

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD A LA  
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DEL CENTRO POBLADO DE  
JAYLLIHUAYA-PUNO POR EL MÉTODO GOD, 2017.**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**SOLEDAD CABRERA ANAHUA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO – PERÚ**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**TESIS**

“DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD A LA  
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DEL CENTRO POBLADO DE  
JAYLLIHUAYA-PUNO POR EL MÉTODO GOD, 2017”

**PRESENTADA POR:**

Bach. SOLEDAD CABRERA ANAHUA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

INGENIERO AGRÍCOLA



**APROBADA POR:**

**PRESIDENTE:**

M.Sc. OSCAR RAÚL MAMANI LUQUE

**PRIMER MIEMBRO:**

Ing. RICARDO LUIS BARDALES VASSI

**SEGUNDO MIEMBRO:**

M.Sc. PERCY ARTURO GINEZ CHOQUE

**DIRECTOR / ASESOR:**

Ing. TEOFILO CHIRINOS ORTIZ

**Área** : Ingeniería y tecnología

**Tema** : Modelamiento de aguas subterráneas.

**Línea** : Recursos hídricos.

**Fecha de sustentación:** 27/12/2017

## DEDICATORIA

Primeramente, a DIOS todopoderoso, por su ayuda y compañía, quien me ha dado paciencia, inteligencia y perseverancia, para enfrentar los retos antepuestos y que con su guía hizo posible la elaboración de este proyecto de investigación.

A mi Madre: Rosa Anahua Lupaca, porque me ha dado la vida, además protegido y enseñado el valor de la misma, y quien siempre me ha apoyado con su gran amor y que sus palabras y oraciones siempre me han respaldado.

A mi Padre: Oscar L. Cabrera Maquera, quien es un ejemplo de trabajo, por su apoyo económico, moral y por estar cerca en esta etapa de mi vida.

A mis hermanos: Alex y Luz Marina, con ellos nos hemos fijado la meta de llegar a ser profesionales y superarnos, gracias a ustedes he tenido el apoyo en todo momento, por sus palabras de ánimo.

A aquellas buenas amistades de la Universidad, nunca he sido una persona de muchas amistades y ustedes hicieron mucho más fácil el camino por la carrera, y de una manera muy especial a Juan Chura (QEPD), quien fue un gran amigo y a quien recordare siempre.

A todas estas personas y otras que formaron parte de la historia de mi vida en mi formación como profesional y a todas aquellas quienes cayeron y aun así siguen luchando por lo que creen.

**SOLEDAD CABRERA ANAHUA**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente: a DIOS todopoderoso por su respaldo en este proyecto ejecutado, en el cual pasé por una serie de circunstancias, pero con su guía lo superé y aprendí mucho.

A toda mi familia, por el apoyo moral, económico y comprensión recibida de parte de ellos en todo este tiempo.

A mi director de tesis: Ing. Teófilo Chirinos Ortiz, deseo expresar mi más sincera gratitud no sólo por su impecable labor de dirección sino también por sus continuas enseñanzas y apoyo en la elaboración de esta tesis. Por ofrecerme su disponibilidad y paciencia, por entender y saber guiar mis ideas. Además, por ser una gran persona y docente, definitivamente un honor el haber aprendido tanto de usted.

Al M. Sc. Roberto Alfaro Alejo, de manera muy especial hago extensiva mi gratitud hacia su persona por el apoyo emanado de su experiencia, el cual me sirvió verdaderamente para enriquecer mi trabajo de tesis.

A mi alma mater Universidad Nacional del Altiplano, por acogerme en sus claustros y en especial a la Facultad de Ingeniería Agrícola.

Oficina de Planificación y Desarrollo Urbano, de la Provincia de Puno.

Biblioteca de la Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica.

Al Municipio del Centro Poblado de Jayllihuaya, en especial a la Alcaldesa.

