres la entrada está menos restringida.

**O:** Overall aquifer class (litología de la cobertura).

Este parámetro considera el área cubierta en el acuífero de acuerdo con las propiedades litológicas y el grado de consolidación del acuífero, lo que determina su capacidad de atenuación.

**D:** Depth (Profundidad del agua).

Corresponde a la profundidad del nivel freático en el acuífero libre o la profundidad de la losa superior de la capa de confinamiento en el acuífero confinado.

A estos factores se le establecerá un valor, luego calculamos el índice final multiplicando estos valores, mientras más alto sea el puntaje GOD, mayor será su vulnerabilidad.

***Índice de vulnerabilidad = G.O.D.***

A continuación, se detalla una tabla con las clases de vulnerabilidad según los índices del método GOD.

**Tabla 5**

*Clases de vulnerabilidad según el índice GOD*

Índice GOD	Vulnerabilidad
0.7 a 1.0	Extrema
0.5 a 0.7	Alta
0.3 a 0.5	Moderada
0.1 a 0.3	Baja
0.0 a 0.1	Despreciable

**Fuente:** (Foster, Stephen S. D; Hirata, 1991).

La siguiente tabla nos muestra la definición de las clases de vulnerabilidad de la contaminación a los acuíferos.

**Tabla 6**

*Definición de las clases de vulnerabilidad*

<b>CLASES DE VULNERABILIDAD</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
<b>EXTREMA</b>	Es vulnerable a casi todo tipo de contaminantes causando un impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
<b>ALTA</b>	Es vulnerable a la mayoría de los contaminantes menos a los que son absorbidos.
<b>MODERADA</b>	Es vulnerable cuando los contaminantes son contaminantes descargados o lixiviados.
<b>BAJA</b>	Solo vulnerable a contaminación cuando son descargados o lixiviados de manera amplia y continua así durante mucho tiempo.
<b>DESPRECIABLE</b>	Presencia de capas confinantes en la que el flujo vertical es insignificante.

**Fuente:** (Foster et al, 2003).

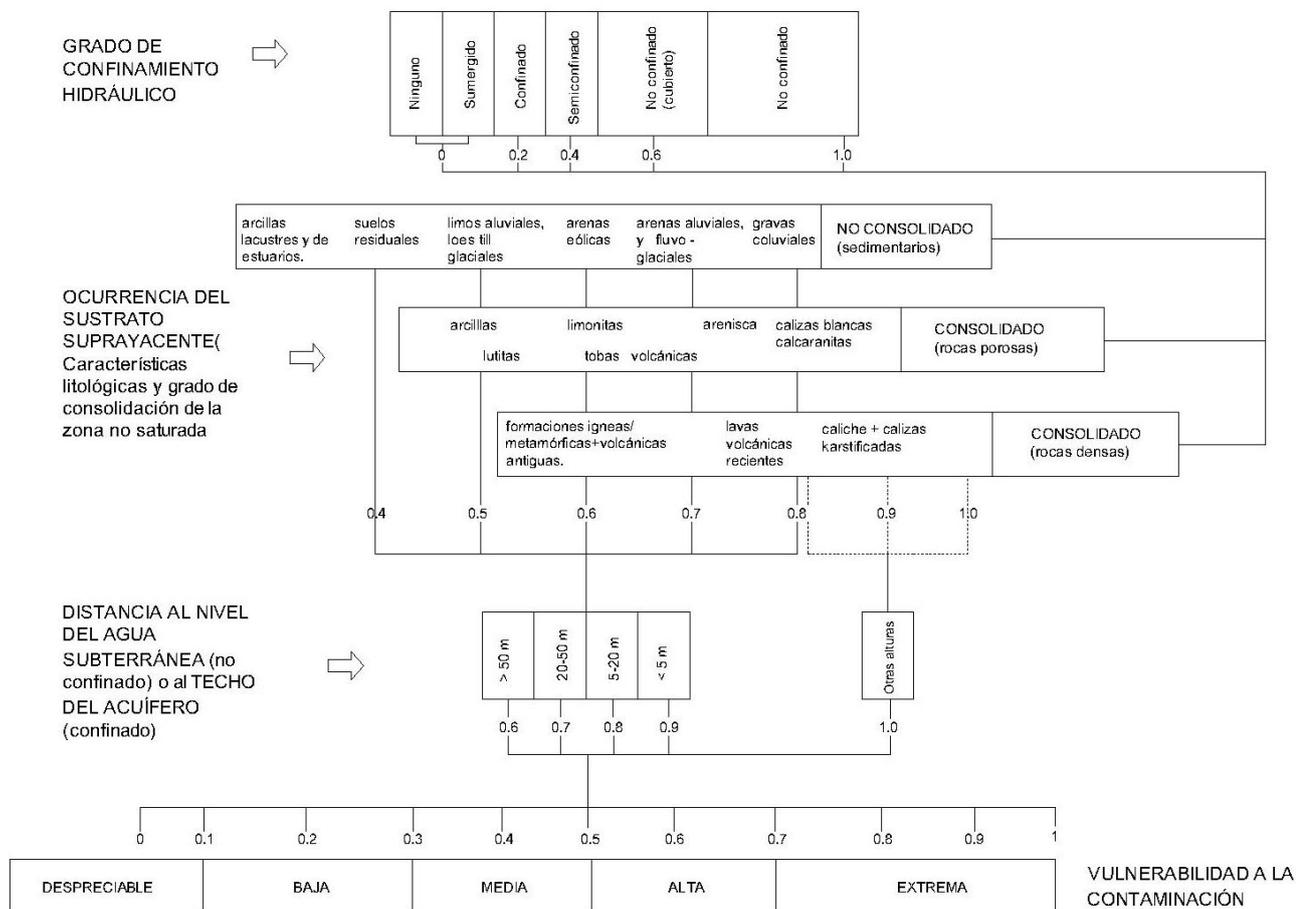
Para estimar el Índice de Vulnerabilidad del método G.O.D, se considera la Figura 10, que involucra una serie de etapas específicas: Primero, determinar el grado de confinamiento hidráulica del acuífero donde se asigna un índice a este parámetro en una escala de 0.0 a 1.0.

Segunda, especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos de: a) No consolidado (sedimentos) conformado por

arcillas lacustres y de estuarios, suelos residuales, limos aluviales, arenas eólicas, arenas aluviales y gravas coluviales que van en un rango de 0.4 a 0.9. b) Consolidado (rocas porosas) conformado por arcillas, lutitas, limolitas, tobas volcánicas, areniscas, calizas blancas calcarenitas que van en un rango de 0.5 a 0.9, c) Consolidados (rocas compactas) que están conformados por formaciones ígneas, lavas volcánicas recientes, caliche y calizas que van de un rango de 0.6 a 1.0 respectivamente.

**Figura 10**

*Valoraciones numéricas de los parámetros del método GOD*



**Fuente:** (Foster et al, 2003).

Tercera, se estima la distancia o profundidad del nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad hasta la parte superior del techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0.6 a 1.0. El índice de vulnerabilidad del acuífero obtenido por el método GOD es el producto de los índices obtenidos para cada uno de estos parámetros (Fig. 10), mostrándonos así el

nivel de vulnerabilidad a la contaminación en el que se encuentra el acuífero, en una escala de 0.0 a 1.0, donde cero es despreciable y uno es extremo (Foster et al., 2003).

### **2.7.3 Aplicación**

El método que se aplicó fue la metodología GOD utilizando el software QGIS, que es una herramienta de sistema de información geográfica (SIG), esta se utilizó debido a que la escala de mapas en sus bases disponibles variaba entre los 50.000-100.000, del cual se procedió a realizar en toda la cuenca hidrogeológica del acuífero de Olón localizada al norte de la península de Santa Elena por la denominada Ruta del Spondylus, para posteriormente extraer el área delimitada de mayor o menos alcance.

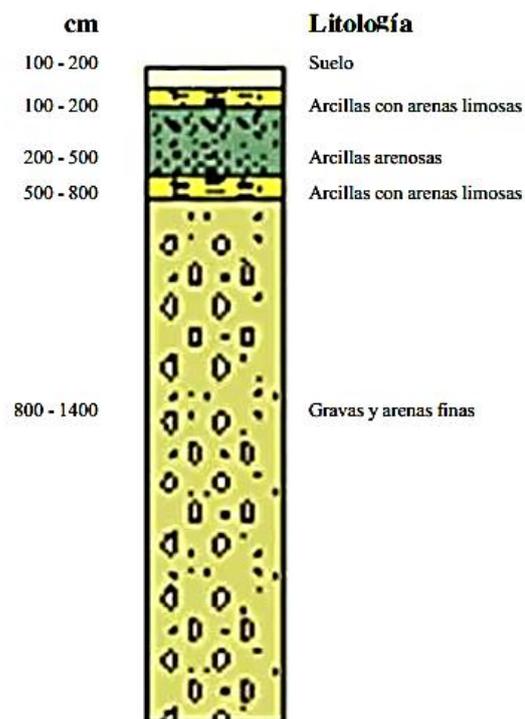
## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

### 3.1 Geología de Campo

El trabajo de campo consistió en recorrer el cauce del río Olón para recolectar información estratigráfica (fig 11.), el cual está conformado por arcillas, limos, arenas y gravas de origen aluvial que es el material de interés donde se almacena el recurso hídrico, el mismo que cuenta con una profundidad estimada entre 12 y 27 m.

**Figura 11**

*Estratigrafía de columna del río Olón*



**Fuente:** (Montalván, 2008).

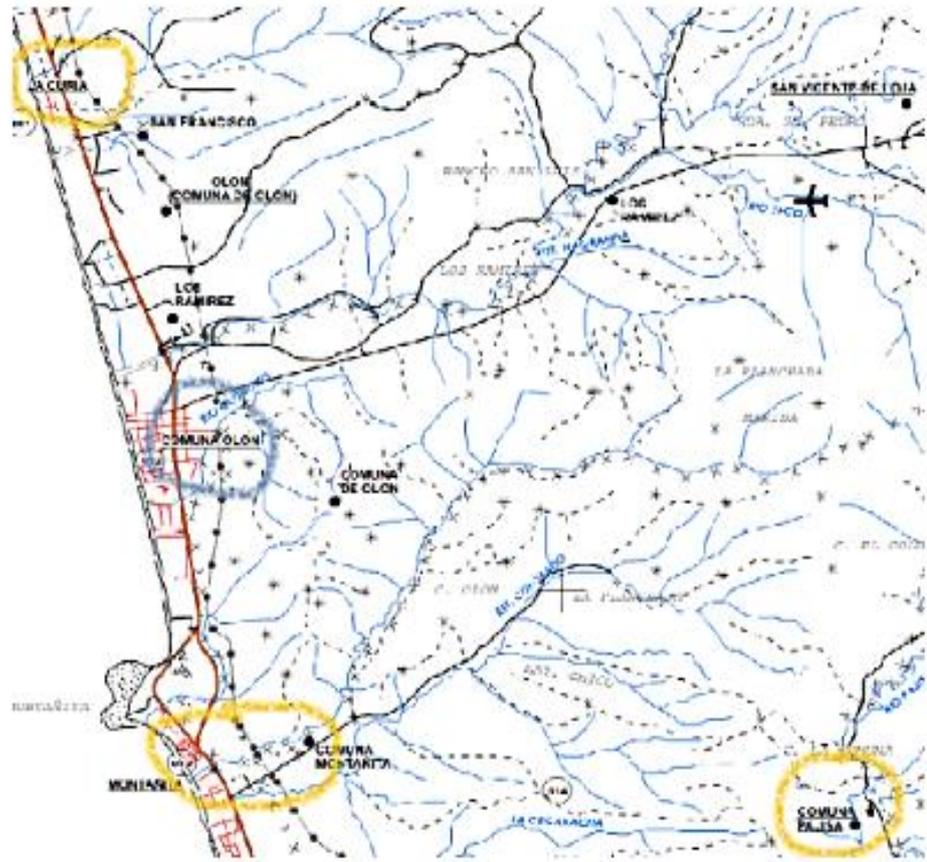
### 3.2 Cartografía Topográfica

La comuna de Olón se localiza en la parroquia Manglaralto, al norte de la provincia de Santa Elena, en la denominada Ruta del Spondylus. Limita al Norte, con Curia; al Sur,

con Montañita; al Este, Pajiza; y al Oeste el Océano Pacífico. Está ubicado en las coordenadas geográficas: S 01 ° 47' 50.5''; O 080 ° 45' 23.6'', y su territorio tiene una superficie aproximada de 5.824 hectáreas, la altitud va desde 5 msnm en la playa hasta 530 msnm en el cerro más alto el Puntón Grande (Yrrazaba, 2015).

## Figura 12

### Cartografía de Olón



**Fuente:** Jasmine Escudero Pinos

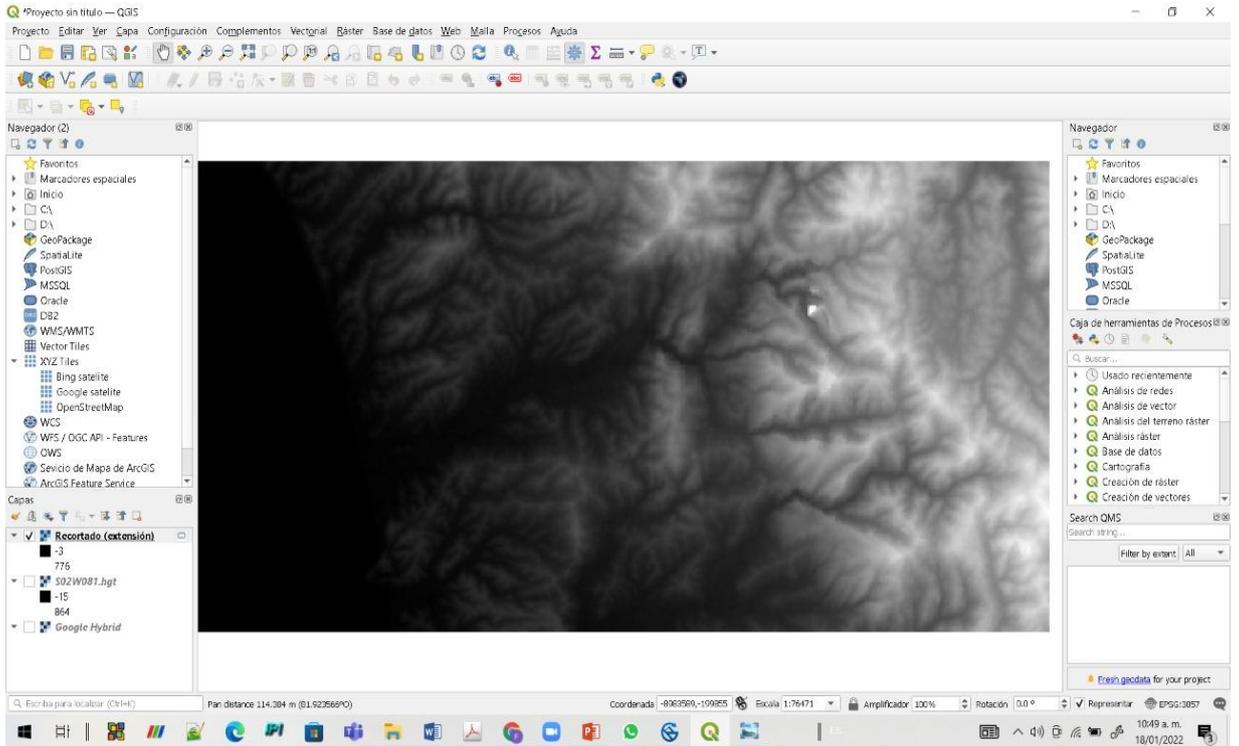
### 3.3 Delimitación de la Cuenca del Río Olón

La cuenca hidrográfica de Olón fue delimitada considerando sus cotas y pendientes que la definen. Se realizó mediante el programa informático QGIS 3.16.9, con el paquete informático SAGAGIS 2.3.2, el cual se describe a detalle en el apartado 3.5. Utilizando el método Determinístico 8, se parte de una imagen satelital Google Hybric, que fue llevada a un archivo ráster para luego ser procesada como un archivo shape. Estas herramientas hidrológicas presentan una utilidad y definición robusta para la delimitación de las diferentes cuencas hidrográficas.



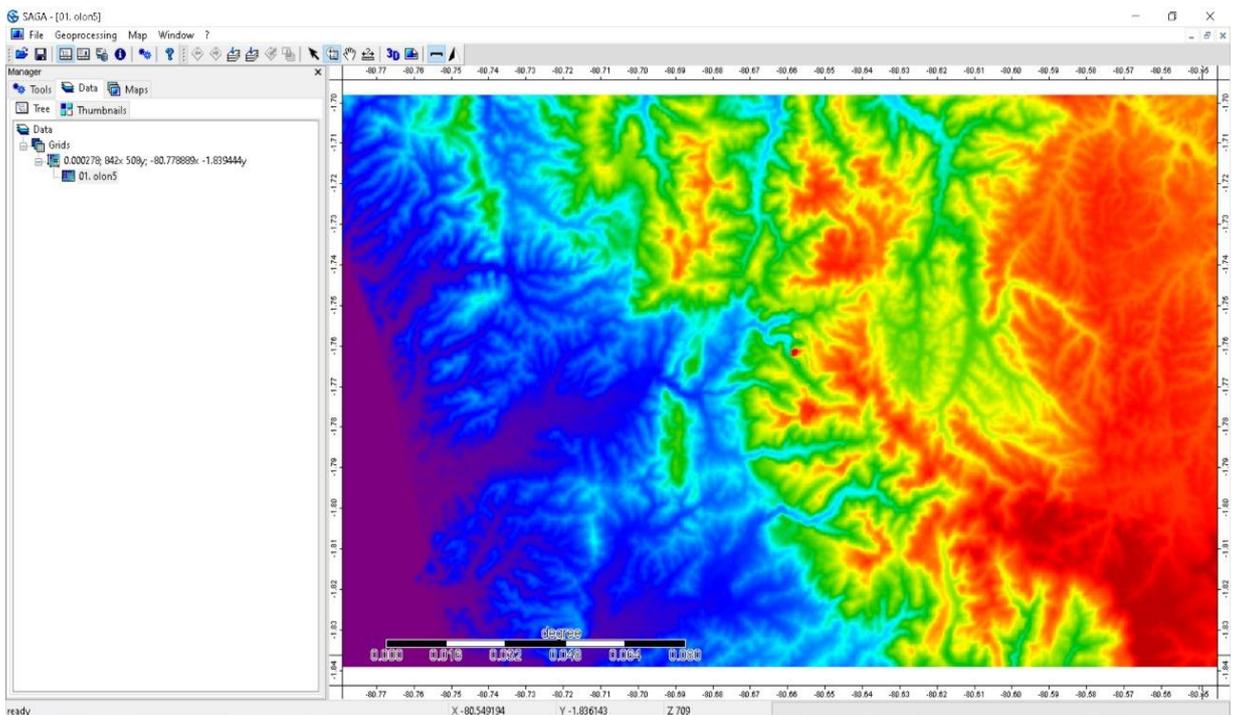
**Figura 15**

*Imagen en archivo ráster de la zona de estudio*



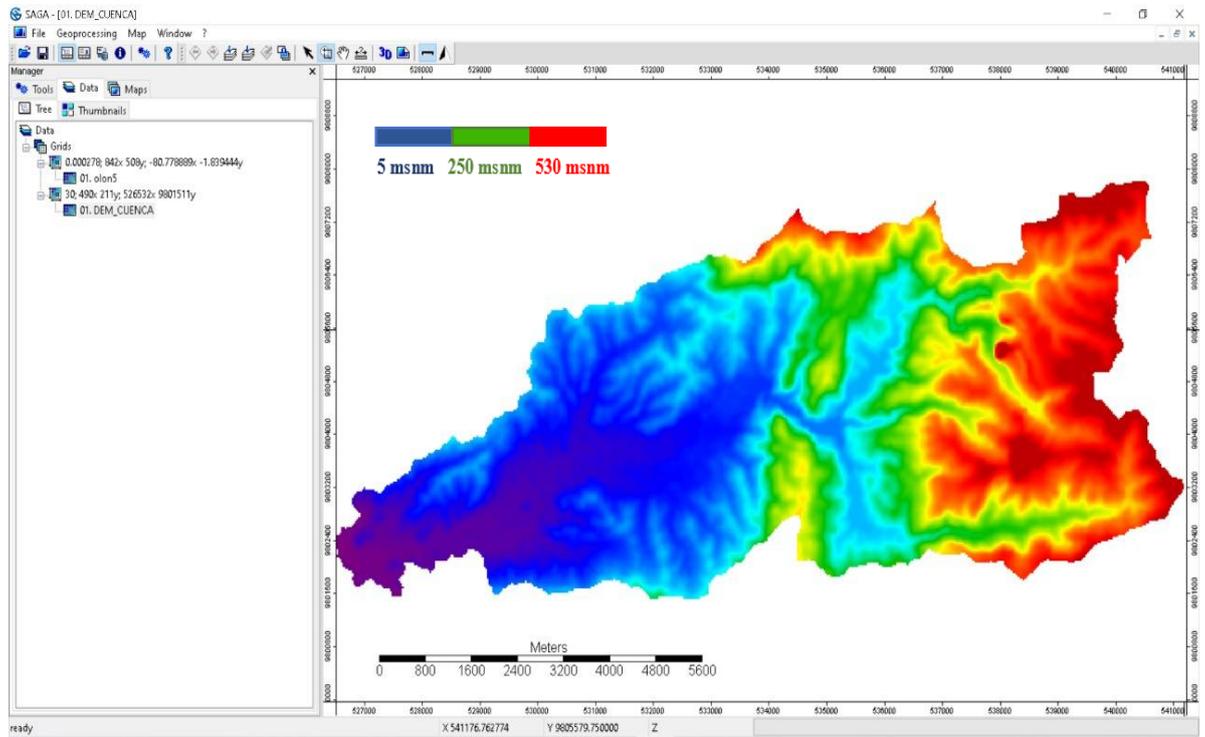
**Figura 16**

*Modelo digital de elevaciones de la cuenca Olón*



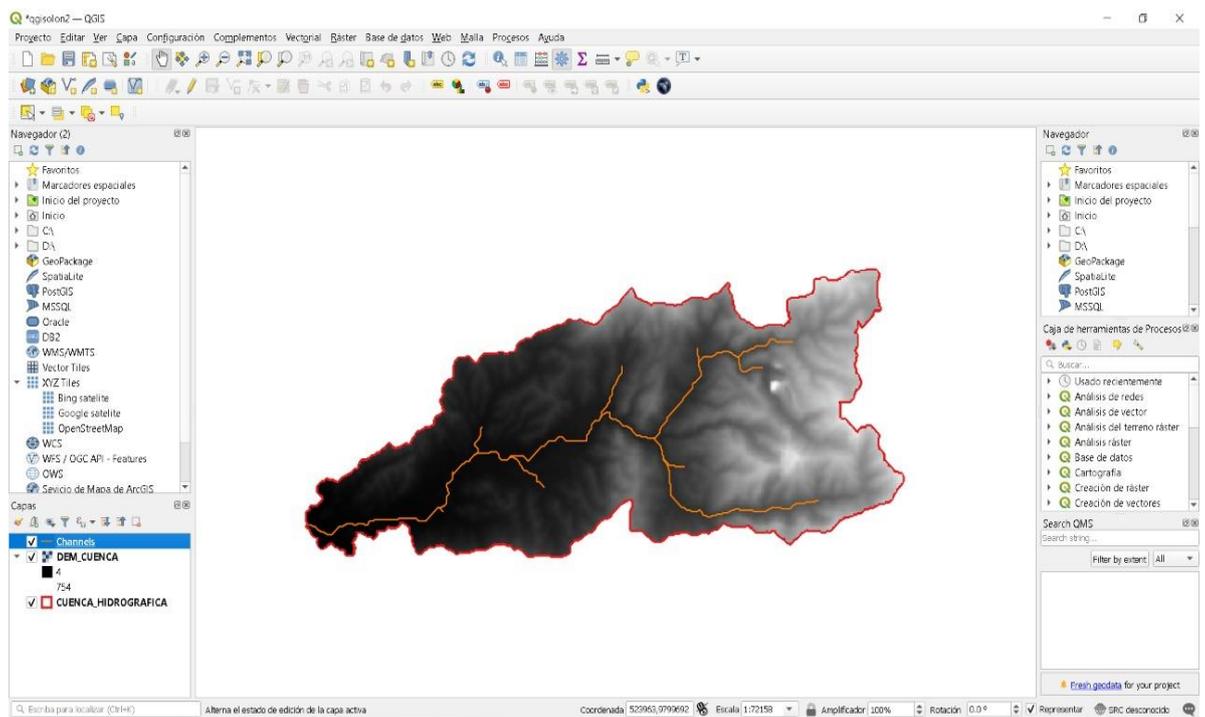
**Figura 17**

*Modelo digital de elevaciones de la cuenca Olón*



**Figura 18**

*Definición de cuenca y drenes de la zona de estudio*



### 3.4. Información Climatológica

El clima del Ecuador está siendo afectado por una serie de factores como la circulación atmosférica, las masas de aires locales causadas por el relieve, las corrientes oceánicas y la cordillera andina. Los fenómenos oceánicos y atmosféricos que ocurren en el Océano Pacífico tropical, son factores decisivos en el comportamiento climático de Ecuador.