Hago extensiva mi gratitud, a mis mis amigas y amigos, en especial a: Marithza, Christy, Pedro y Yesica, quienes me apoyaron en la realización de este documento.

Y así a todas las personas no profesionales y profesionales, a las cuales se les consulto o pidió ayuda, de las cuales he recibido el apoyo sin ningún interés.

**SOLEDAD CABRERA ANAHUA**

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	12
<b>ABSTRACT</b> .....	12
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION .....	17
1.3.1. Hipótesis general .....	17
1.3.2. Hipótesis específicas .....	17
1.4. OBJETIVOS .....	18
1.4.1. Objetivo general .....	18
1.4.2. Objetivos específicos .....	18
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	19
2.1. ANTECEDENTES .....	19
2.1.1. Internacionales.....	19
2.1.2. Nacionales .....	21
2.1.3 Locales .....	22
2.2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	25
2.2.1. Acuífero .....	25
2.2.2. Clasificación de los sistemas acuíferos.....	25
2.2.2.1. Según sus características litológicas.....	25
2.2.2.2. Según sus características hidrostáticas.....	27
2.2.3. Características y propiedades de los acuíferos. ....	29

2.2.4. Comportamiento y distribución del agua en el subsuelo. ....	30
2.2.5. Dinámica del agua subterránea. ....	30
2.2.6. Contaminación de acuíferos. ....	31
2.2.7. Vulnerabilidad de acuíferos. ....	36
2.2.8. Importancia de la zona no saturada en la atenuación de contaminantes. ....	38
2.2.9. Resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico. ....	40
2.2.10. Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero. ....	41
2.2.10. Método GOD. ....	45
2.2.11. Aplicación de sistemas de información geográfica ArcGIS. ....	56
2.2.12. Cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos. ....	58
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS. ....</b>	<b>62</b>
3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO: ....	62
3.1.1. Ubicación Geográfica: ....	62
3.1.2. Ubicación Hidrográfica: ....	62
3.1.3. Ubicación Política: ....	62
3.1.4. Descripción general del centro poblado de Jayllihuaya: ....	66
3.1.5. Características principales de la zona de estudio. ....	66
3.1.5.1. Precipitación. ....	67
3.1.5.2. Temperatura. ....	67
3.1.5.3. Humedad Relativa. ....	67
3.1.5.4. Evapotranspiración Potencial. ....	67
3.1.5.5. Relieve. ....	67
3.1.5.6. Geología. ....	68
3.1.5.7. Estratigrafía. ....	68
3.1.5.8. Topografía. ....	69
3.1.5.9. Hidrología. ....	69
3.1.5.10. Hidrología superficial. ....	69
3.1.5.11. Drenaje. ....	69

3.1.5.12. Energía Solar .....	70
3.1.5.13. Flora y Fauna.....	70
3.1.5.14. Agricultura y Ganadería .....	71
3.1.5.15. Población económicamente activa .....	71
3.1.5.16. Actividad productiva .....	71
3.1.5.17. Tenencia de Tierras .....	73
3.1.5.18. Población .....	73
3.1.5.19. Migración .....	74
3.1.5.20. Educación .....	74
3.1.5.21. Salud.....	75
3.1.5.22. Vías de comunicación y transporte.....	75
3.1.5.23. Instituciones y organizaciones existentes.....	76
3.3. MATERIALES.....	76
3.3.1. Información cartográfica: .....	76
3.3.2. Equipos y programas de cómputo: .....	76
3.4. METODOLOGÍA.....	78
3.4.1. Tipo de investigación.....	78
3.4.2. Variables .....	78
3.4.3. Población y muestra .....	78
3.4.3.1. Población: .....	78
3.4.3.2. Muestra:.....	78
3.4.4. Técnicas e instrumentos.....	79
3.4.4.1Técnicas: .....	79
3.4.4.2 Instrumentos: .....	79
3.4.5. Metodología seguida .....	79
3.4.5.1.Recopilación bibliográfica antecedentes internacional, nacional y regional.....	79
3.4.5.1. Delimitación y caracterización del acuífero Jayllihuaya.....	80
3.4.5.2. Identificación y caracterización de los pozos existentes: .....	81