Su ubicación costera está al este y adyacente al océano, lo que la convierte en la zona más intensa de El Niño lo que puede provocar que aumenten la temperatura del litoral ecuatoriano en cambio la corriente de Humboldt hace que la temperatura disminuya (Corporación Andina de Fomento, 2000), Estos factores que afectan el clima en el Ecuador son:

- Factores atmosféricos del pacífico
- Factores oceanográficos y corrientes marinas.
- Factores orográficos y regiones naturales en Ecuador

### 3.5 Software Qgis 3.16.9

QGIS (también conocido como Quantum GIS), es un Sistema de Información Geográfica (GIS) libre que permite a los usuarios utilizar varias herramientas para la visualización, edición, análisis y publicación, para crear su propia información geoespacial. Además, proporciona funciones detalladas que utilizan estas características geoespaciales (Geographic Information System, 2008), que satisfacen las necesidades del usuario integrando una amplia gama de extensiones en ciencias de la información geográfica como: GDAL, GRASS, SAGA (Baghdadi, Mallet, 2020).

En general, este software tiene capacidad para realizar mapas y delimitar zonas de cuencas hidrológicas teniendo en cuenta las siguientes características (Geographic Information System, 2008):

**Ver datos:** los usuarios pueden cargar y superponer fácilmente datos vectoriales o ráster en diferentes formatos de imagen y proporcionar varias funciones avanzadas para usuarios más experimentados en la gestión de bases de datos.

**Interfaz de usuario:** una de las funciones principales de Quantum GIS es admitir la combinación de exploración interactiva y datos especiales. La interfaz de usuario admite reproyección instantánea, panel de descripción general, marca de espacio, herramientas de anotación, función de reconocimiento, selección, atributo de edición, visualización, búsqueda, datos de función de definición de etiqueta, soporte para guardar y restaurar elementos, mapa de escala de columna y brújula con derechos de autor y etiquetas de mapa con derechos de autor, etc.

**Explorar datos y componer mapas:** se puede componer mapas y explorar datos espaciales interactivamente con una interfaz de usuario gráfica (GUI) , estas herramientas son muy útiles incluyen; navegador Qgis, reproyección al vuelo, gestor de base de datos, diseño de impresión, informes, panel de vista general, marcadores espaciales, herramienta de anotaciones, identificar objetos especiales, editar, etiquetado entidades definidas por datos.

**Crea, edita, administra y exporta datos:** Quantum GIS permite crear, editar, administrar y exportar capas vectoriales y ráster en varios formatos, con acceso a herramientas avanzadas como la integración de datos GPS, visualización, edición de datos de OpenStreetMap, habilidad para crear base de datos, herramientas para la gestión de tablas de atributos vectoriales (archivos shape y raster).

**Analizar datos:** proporciona acceso a herramientas de análisis avanzadas, como análisis de vectores, muestreo, geoprocésamiento, geometría, herramientas de administración de bases de datos, herramientas GRASS, que puede trabajar con el complemento de procesamiento que proporciona un marco de análisis geoespacial como SAGA GIS.

### **3.6 Software SAGA GIS 2.3.2**

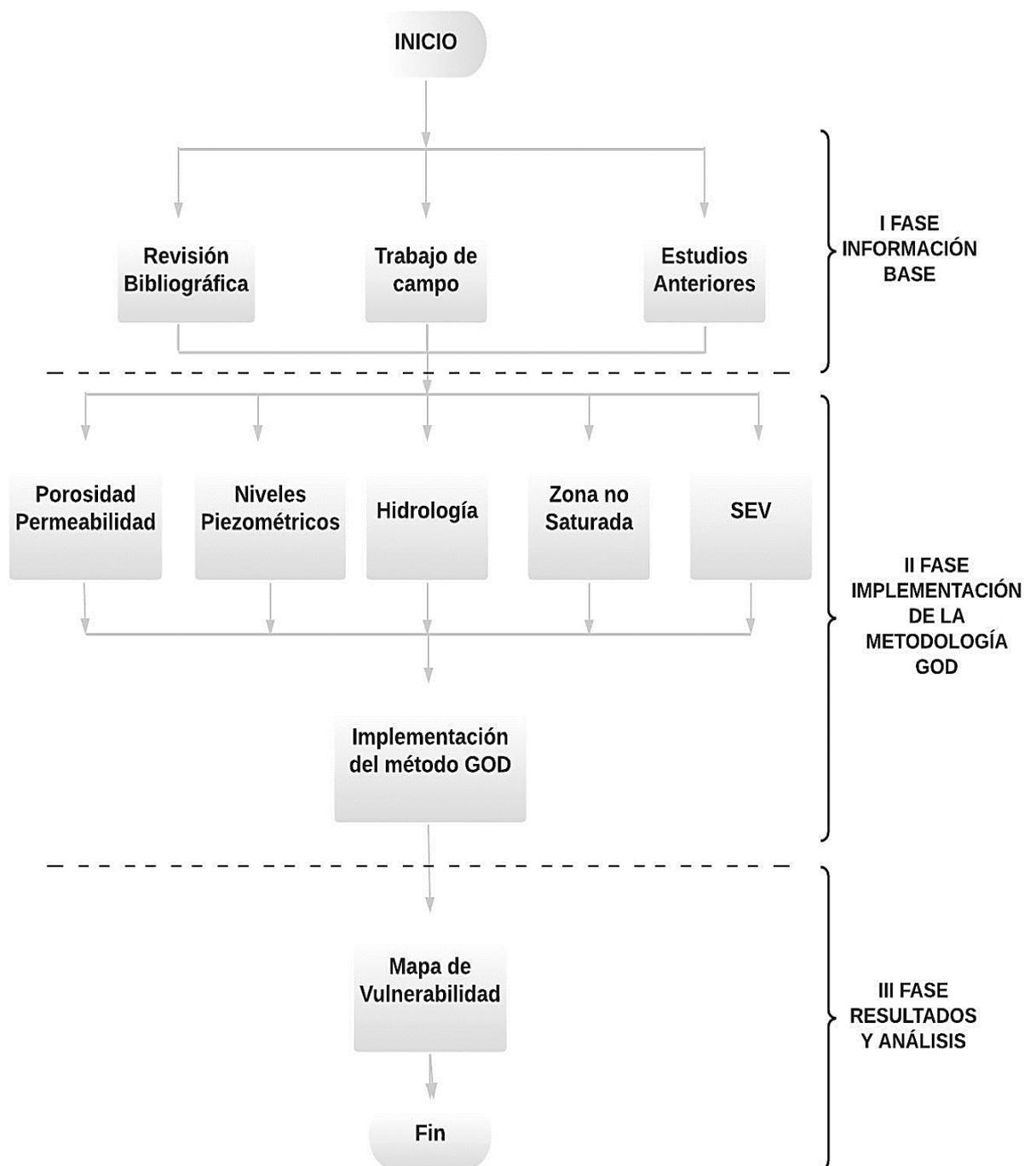
El software SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) versión 2.3.2 es un software libre, acoplado en el software QGIS 3.16.9, desarrollado por la universidad de Goettingen, Alemania y actualmente gestionado por el SAGA User Group e.V, cuya función era de realizar análisis de terreno, como el sombreado de colinas, la extracción de las cuencas hidrográficas, pero en la actualidad el software ofrece un conjunto de métodos geocientíficos para representar mapas, histogramas, gráficos de dispersión (System for Automated Geoscientific Analyses, 2004).

### 3.7 Metodología General

La metodología utilizada en el presente proyecto, se desarrolló en tres fases que comprenden diferentes aspectos físicos del sistema, las cuales se describen a continuación (Fig. 19):

**Figura 19**

*Diagrama de flujo de metodología*



### 3.7.1 Fase 1: Información Base

Para el desarrollo de esta fase de estudio, se procedió a recopilar información existente en estudios anteriores, en artículos, revistas científicas, publicaciones en base a datos científicos, tesis de grado y postgrado, y registros realizados por técnicos de la ESPOL y JRAO, que permitieron conocer la situación actual del sistema hidrogeológico de Olón, como el número de pozos con los que se extrae agua subterránea, los materiales que conforman el acuífero, mediante geofísica y perforación de pozos, las precipitaciones y ETP promedios anuales en esta cuenca. También, los posibles factores que podrían incidir en la contaminación del acuífero y contaminar el agua subterránea.

#### Tabla 7

*Registro de datos de cada pozo*

Pozos	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	Profundidad	NE	pH	Conductividad [uS/cm]	Temperatura (°C)	Resistividad [Ω.cm]	Sólidos disueltos [mg/l]	Salinidad	Observación
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

### 3.7.2 Precipitaciones y temperaturas

La temperatura de Olón oscila entre 26.31 ° C y 24.29 ° C, además en el desarrollo de este proyecto se utilizará información obtenida de investigaciones realizadas por técnicos de la ESPOL y JRAO. El clima de Santa Elena es desértico y su temperatura promedio anual es de 25 ° C, la precipitación es de 155 mm, es baja, lo que trae inconvenientes para el desarrollo laboral de los comuneros (Apolo & Valgas, 2021).

La tabla 8 a continuación describe los siguientes valores.

#### Tabla 8

*Valores de precipitaciones y temperaturas*

MES	PRECIPITACION	TEMPERATURA
Ene - 2018	2.20	26.31
Feb - 2018	36.85	27.73
Mar - 2018	12.65	27.98
Abr - 2018	2.35	26.98
May - 2018	0.00	25.97
Jun - 2018	0.00	24.59
Jul - 2018	0.45	22.68
Ago - 2018	69.4	21.57
Sep - 2018	0.20	22.01
Oct- 2018	0.00	22.40
Nov - 2018	1.70	23.81
Dic - 2018	1.50	24.29
Ene - 2019	1.50	26.39
Feb - 2019	51.60	27.36
Mar - 2019	18.40	27.87
Abr - 2019	0.20	27.08
May - 2019	0.00	26.53
Jun - 2019	0.00	25.12
Jul - 2019	0.00	22.90
Ago - 2019	138.30	21.68
Sep - 2019	0.20	21.62
Oct - 2019	0.00	22.40
Nov - 2019	1.70	23.81
Dic - 2019	1.50	24.29

**Fuente:** (Apolo & Valgas, 2021)

### 3.7.3 Evapotranspiración Potencial (ETP)

La evapotranspiración potencial es el resultado de dos procesos diferentes, como son: la evaporación y la transpiración. La evaporación es un fenómeno físico que implica el proceso del agua de estado sólido a gaseoso: la transpiración en cambio es un fenómeno biológico en el que las plantas pierden agua a la atmósfera, es decir, absorben parte del agua del suelo a través de sus raíces para su crecimiento y el resto transpira (Sánchez, 2015).

Para calcular la ETP se deben tener presente las siguientes variables:

- ETP sin corregir
- N ° días
- N ° horas luz
- Temperatura

➤ Índice de calor

Mediante las siguientes ecuaciones obtenemos la ETP corregida (ecuación 3.1) y la ETP sin corregir (ecuación 3.2)

$$ETP = (ETP_{sin\ corregir}) \left( \frac{n}{12} \times \frac{d}{30} \right) \dots\dots\dots ecuación\ 3.1$$

$$ETP_{sin\ corregir} = 16 \left( \frac{10t}{i} \right)^a \dots\dots\dots ecuación\ 3.2$$

Según la información anterior la ETP para el año 2018 mediante la fórmula de Thornthwaite es de 1353,46 y para el año 2019 es de 1363,15 como se muestra en las tablas 9 y tabla 10 a continuación.