3.4.5.3. Determinación de los parámetros de vulnerabilidad .....	81
3.4.5.4. Control del nivel freático mensual: .....	82
3.4.5.5. Caracterización litológica del acuífero: .....	82
3.4.5.6. Caracterización del tipo de acuífero.....	83
3.4.5.7. Sistematización de la información en la matriz de indexación GOD. ....	84
3.4.5.8. Determinación de los niveles de vulnerabilidad. ....	85
3.4.5.9. Caracterización de la vulnerabilidad del acuífero Jayllihuaya .....	85
3.4.5.10. Generación de mapa de niveles de vulnerabilidad a la contaminación .....	85
3.4.5.12. Descripción de los niveles de vulnerabilidad del acuífero. ....	87
<b>IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>88</b>
4.1. Delimitación y caracterización del acuífero del centro poblado Jayllihuaya. ....	88
4.2. Determinación de los parámetros de vulnerabilidad a la contaminación. ....	90
4.3. Caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación.....	98
<b>IV. CONCLUSIONES.....</b>	<b>103</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>104</b>
<b>VII. REFERENCIAS .....</b>	<b>105</b>
<b>VIII ANEXOS.....</b>	<b>107</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1:</b> Modelo de un acuífero. ....	25
<b>FIGURA 2:</b> Fuentes difusas y puntuales de contaminación del acuífero. ....	34
<b>FIGURA 3:</b> Proceso de atenuación en la zona vadosa en el sistemas acuífero. ....	39
<b>FIGURA 4:</b> Diagrama del índice GOD. ....	49
<b>FIGURA 5:</b> Ilustración de un acuífero surgente. ....	51
<b>FIGURA 6:</b> Ilustración de un acuífero confinado. ....	52
<b>FIGURA 7:</b> Ilustración de un acuífero semiconfinado. ....	53
<b>FIGURA 8:</b> Tipo de acuífero no confinado. ....	57
<b>FIGURA 9:</b> Descripción esquemática de la determinación de los parámetros GOD. ....	58
<b>FIGURA 10:</b> Mapa de Vulnerabilidad método GOD. ....	59
<b>FIGURA 11:</b> Ubicación geográfica del Centro Poblado de Jayllihuaya. ....	63
<b>FIGURA 12:</b> Ubicación política del Centro Poblado de Jayllihuaya. ....	64
<b>FIGURA 13:</b> Ubicacion del Cetro Poblado de Jayllihuaya. ....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Clasificación de los sistemas acuíferos.....	28
<b>Tabla 2:</b> Métodos para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos. ....	42
<b>Tabla 3:</b> Valoración del índice GOD.....	46
<b>Tabla 4:</b> Definición practica de los distintos niveles de contaminación del acuífero. ...	47
<b>Tabla 5:</b> Inventariado de pozos en el Centro Poblado de Jayllihuaya. ....	89
<b>Tabla 6:</b> Control del nivel freático mensual. ....	92
<b>Tabla 7:</b> Estratigrafía del Centro Poblado Jayllihuaya.....	94
<b>Tabla 8:</b> Índice de vulnerabilidad a la contaminación.....	96

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

AASHTO	:	Sistema de clasificación de suelos.....	20
Depth	:	Profundidad del nivel freatico .....	43
GOD	:	Siglas en igles, Groundwater, Overal, Depth .....	11
Ground water	:	Tipo de acuifero .....	38
INEI	:	Instituto Nacional de Estadística e Informática.....	55
INIA	:	Instituto Nacional de Investigación Agraria .....	49
Kriging	:	Método de interpolacion .....	65
Overall	:	Litología de la zona .....	43
SERNANP	:	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas.....	54
SIG	:	Sistema de Información Geográfica.....	44
SINANPE	:	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado .....	54
TDPS	:	Titicaca, Desaguadero - Poopó - Salar de Coipasa.....	45