**Tabla 9**

*Valores de ETP mensual del año 2018*

Cálculo de la ETP mensual mediante la fórmula de Thornthwaite 2018														
	ene	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	ene.	total
temp	26,31	27,73	27,98	26,98	25,97	24,59	22,68	21,57	22,01	22,4	23,81	24,29	26,31	296,32
i	12,35	13,38	13,56	12,83	12,11	11,15	9,87	9,15	9,43	9,68	10,62	10,95	12,95	135,09 a= 3,17
ETP sin corregir	132,4	156,41	160,93	143,39	127,06	106,86	82,7	70,54	75,2	79,51	96,48	102,78	132,4	
n° días mes	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	
n° horas luz	11,9	11,9	12	12	12,1	12,1	12,1	12,1	12	12	11,9	11,9	11,9	
ETP corregida	135,68	149,94	166,29	143,39	132,39	107,75	86,17	73,49	75,2	82,16	95,68	105,32	135,68	1353,46

**Tabla 10**

*Valores de ETP mensual del año 2019*

Cálculo de la ETP mensual mediante la fórmula de Thornthwaite 2019														
	ene	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	ene.	total
temp	26,39	27,36	27,87	27,08	26,53	25,12	22,9	21,68	21,62	22,4	23,81	24,29	26,39	297,05
i	12,41	13,11	13,48	12,91	12,51	11,52	10,01	9,22	9,18	9,68	10,62	10,95	12,41	135,59 a= 3,187
ETP sin corregir	133,64	149,93	159,03	145,1	135,91	114,2	85,03	71,41	70,79	79,25	96,28	102,6	133,64	
n° días mes	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	
n° horas luz	11,9	11,9	12	12	12,1	12,1	12,1	12,1	12	12	11,9	11,9	11,9	
ETP corregida	136,94	143,73	164,33	145,1	141,61	115,15	88,6	74,41	70,79	81,89	95,47	105,14	136,94	1363,15

### 3.7.3 Trabajo de campo y toma de datos

Para la ejecución de este trabajo, se realizó un reconocimiento del terreno para ubicar los pozos, utilizando un GPS con el datum en coordenadas UTM WGS84. En la toma de niveles piezométricos, se utilizó una sonda para medir niveles de agua en pozos, considerando la medida hasta la parte superior de la tubería que conforma el pozo. En este estudio, se resalta el nivel medido del acuífero hasta la cota del terreno, que es el parámetro que utiliza la metodología GOD.

El recorrido en la zona de estudio, corroboró que la naturaleza del acuífero Olón, corresponde a la de un acuífero libre, en la que los depósitos aluviales conforman una terraza de estos materiales, que es la roca o formación donde se desarrolla y fluye el agua en el subsuelo.

El recorrido por el río, permitió observar en ciertos tramos, principalmente en la cuenca baja la potencia de estos materiales aluviales, así como el estrato que corresponde a la zona vadosa o no saturada.

En la figura 20, se muestra el pozo 3 del campo de extracción de agua de la JRAO, donde se realiza el sondeo para medir la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua, mientras que en la figura 21, la toma de medidas de parámetros de pH, temperatura, TDS, salinidad in situ del agua del acuífero.

#### **Figura 20**

*Sondeo para medir niveles de agua en el pozo*



**Figura 21**

*Medición de parámetros in situ del agua subterránea en pozo*



**Tabla 11**

*Coordenadas y profundidades de la cuenca del rio Olón*

Pozos	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	Profundidad	NE
1	527829	9802096	22	23	11,44
2	527824	9801906	18	23	11,59
3	527356	9801943	21	23	6,75
4	527489	9801923	19	23	7,85
5	527645	9802077	16	23	7,91
6	527833	9802088	22	23	11,47
7	528687	9802193	23	23	8,23
8	528804	9802291	23	23	7,36
9	528859	9802315	19	23	3,97
10	529001	9802506	51	10	4,51
11	528895	9802410	14	8,8	1,95
12	524148	9808857	20	8	3,6

**Tabla 12***Parámetros TDS de la cuenca del río Olón*

Pozos	pH	Conductividad [uS/cm]	Temperatura (°C)	Resistividad [Ω.cm]	Sólidos disueltos [mg/l]	Salinidad	Observación
1	7,5	1351	25	741	1350	0,6	
2	7,15	2.08 mS/cm	26	480	2.08 g/L	1	Sin bomba
3	7,64	3.19 mS/cm	26,5	313	3.20 g/L	1,7	Sin bomba
4	7,07	6.56 mS/cm	25,9	152,6	6.55 g/L	3,6	
5	7,44	1567	25,2	638	1566	0,8	
6	7,46	1527	27,1	655	1528	0,7	
7	7,25	1086	25,7	917	1086	0,5	
8	7,21	1106	27,1	903	1106	0,5	
9	7,32	1147	25,1	872	1146	0,5	Sin bomba
10	7,38	968	26	1033	968	0,4	
11	7,9	974	25,5	1027	974	0,4	
12	7,23	2.48 mS/cm	24,9	411	2.43g/l	1,2	

### 3.8 Fase 2: Implementación de la metodología GOD

Con la información obtenida en la Fase I, se realiza la estimación de la vulnerabilidad, mediante el método GOD. Las propiedades físicas de porosidad y permeabilidad, ayudan a definir las características del medio físico hidrogeológico, que se utilizan en esta metodología.

#### 3.8.1 Tipo de acuífero (Groundwater)

Este acuífero debido a las características hidrogeológicas que presenta, se considera un acuífero libre debido a la porosidad y permeabilidad que posee. Además, la recarga se da de manera estacional, dado que la capacidad de infiltración de los materiales más próximos a la superficie lo permiten. A continuación, se describen estas características:

#### Porosidad y Permeabilidad

El acuífero Olón, debido a que está conformado principalmente, por gravas y arenas, presenta una porosidad entre el 20% y 30%, dependiendo de la cantidad de limos y arcillas que posee, que hace que sea de naturaleza muy porosa.

La permeabilidad de este sistema hidrogeológico es de aproximadamente de 15 m/d a 20 m/d. Estas magnitudes llevan a que el agua en el subsuelo fluya, prácticamente de manera libre por los conductos que forman los poros de los materiales aluviales, principalmente gravas y arenas.

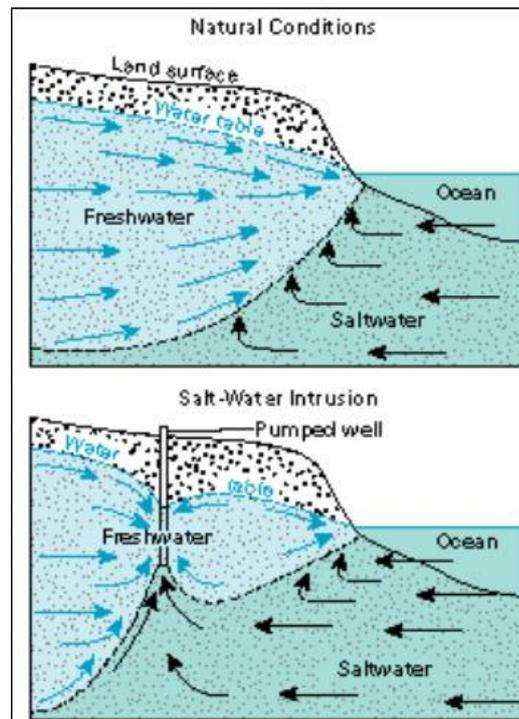
### **Acuífero libre costero**

El acuífero de la cuenca del río Olón, es de tipo libre costero, debido a la posición geográfica que posee, encontrándose junto al mar, por lo que es propenso a sufrir alteración salina, por causa de la intrusión de agua salada alterando las características físicas químicas del agua subterránea.

La cuenca de los acuíferos costeros, se abastece a través de precipitaciones, o a través del flujo superficial o subterráneos de otras cuencas, mientras que las salidas se dan a través de la evapotranspiración, evaporación y por la salida subsuperficial, con la particularidad de que esta última se da hacia el mar donde cumple su ciclo natural.

### **Figura 22**

*Acuífero libre costero*



**Fuente:** (Espinoza & Molina, 2005)

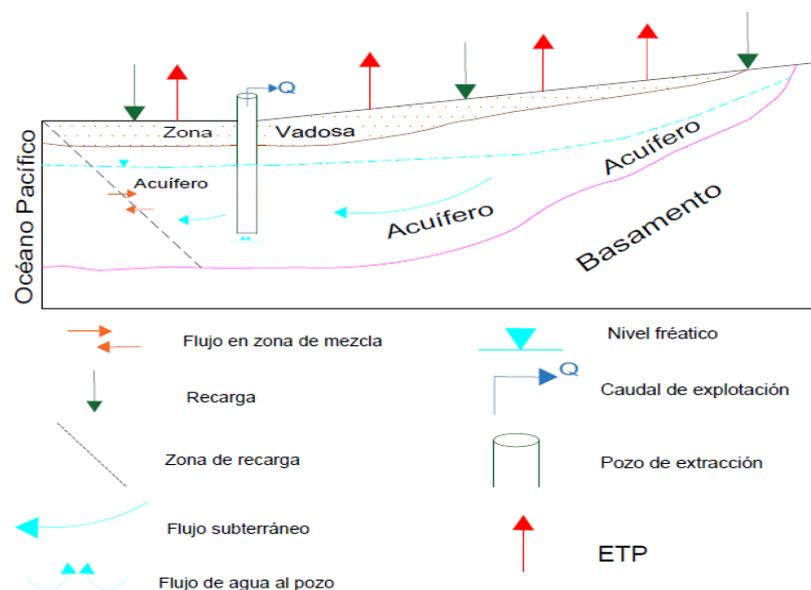
### 3.8.2 Modelo conceptual Acuífero de Olón

La cuenca hidrológica del río Olón, posee un acuífero libre en contacto con el mar. La recarga de este sistema se da principalmente por la infiltración que se produce en los eventos de precipitaciones en los meses de enero a mayo, y en las denominadas garúas, que son precipitaciones de baja intensidad en los meses de julio y agosto. Las salidas hídricas, se producen por la extracción por bombeo para el abastecimiento de las comunidades, y en la ETP. La zona vadosa, se encuentra conformada por materiales de gravas y arenas, así como de materiales finos, entre ellos los limos y arcillas, con una potencia promedio de 5 m.

La zona de interés acuífero, posee un espesor promedio de 25 m, siendo de materiales aluviales que permiten que el agua subterránea fluya y se almacene en los poros que estos materiales forman. El nivel freático de este acuífero libre costero, se encuentra por debajo de los 7 m de profundidad desde la superficie del terreno. El sentido del flujo, debido al gradiente hidráulico es en dirección Este (cuenca alta) Oeste (Océano Pacífico). Al ser un acuífero emplazado en el borde costero, hace que la intrusión de agua de mar este presente y se desarrolle debido al descenso de los niveles, producto de la explotación intensiva del agua del acuífero, afectando principalmente la calidad del agua en las zonas más próximas al mar.

**Figura 23**

*Modelo conceptual Acuífero de Olón*



### **3.8.3 Recursos Hidrogeológicos**

Los recursos hidrogeológicos del acuífero Olón, generalmente se dan en la cuenca baja, que es donde las gravas y arenas poseen mayor potencia, por tanto, donde el espesor saturado, hace que la transmisividad sea alta, con esto el rendimiento de los pozos de extracción aumente.

La recarga de este sistema, se realiza en toda la cuenca del acuífero del río de Olón, aunque la principal formación es en donde se desarrolla la terraza aluvial. Sin embargo, una cantidad importante para el funcionamiento de los flujos subterráneos, se produce en la cuenca alta; es decir, en las cotas más altas de la cordillera Chongón-Colonche en este sector.

### **3.8.4 Zona No Saturada (Overlying Strata)**

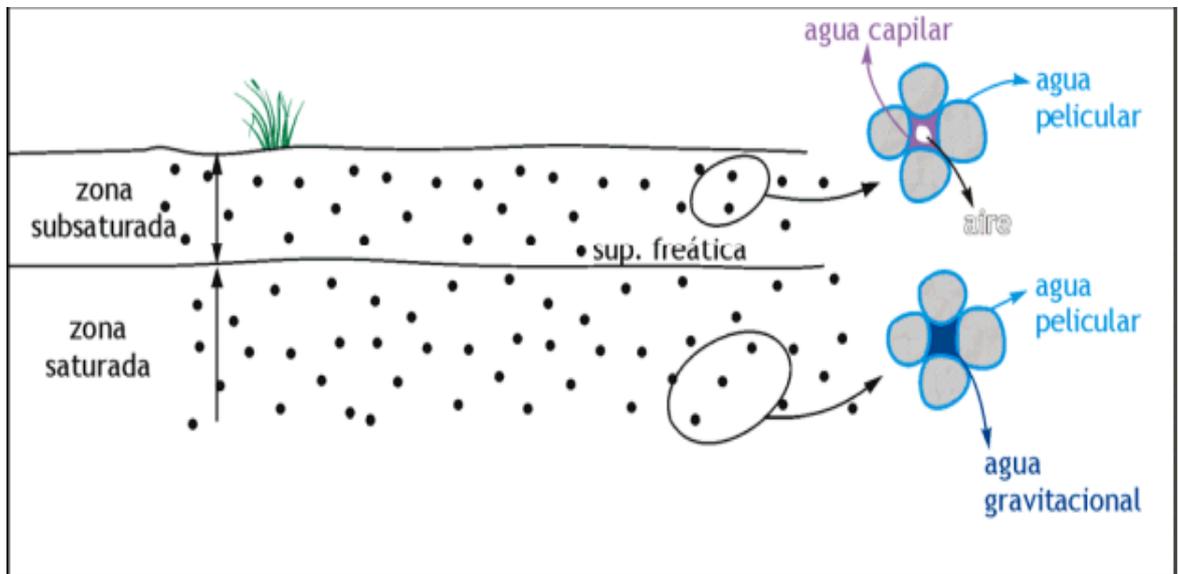
La zona no saturada está compuesta por limos y arcillas. El agua que se almacena en la zona de saturación se presenta de dos tipos: una sustancia inmóvil que se adhiere a la superficie de los escombros con una fuerza mayor que la gravedad, lo que generalmente se denomina pelicular, el otro en cambio es móvil bajo la acción de la gravedad por lo que se la denomina agua gravitacional siendo uno de los medios más peligrosos de transporte de contaminantes.