## RESUMEN

La presente investigación se realizó en el Centro Poblado Jayllihuaya durante el año 2017, con el objetivo principal de determinar el nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Jayllihuaya, aplicando el método paramétrico de superposición e índices GOD, denominado así por sus siglas en inglés, que contempla los siguientes parámetros G (Ground wáter occurrence–tipo de acuífero), O (Overall Lithology–litología de la cobertura) y D (Depth to Groundwater–profundidad del nivel freático). Para la concreción del objetivo propuesto se realizaron las actividades: caracterización y delimitación del acuífero, control del nivel freático mensual, sistematización de los parámetros más representativos en la matriz de indexación GOD, determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación y la zonificación de los niveles de vulnerabilidad. Como resultado se tiene: la zona baja, que comprende al Barrio Panamericana, Barrio Llamajahuira, Urbanización Aziruni I etapa, Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Najar, Urbanización Rosario Coñiri, tiene un índice de vulnerabilidad alta (0.55); la zona central, que abarca la Urbanización Aziruni III etapa, Barrio central Santiago Apóstol, Barrio Santiago Aziruni, Barrio Salihuani, Barrio Inkapujhio Sasani, Barrio Turnuhui Miraflores, tiene un índice de vulnerabilidad que va de moderada a alta ( 0.504); y por último la zona alta, que incluye el Barrio Santiago Vizcachani, Barrio ecológico Yauruyo, Urbanización las lomas Jayllihuaya, Barrio alto Jayllihuaya, que tiene un índice de vulnerabilidad moderada (0.384). En base a ello se puede concluir que el 60 % del área del acuífero se encuentra con niveles de vulnerabilidad alta.

**Palabras Clave:** Acuífero, contaminación, método GOD, vulnerabilidad.

## ABSTRACT

The present investigation was carried out in the Jayllihuaya Populated Center during the year 2017, with the main objective of determining the level of vulnerability to contamination of the Jayllihuaya aquifer, applying the parametric method of superposition and GOD indexes, named for its acronym in English, that contemplates the following parameters G (Ground water occurrence-type of aquifer), O(Overall Lithology-lithology of the cover) and D (Depth to Groundwater-depth of the phreatic level). For the realization of the proposed objective activities were carried out: characterization and delimitation of the aquifer, control of the monthly water table, systematization of the most representative parameters in the GOD indexation matrix, determination of the level of vulnerability to pollution and zoning of the levels of vulnerability. As a result we have: the lower zone, which includes the Barrio Panamericana, Barrio Llamajahuira, Urbanization Aziruni I stage, Urbanization Aziruni II stage - Muñoz Najjar, Urbanization Rosario Coñiri, has a high vulnerability index (0.55); the central zone, which includes the Aziruni Urbanization III stage, Santiago Apóstol central district, Santiago Aziruni neighborhood, Salihuani neighborhood, Inkapujhio Sasani neighborhood, Turnuhui Miraflores neighborhood, has a vulnerability index ranging from moderate to high (0.504); and finally, the upper zone, which includes the Santiago Vizcachani neighborhood, the Yauruyo ecological neighborhood, the Jayllihuaya hills, the Jayllihuaya upper neighborhood, which has a moderate vulnerability index (0.384). Based on this, it can be concluded that 60% of the aquifer area has high levels of vulnerability.

**Keywords:** Aquifer, pollution, GOD method, vulnerability.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua subterránea por su ubicación en el subsuelo, posee de manera natural un mayor grado de protección a la contaminación directa que las aguas superficiales; sin embargo, cuando se produce su contaminación, este es un proceso cuyo efecto resulta difícilmente reversible (Foster, 1987). Recientemente, varios países han experimentado problemas de contaminación del agua subterránea, por lo que la evaluación de vulnerabilidad a la contaminación ha sido utilizada cada vez más a partir de los años noventa, como una herramienta para planear y proteger los acuíferos.