El agua está controlada por varios factores: solubilidad, reactividad con agua y suelo, tamaño molecular, relación disolución-precipitación, permeabilidad y porosidad del medio, persistencia, difusión molecular, dispersión mecánica. De cualquier manera, la velocidad de propagación no puede ser mayor que la del agua subterránea y el sentido seguirá al del flujo hidráulico (Auge, 2006).

En la zona de estudio, los materiales que se encuentran por encima de las gravas y arenas que conforman el acuífero de Olón, se componen principalmente de material con una granulometría muy baja, en este caso de limos y arcillas. Sin embargo, esta granulometría no interviene en la recarga producto de la infiltración de las precipitaciones que se dan en la cuenca. Esto hace, que sustancias de procedencia natural y antrópica, puedan alcanzar el agua del acuífero, en algunos casos hasta contaminarla, alterando sus características.

## Figura 24

### *Tipos de agua en el subsuelo*



**Fuente:** (Auge, 2006)

### 3.8.5 Niveles Piezométricos (Depth)

Los niveles piezométricos de este acuífero, se obtuvieron en campañas de campo de toma de niveles en los doce pozos que conforman el campo de extracción que se utiliza para abastecimiento de la comuna que dependen de este acuífero. Estos pozos según sus coordenadas se clasifican en los próximos al mar y en el interior de la cuenca, los primeros de esta clasificación se encuentran muy deprimidos, producto del ritmo de explotación, mientras que el segundo grupo, a pesar del similar ritmo de explotación, la recarga proveniente de la cuenca alta, incide en que los niveles se mantengan estables mayor tiempo a lo largo del año.

### 3.8.6 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Los datos de pozos, los datos de la profundidad del nivel freático fueron tomados en los pozos de extracción para abastecimiento, los que se encuentran ubicados en la cuenca baja. En la cuenca media y alta, para estimar esta profundidad, se ha procedido a la geofísica realizada en el sector (Montalván, 2008; Montalván et al., 2008), que indica de manera indirecta las posibles formaciones presentes en este sector. La técnica utilizada, corresponde a geoelectrónica.

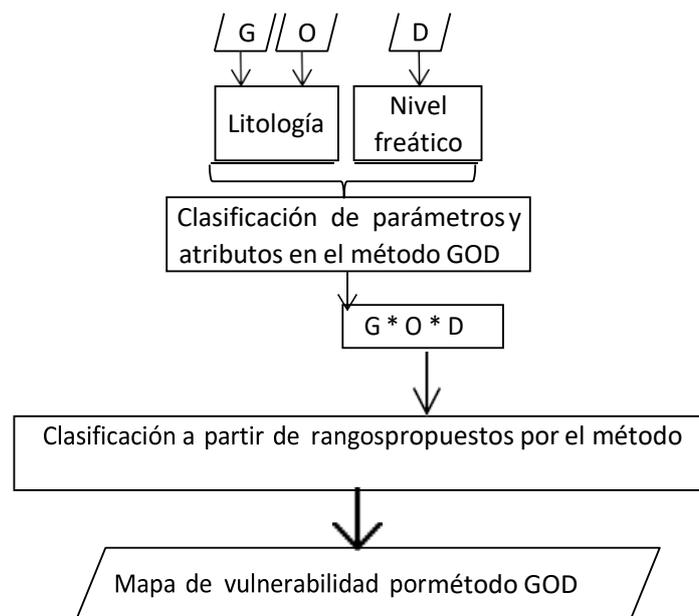
### 3.8.7 Implementación del método GOD

Los mapas de vulnerabilidad por el método GOD, se obtienen mediante procesamiento y mapeo de datos. En el caso de la variable D, el mapa de nivel de agua subterránea, necesita ser procesado con datos para interpolar los puntos de muestreo en el área de trabajo, datos que son variables en el tiempo. Las variables G y O, utilizan mapas de litología para escoger su ponderación, porque requieren información sobre las estructuras geológicas.

Al igual que la variable D fluctúa en el tiempo y la variable O está en función de la ubicación del pozo debido a que los espesores de las capas de suelo no son constantes. La variable G, que es el tipo de acuífero o a que clasificación corresponde, siendo los doce pozos que se encuentran en el acuífero de estudio del mismo tipo por su ubicación geográfica y además se considera una variable constante a través del tiempo. A estos factores se le establecerá una puntuación, luego calculamos el índice final promediando estas calificaciones, mientras más alto sea el puntaje GOD, mayor será su vulnerabilidad.

**Figura 25**

*Aplicación del método GOD*



**Fuente:** Adaptado de (Chinchihualpa, 2018).

### **3.9 Fase 3: Resultados y análisis**

En esta fase se procesa la información básica y los datos obtenidos en campo. Posteriormente, se determina la vulnerabilidad mediante la metodología GOD, utilizando los parámetros hidrogeológicos del acuífero Olón. Luego se elabora el mapa, que indica las zonas vulnerables a la contaminación del acuífero. Por último, se realiza un análisis de las diferentes zonas por su grado de vulnerabilidad.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

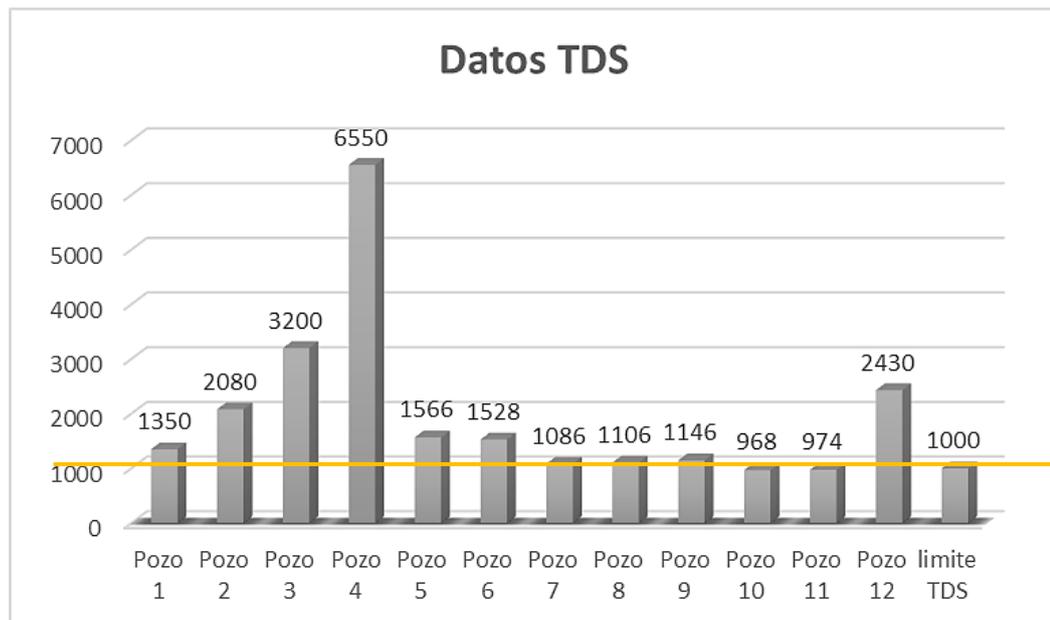
### 4.1 Parámetros físico-químico in situ.

Los datos obtenidos de TDS, indican que las mayores concentraciones se encuentran presentes en los pozos P2 (2080 mg/l), P3 (3200 mg/l) y P4 (6550 mg/l), que se encuentran cerca al mar y a una profundidad promedio de 23 m. Además, el pozo P4, presenta la máxima concentración del sistema que indicaría que está siendo afectado directamente por el agua de mar que está ingresando hacia el interior del acuífero, lo que lo hace vulnerable respecto a la calidad del agua para abastecimiento. El pozo P12 (2430 mg/l), se ubica en el interior de la cuenca y a una profundidad somera de 8 m, de naturaleza artesanal, con la particularidad que su concentración es elevada, que se debería a la disolución de materiales evaporíticos, que estarían en contacto con el agua del pozo, debido a que se encuentra abierto.

Los pozos P1 (1350 mg/l), P5 (1566 mg/l) y P6 (1528 mg/l), ubicados próximos al mar, alcanzando una profundidad promedio de 23 m, poseen las concentraciones medias del sistema. Sin embargo, su cercanía al mar no está incidiendo significativamente en el aumento de la concentración de TDS, lo que podría deberse a que este grupo de pozos se encuentra muy próximos al cauce del río.

Los pozos P7 (1086 mg/l), P8 (1106 mg/l) y P9 (1146 mg/l), poseen concentraciones levemente por encima de los 1000 mg/l, que se considera en los límites establecidos para el abastecimiento de la población. Este conjunto de pozos interiores, alcanzan profundidades de hasta 23 m.

Los pozos P10 (968 mg/l) y P11 (974 mg/l), son pozos someros que se encuentran en el interior de la cuenca con profundidades de hasta 10 m, de construcción artesanal. Los TDS de estos pozos, se aproximan a los 1000 mg/l, por lo que es agua apta para el abastecimiento de la comunidad. Se menciona, que estos dos pozos no presentan un aumento considerable en la concentración de TDS, lo que se puede interpretar que en lugar del emplazamiento de estos, si existe presencia de materiales evaporíticos que estén en contacto con el agua del pozo.



## 4.2 Evapotranspiración Potencial, ETP

La ETP determinada por el método Thornthwaite para los años 2018 y 2019, indican que el periodo con mayor descarga al ambiente por este proceso son los meses de enero a junio, mientras que los meses con menor descarga van desde julio a noviembre. En el mes de diciembre, comienza a incrementar la temperatura, que hace que la ETP aumente a partir de este mes. Se debe mencionar, que en los meses de julio y agosto se produce la denominada garúa, que incide en el clima, y con esto la disminución de la temperatura en este sector.

Es importante recalcar, que el periodo de máxima descarga al ambiente, coincide con la corriente cálida de El Niño, que es cuando aumentan las temperaturas en el litoral ecuatoriano, aumentando la tasa de evaporación y la humedad. En los meses de julio a noviembre, está presente la corriente fría de Humboldt, ocasionando la disminución de la temperatura en esta región del planeta.

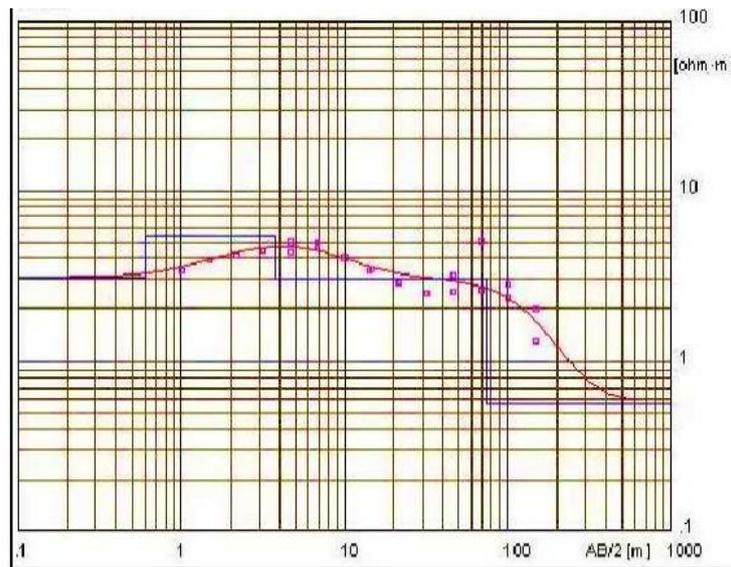
## 4.3 SEV

La reinterpretación de los SEV, muestra que el nivel freático se encuentra a profundidades someras, tanto en la cuenca alta, como en la baja. El SEV 13, se encuentra ubicado en la cuenca alta, indica la presencia de una capa geoelectrica con resistividad de  $3.1 \Omega\text{m}$  que se interpreta como arenas finas en una matriz limo arcillosa

con un espesor de 0.6 m; una segunda capa geoelectrica con un espesor de 3.2 m y una resistividad 5.4  $\Omega\text{m}$  que se interpreta como materiales gravas y arenas saturadas; una tercera capa geoelectrica que alcanzaría un espesor de hasta 70 m con una resistividad de 3.0  $\Omega\text{m}$ , que se interpreta como el basamento del acuífero (Figura 26, 28 y tabla 13).

**Figura 26**

*Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) OL-13*



**OL-13**

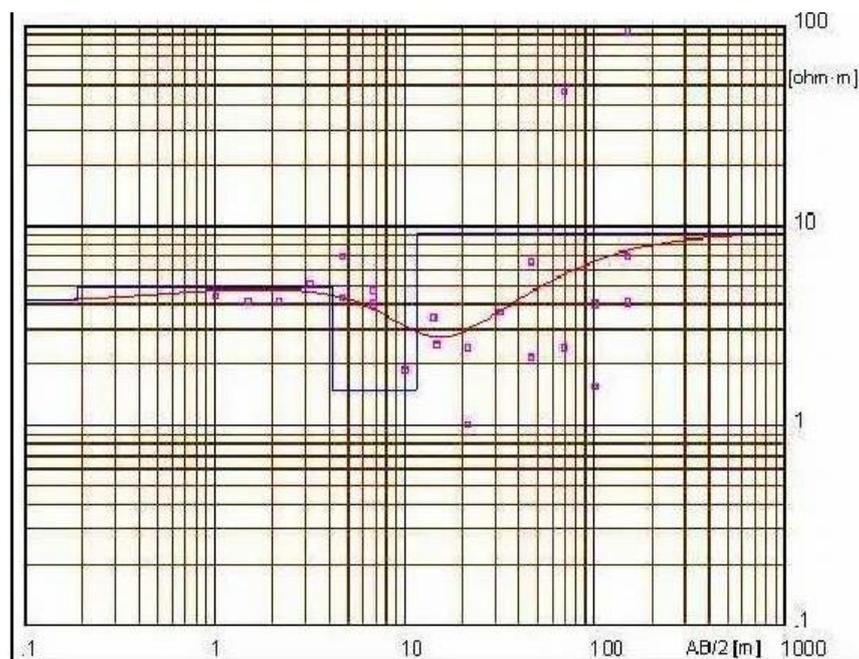
Resistividad ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	Esesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
3.10	0.60	0.60	Limo arcillosa
5.40	3.20	3.80	Gravas y arena saturada
3.00	70.00		
0.57		74.00	Basamento del acuífero

*NOTA: La figura fue tomada por (Montalván,2008)*

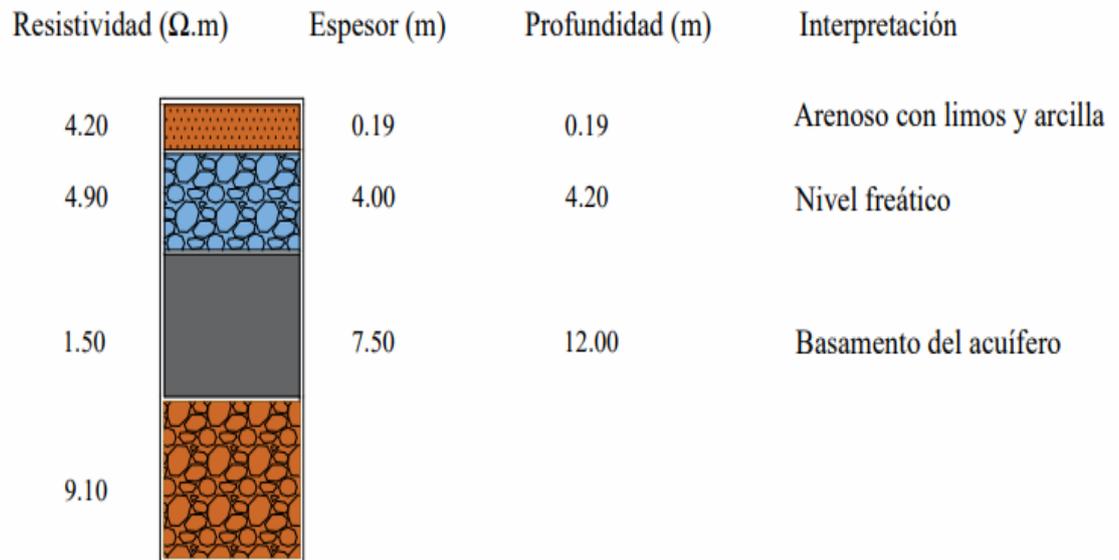
**Tabla 13***Modelos de resistividades*

SEV	Coordenadas		Profundidad (m)	Espesor (m)	Resistividad ( $\Omega$ .m)	Interpretación
	x	y				
OL - 13	532875	9804248	0.60	0.60	3.10	Limo arcillosa
			3.80	3.20	5.40	Gravas y arenas saturadas
			74.00	70.00	3.00	Basamento del acuífero
					0.57	

En la cuenca media para establecer la profundidad del nivel freático, se reinterpretó el SEV 18. Presenta una primera capa geoelectrica de un espesor de 0.19 m con una resistividad de 4.2  $\Omega$ m lo que representaría material arenoso con limos y arcillas; una segunda capa de 4 m de espesor y resistividad de 4.9  $\Omega$ m que sería donde se encuentra el nivel freático; y una tercera capa de 7.4 m de espesor y resistividad de 1.5  $\Omega$ m que representaría el basamento del acuífero (Figura 27, 28 y tabla 14).

**Figura 27***Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) OL-18*

## OL-18



NOTA: La figura fue tomada por (Montalván, 2008)

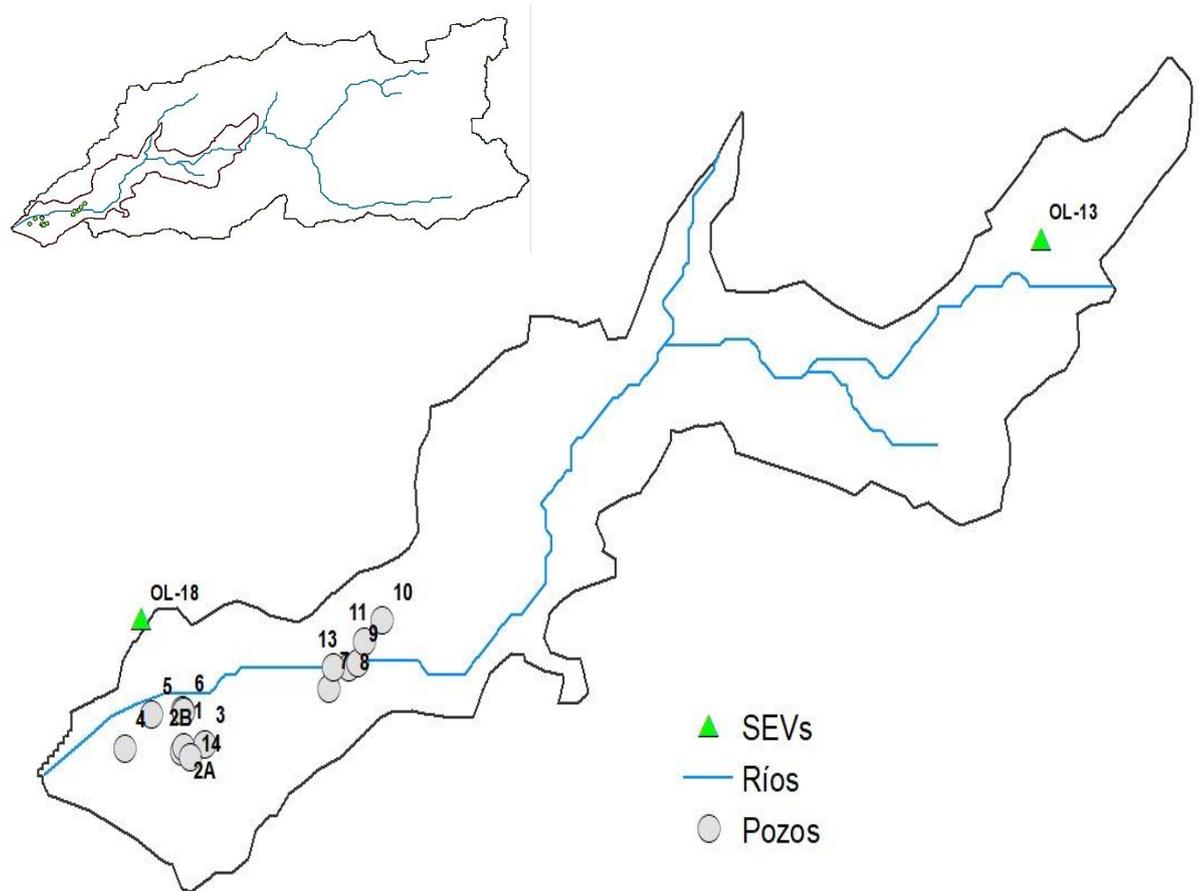
**Tabla 14**

*Modelos de resistividades*

SEV	Coordenadas		Profundidad (m)	Espesor (m)	Resistividad ( $\Omega.m$ )	Interpretación
	x	y				
OL - 18	52758 8	980251 2	0.19	0.19	4.20	Arenoso con limos y arcillas
			4.20	4.00	4.90	Nivel freático
			12.00	7.40	1.50	Basamento del acuífero
					9.10	

## Figura 28

Ubicación de los pozos y SEV



### 4.4 Determinación del índice de vulnerabilidad de los pozos del acuífero Olón

Una vez obtenidos el producto de los datos recopilados en campo de los 12 pozos se procede a clasificar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Olón, mediante los parámetros que muestra la figura 10 que va de 0.0 a 1.0 donde 0.0 es despreciable y 1.0 es extremo. Con las valoraciones obtenidas, desde el P1 hasta el P12 se encuentra en una clasificación extrema.

Al pertenecer a una clasificación de vulnerabilidad a la contaminación extrema hace que todos los pozos ubicados desde el sector costero hasta los pozos que se encuentran en el interior de la cuenca del acuífero Olón, sean vulnerables a cualquier tipo de contaminantes, es decir, por la pérdida de resistencia produce un impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.

**Tabla 15***Índices de vulnerabilidad*

Pozos	Profundidad (NE)	G	O	D	Índice de vulnerabilidad	Vulnerabilidad a la contaminación
1	11,44	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
2	11,59	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
3	6,75	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
4	7,85	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
5	7,91	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
6	11,47	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
7	8,23	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
8	7,36	0,80	0,85	0,80	0,82	EXTREMO
9	3,97	0,80	0,85	0,90	0,85	EXTREMO
10	4,51	0,80	0,85	0,90	0,85	EXTREMO
11	1,95	0,80	0,85	0,90	0,85	EXTREMO
12	3,6	0,80	0,85	0,90	0,85	EXTREMO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el mapa de vulnerabilidad y una explicación de los resultados de los conceptos involucrados en la obtención del riesgo de contaminación de aguas subterráneas en el acuífero Olón.

#### 4.5 Mapa de Vulnerabilidad

El mapa de vulnerabilidad obtenido mediante la aplicación de la metodología GOD, basados en el conocimiento de diferentes unidades hidrogeológicas y la clasificación del acuífero Olón como costero libre, junto con la profundidad a la que se encuentra el nivel freático. Este mapa representa el índice de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, que indica que las zonas más vulnerables, se encuentran en alrededor de 0.85 y de 0.80, notando que el acuífero en todo su dominio, presenta un alto índice vulnerable.

Esto se debería, a las condiciones que utiliza este método, en la que la capa que representa el tipo de acuífero (Groundwater), alcanza según la calificación el valor de 0.80, como se muestra en la figura 30, mientras que la capa que tiene que ver con la

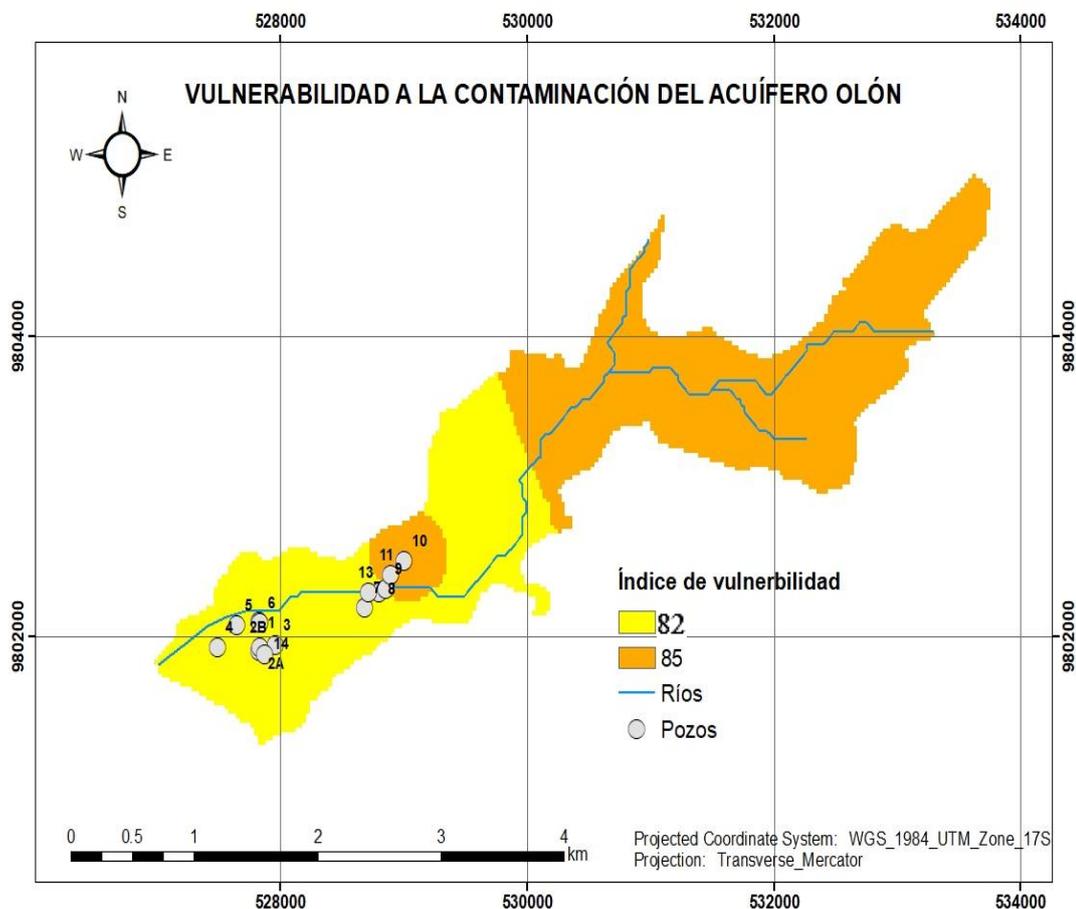
litología (Overlying), una valoración de 0.85, como se muestra en la figura 31. Se ha considerado, que estas dos capas se mantienen constante en todo el acuífero.

Sin embargo, la capa que tiene que ver con la profundidad del nivel de agua (Depth), varía espacialmente, es así que para la cuenca baja y media el índice de vulnerabilidad es de 0.90, donde se ubican los pozos someros, que se encuentran abiertos, disminuyendo a 0.80 en las proximidades del campo de explotación para abastecimiento (Figura 32).

Realizando la operación matemática, conocida como álgebra de mapas, donde el promedio de las tres condiciones  $(G + O + D)/3$ , resulta la vulnerabilidad que tendría el acuífero. Considerando, esta operación resulta que la mayor vulnerabilidad, se da por la incidencia de la profundidad de los niveles freáticos, respecto a la superficie del terreno.

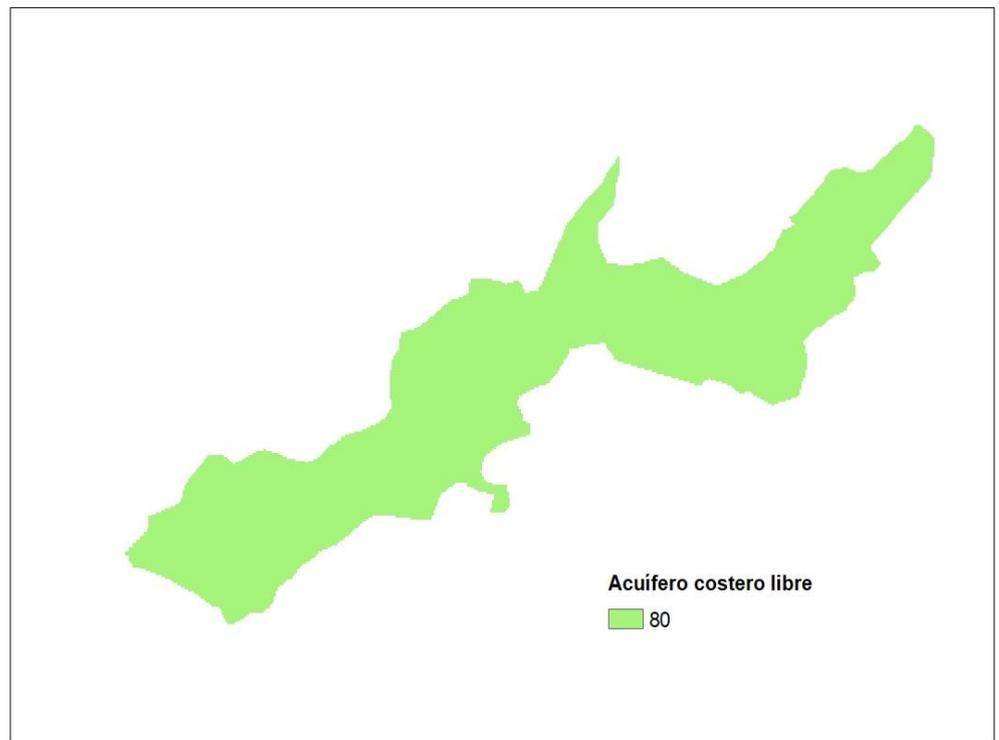
**Figura 29**

*Mapa de vulnerabilidad*



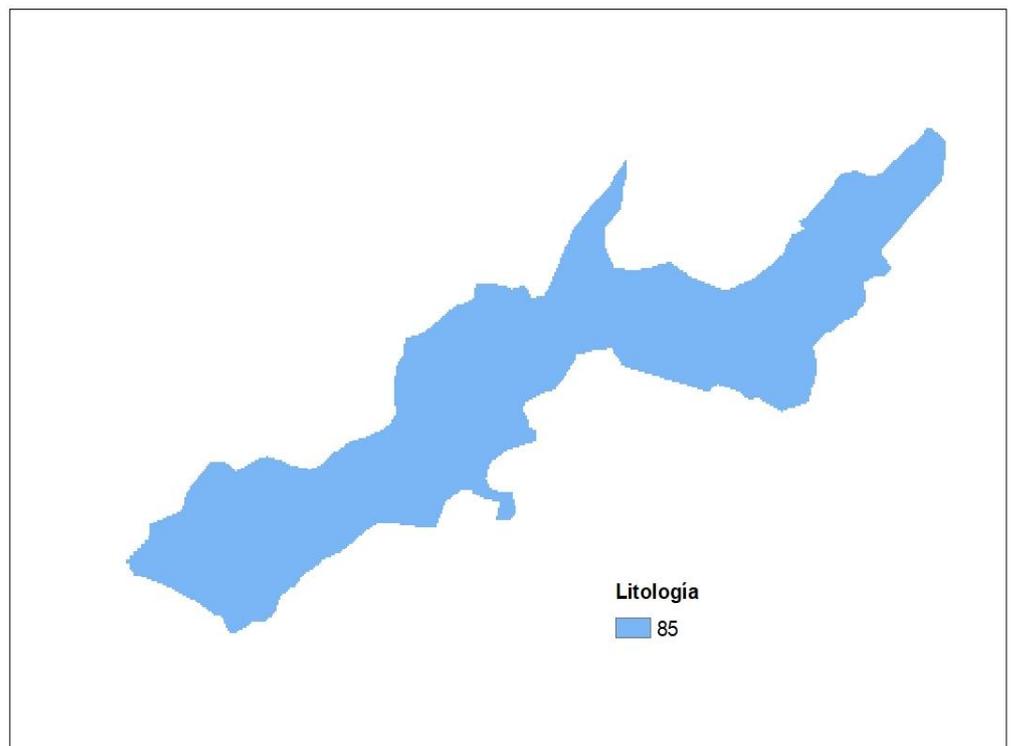
**Figura 30**

Capa tipo de acuífero G



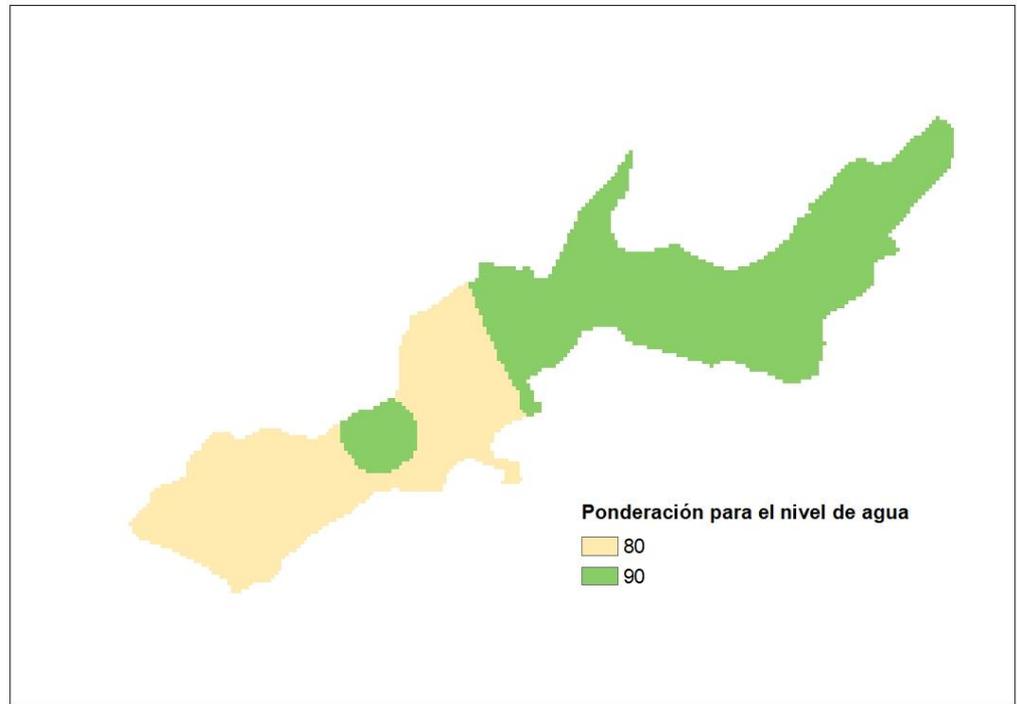
**Figura 31**

*Capa zona vadosa O*



**Figura 32**

*Capa profundidad de nivel D*



# CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1 Conclusiones

En el presente trabajo de investigación para la titulación se dio cumplimiento a los objetivos específicos y se desprenden las siguientes conclusiones:

a) Los parámetros hidrogeológicos determinados con las condiciones de contorno para la metodología GOD, se finiquita que son los siguientes:

- Con el valor G se estableció el tipo de acuífero, que corresponde a un libre costero, que por los valores de TDS obtenidos en el agua de los pozos, indica la posible presencia de intrusión de agua de mar, manifestando su vulnerabilidad debido al avance de la cuña de instrusión hacia el interior del acuífero, llevando a disminuir la calidad del agua.
- Con el valor O se determinó que la zona vadosa comprendida entre las capas superficiales y la parte superior del nivel freático, corresponde a materiales muy finos, principalmente conformado por arena muy fina en una matriz limo-arcillosa, que permite el proceso natural de infiltración, con espesores relativamente reducidos.
- Con el valor D se determinó la profundidad del nivel freático, es la condición de contorno que más varía en el espacio, ubicandose a muy poca distancia desde la superficie del terreno, que hace que la vulnerabilidad alcance niveles preocupantes a la posible contaminación del agua que discurre en el subsuelo de la cuenca.

La metodología GOD, es una herramienta potente para el establecimiento de la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. La vulnerabilidad obtenida en el acuífero Olón, muestra que existe un grado extremo de vulnerabilidad del agua subterránea a ser contaminada por factores naturales como la infiltración de las

precipitaciones hacia el acuífero, así como por los efectos producidos por el hombre en las actividades que realiza en la superficie de la cuenca.

b) El mapa de vulnerabilidad indica que todo el acuífero es vulnerable a la contaminación, esto se debe a la naturaleza propia del acuífero Olón, siendo las zonas más vulnerables donde se ubican los pozos artesanales, dado que se encuentran abiertos y en contacto con el ambiente. La alta conductividad hidráulica de este acuífero, por los materiales aluviales con los que está conformado, hace que fluya libremente una posible sustancia que contamine el agua que es utilizada para abastecimiento.

## **5.2 Recomendaciones**

Realizar campañas de concientización de protección de la cuenca del río Olón, actividad importante que debemos realizar para cuidar el recurso hídrico, que es utilizado para abastecimiento y eje de desarrollo socio-económico, para las comunidades que dependen directa e indirectamente de este líquido subterráneo.

Establecer perímetros de protección y control en los pozos, principalmente en las zonas más expuestas, como es el caso de los pozos someros y el cauce del río, que están en contacto directo con el nivel freático.

Elaborar los mapas de vulnerabilidad a la contaminación en distintos periodos de tiempo, para alcanzar una mejor comprensión del sistema en distintos escenarios y establecer lineamientos con la JRAO, y así una correcta gestión integrada del acuífero.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC : A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. *NWWA/Epa-600/2-87-035*, 455.
- 2) Auge, M. (2006). Agua Subterránea Deterioro de Calidad y Reserva. *Universidad de Buenos Aires*, 173.
- 3) Bereciartua, P. (2003). *Vulnerabilidad de Aguas Subterráneas a la Contaminación*. 1–20.
- 4) Boris Hamilton Apolo Masache, & Valgas, M. C. L. F. de. (2021). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra Modelo numérico de flujo y transporte de un acuífero costero , basado en la importancia hidráulica del diseño de un dique ( tape ) y su incidencia en la PROYECTO INTE*.
- 5) Brennan, V. M. (2017). Vulnerability. *Journal of Health Care for the Poor and Underserved*, 28(3), viii–xi. <https://doi.org/10.1353/hpu.2017.0080>
- 6) Canales, A. G., Velázquez, C. E., Islas, L., Hanson, R. T., & Dausman, A. (2016). Modelo Seawat para intrusión salina en el acuífero de Boca Abierta, Sonora. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(4), 155–160.
- 7) Caraballo Collazo, M. P., & Montaña Xavier, J. (2012). *Manual de Agua Subterránea*.
- 8) CARBONELL A, S. (1993). Ground Water Vulnerability Assessment. In *Ground Water Vulnerability Assessment*. <https://doi.org/10.17226/2050>
- 9) Carlos, Daury, D. D., Cheikh, F., Emmanuelle, Q., Ma. del Carmen, J. M., Ma. Vicenta, E. A., Sofía E., G. H., Carlos Manuel, L. V., & Pulido, G. (2003). *Riesgo De Enfermedades Transmitidas Por El*. 155–167.
- 10) Carlos, J., Martínez, A., Sánchez, J. C., Martínez, S. A., & Paredes, J. (2017). Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por

aplicación de plaguicidas en suelos B orícolas en Villa Guerrero, Estado de México. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(2), 111–129. <https://www.redalyc.org/pdf/3832/383254667005.pdf>

- 11) Castillo-Herrera, S., Barrezueta-Unda, S., & Arbito-Quituisaca, J. (2019). Evaluación De La Calidad De Aguas Subterránea De La Parroquia La Peña, Provincia El Oro, Ecuador. *Ciencia Unemi*, 12(31), 64–73. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol12iss31.2019pp64-73p>
- 12) Chinchihualpa, J. (2018). *Uso de SIG para determinar la vulnerabilidad de contaminación en acuíferos de La Yarada y Los Palos en Tacna*. 120. [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/12536/CHINCHIHUALPA\\_MARQUEZ\\_JORGE\\_USO\\_SIG\\_DETERMINAR.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/12536/CHINCHIHUALPA_MARQUEZ_JORGE_USO_SIG_DETERMINAR.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- 13) Corporación Andina de Fomento. (2000). El fenómeno El Niño 1997-1998. Memoria, retos y soluciones. Ecuador. *Prevención y Mitigación de Desastres Naturales*, 305 pp. <http://dipecholac.net/docs/files/995-publicacion-caf-ecuador-nino-97-98.pdf>
- 14) Cortez, F. J. (2012). *Recarga artificial de acuíferos mediante pozos de infiltración*. 1–72.
- 15) Espinoza, C., & Molina, M. E. (2005). Estudio de intrusión salina en cuifero costeros: Sector Costa Quebrada Los Choros, IV Región. *Gobierno de Chile*, 261. <http://documentos.dga.cl/SUB4438.pdf>
- 16) Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2003). Protección de la Calidad del Agua Subterránea. In *Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/ Banco Mundial*. [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)
- 17) Foster, Stephen S. D; Hirata, R. C. Aoki. (1991). Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas. In *Peru: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente / Organización Mundial de la Salud* (Vol. 2, p. 81). <http://www.ingenieroambiental.com/4014/riesgo7645.pdf>
- 18) Francisco Javier Montalván Toala. (2008). Caracterización Geoelectrica del Acuífero de la Cuenca del Río Olón Para Propuesta de Plan de Explotación.

*Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Facultad de Ingeniería En Ciencias de La Tierra.*, 1–161. file:///C:/Users/usuario/Desktop/BIBLIOGRAFIAS TESIS/tesis-javier-montalvan-dd\_9f8e6936e82ced7bd5fcc14746ad34ef.pdf

- 19) Fuentes, J. L. (2017). Aguas Subterráneas. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 110(9), 1689–1699.
- 20) Geographic Information System. (2008). *Qgis 3.16*.  
<https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- 21) Gómez, I. C. (2003). *Saneamiento Ambiental* (A. de editoriales Universitarias, Ed.; Universida. Fco, Carlos, Zamora Murillo.  
[https://books.google.com.ec/books?id=lsgrGBGlGeMC&pg=PA45&dq=ciclo+hidrológico&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewiJzLbEn87zAhWmVzABHaGNBZAQ6AF6BAgKEAI#v=onepage&q=ciclo hidrológico&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=lsgrGBGlGeMC&pg=PA45&dq=ciclo+hidrológico&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewiJzLbEn87zAhWmVzABHaGNBZAQ6AF6BAgKEAI#v=onepage&q=ciclo%20hidrol%C3%B3gico&f=false)
- 22) Gorchev, H. G., & Ozolins, G. (1984). WHO guidelines for drinking- water quality. *WHO Chronicle*, 38(3), 104–108.
- 23) Henry, J., & Cabrera, C. (2015). *Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra Software en Ciencias Geológicas Avance de Proyecto : Presentado por :*
- 24) IGME. (1991a). Conceptos Básicos. In *TECNOLOGÍA BÁSICA DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS* (pp. 1–27).  
[http://aguas.igme.es/igme/publica/lib111/Lib\\_111.htm](http://aguas.igme.es/igme/publica/lib111/Lib_111.htm)
- 25) IGME. (1991b). EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS A LA CONTAMINACION POR PLAGUICIDAS. In *Tecnología Básica de la Recarga Artificial de Acuíferos* (pp. 1–7).  
[http://aguas.igme.es/igme/publica/libro28/pdf/lib28/6\\_eva.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro28/pdf/lib28/6_eva.pdf)
- 26) INEC. (2010a). Fascículo provincial Santa Elena. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Fascículo Provincial Sta. Elena*, 0–8.  
[http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manualateral/Resultados-provinciales/santo\\_domingo.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manualateral/Resultados-provinciales/santo_domingo.pdf)

- 27) INEC. (2010b). Fascículo provincial Santa Elena. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Fascículo Provincial Sta. Elena*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=310&force=0>
- 28) Instituto Geológico y Minero de España. (2009). Actividad 7: *Propuesta de Indicador de Estado de Intrusión Marina, I*, 67. [https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2021-2027/Documentos-iniciales/Referencia bibliografica/IGMA-DGA,2009\\_INDICE\\_SITE\\_EstadoIntrusion.pdf](https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2021-2027/Documentos-iniciales/Referencia_bibliografica/IGMA-DGA,2009_INDICE_SITE_EstadoIntrusion.pdf)
- 29) Jaime Ernesto Díaz, Claudia Lorena Rivera, J. A. F. (2013). Estudio de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca. *Ingeniería y Región*, 22. <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/753/1444>
- 30) Jiménez, S., Fun-Sang, B., Carrión, P., Romero, P., & Montalván, J. (2013). Elaboración de un Plan de Explotación de Aguas Subterráneas en la Zona Occidental de la Península de Santa Elena, mediante la Aplicación de Métodos Resistivos. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 21(1), 23–30.
- 31) Joffre Lino. (2021, January 17). Las comunas del norte de Santa Elena están secas. *Expreso*. <https://www.expreso.ec/guayaquil/comunas-norte-santa-elena-secas-97083.html>
- 32) Jordán, A. R., & Paute, T. del R. (2019). Universidad De Guayaquil Tutor : *Universidad de Guayaquil*, 83. [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/41488/1/T-ZAMBRANO ZAMBRANO JOSSELYN JAMILE.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/41488/1/T-ZAMBRANO_ZAMBRANO JOSSELYN JAMILE.pdf)
- 33) la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *La contaminación del suelo una realidad oculta*. <https://books.google.com.ec/books?id=EjumDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Contaminación+por+actividades+domésticas+y+urbanas&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwitu5XzkcT0AhViRzABHc4GDq4Q6AF6BAgGEA#v=onepage&q&f=false>

- 34) López Rodríguez, J. J. (2003). El ciclo hidrológico. *Gestión y Planificación Hidrológica: Cursos de Verano 2001*, 1935(1), 29–37. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=1432788>
- 35) Martínez, M., Delgado, P., & Fabregat, V. (1998). Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Jornadas Sobre La Contaminación de Las Aguas Subterráneas: Un Problema Pendiente*, 413–420.
- 36) MIRANDA YRRAZABA, A. A. (2015). *Estudio De Factibilidad Para La Creación De Una Hostería Comunitaria Como Estrategia De Promoción De Atractivos De La Comuna Olón*.
- 37) Montalván, F., Carrión, P., Fun-Sang, B., Romero, S., & Jiménez, S. (2008). ) Km. 30,5 Vía Perimetral. In *Revista Tecnológica ESPOL* (Vol. 21, Issue 1). Octubre.
- 38) Nicolas Baghdadi, Clement Mallet, M. Z. (2020). *Qgis y las herramientas genericas*. <https://books.google.com.ec/books?id=JrzTDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=software+qgis+3.16+definicion&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiPjMn1o-z0AhVcl2oFHUMjAxUQ6AF6BAgKEAI#v=onepage&q&f=false>
- 39) Ordoñez, J. J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. *Sociedad Geográfica de Lima*, 2–44, 10. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/aguas\\_subterraneeas.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterraneeas.pdf)
- 40) Pacheco, J. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería*, 8(1), 33–42.
- 41) Peralta, A., & López Sardi, E. M. (2012). Los Acuíferos de nuestro país: un tesoro para las generaciones venideras. *Ciencia y Tecnología*, 1(12), 73. <https://doi.org/10.18682/cyt.v1i12.648>
- 42) Posada, N. (2005). *Transporte de Agua y Solute en la zona no saturada*.
- 43) Ray K. Linsley, Max A. Kohler, J. L. H. P. (1977). Hidrología para ingenieros. *McGraw-Hill*, 2, 398.

- 44) Rights, T. O. of the H. C. for H. (2011). El Derecho al Agua. *Revue Juridique de l'Environnement*, 32(2), 264–264.  
<https://www.ohchr.org/Documents/Publications/FactSheet35sp.pdf>
- 45) Sagua, D.-. (2018). *Departamento de Ingeniería Hidráulica Título : Evaluación de la vulnerabilidad natural y riesgos asociados a las.*  
[https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/10130/Tesis Jessika González Martel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/10130/Tesis_Jessika_González_Martel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- 46) Sanchez, J. (2015). Evapotranspiración. *Universidad de Salamanca*, 1–9.  
<http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>
- 47) Sanchez San Roman, J. (2009). Conceptos fundamentales de Hidrogeología. *Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España, 1*, 1–11.  
[http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos\\_Hidrogeol.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf)
- 48) Silva, E. O. (1982). *Prospección geoelectrica en corriente continua* (2nd ed.).  
[https://books.google.com.ec/books/about/Prospección\\_Geoelectrica\\_en\\_corriente.html?hl=es&id=Su4DAQAAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ec/books/about/Prospección_Geoelectrica_en_corriente.html?hl=es&id=Su4DAQAAIAAJ&redir_esc=y)
- 49) System for Automated Geoscientific Analyses. (2004). *SAGA GIS 2.4*.  
<http://www.saga-gis.org/en/index.html>
- 50) Truque, P. A. (2017). Armonización de los estándares de agua potable en las Americas. *Organization of American States. Department of Sustainable Development*, 17.  
<https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>
- 51) Valcarce Ortega, R., & Jiménez Reyes, R. (2016). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de la Cuenca Dolores - Sagua La Chica, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 03–14.
- 52) Vazquez, A. B. (2001). *Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos*.  
<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/baez.html>
- 53) Villón, M. B. (2007). *Drenaje* (Editorial).

# ANEXOS

## Anexo 1

Dique artesanal de Olón



## Anexo 2

Parámetros TDS



### Anexo 3

Sondeo de los pozos



### Anexo 4

Cauce de Olón