En el caso de nuestro país, con la promulgación de la Ley de recursos hídricos (29338) se ha dado un gran paso para el aprovechamiento y conservación de este recurso. Sin embargo, debido a la limitada cantidad de estudios realizados, en gran parte el territorio Nacional no se tienen detalles hidrogeológicos de los acuíferos, por lo son casi desconocidas; por otra parte, debido a su naturaleza subterránea, no podemos conocer sus características hidrogeológicas, el comportamiento del agua y el transporte de contaminantes, debido a que no pueden observarse ni medirse fácilmente; esto porque no todos los perfiles de los suelos ni las condiciones hidrogeológicas son iguales. Es por ello que actualmente se acepta de manera generalizada, la evaluación de la vulnerabilidad como medida preventiva y de control de la contaminación para la sustentabilidad y seguridad a largo plazo.

Debido a lo dicho anteriormente, surge la necesidad de conocer la forma en que responde el medio geológico que protege al acuífero en el centro poblado Jayllihuaya; y es por ello que se plantea la realización de la determinación del

nivel de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea; puesto que en la zona aún se localizan poblaciones que no cuenta con servicio de saneamiento, donde se desarrollan las actividades de agricultura y ganadería aún no han perdido la cultura de extracción de agua subterránea por medio de pozos domésticos de poca profundidad y la utilización de pozos sépticos que presentan malos diseños. Además, en esta zona se localizan actividades tales como: vertederos ilegales de residuos líquidos, venta y almacenamiento de combustibles, saneamiento de desechos sin sistema de alcantarillado, posibilitando la generación de residuos contaminantes que pueden ser arrastrados por el agua de lluvia y transmitidas hidráulicamente hacia el acuífero, convirtiéndolo en un foco de contaminación para los recursos hídricos de la zona.

La mejor protección a la contaminación del acuífero es la prevención, es por ello que es importante contar con información básica, para esto es necesario usar metodologías que faciliten calcular el nivel de vulnerabilidad a la contaminación generando valores cuantificables y mapas cartográficos representativos, el más reconocido en el ámbito internacional y difundido en América Latina por ser un método sencillo y sistemático es la metodología GOD, por lo que se usa cuando se cuenta con escasos datos, y según el alcance en dimensión que se le dé a la evaluación y el grado de detalle que se quiere conseguir, es que se opta por este método.

A nivel local en cuanto al tema de determinación del vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea aún no se han concretado estudios de esta magnitud, es por ello, que con la finalidad de estudiar de manera objetiva el nivel de vulnerabilidad este estudio lleva como título "determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del centro poblado Jayllihuaya-

Puno por el método GOD, 2017” pretendiendo determinar y mapear las aéreas con un cierto nivel de vulnerabilidad, y a la vez sirva como herramienta con miras a la protección de la calidad del acuífero.

Formulación de preguntas del problema de investigación:

¿Cuál es el nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado de Jayllihuaya?

¿Cuáles son las características del acuífero en el Centro Poblado de Jayllihuaya y de su área de influencia?

¿Cuáles son las características principales de los parámetros que influyen en el nivel de vulnerabilidad a la contaminación en el acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya?

¿Cuáles es la delimitación y las características de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya?

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

El presente trabajo de investigación da a conocer el nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya, dado que aún existe el desconocimiento de la misma, debido a que no se han hecho estudios de esta naturaleza determinando la vulnerabilidad a la contaminación de este acuífero de manera cuantificable y en mapas cartográficas en el mencionado centro poblado.

Los resultados obtenidos de los niveles de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya y con la determinación de una zonificación de vulnerabilidad, permitirá determinar en diversos sectores del centro poblado con vulnerabilidades medio y alto tomar medidas preventivas,

puesto que el acuífero en la zona constituye una fuente potencial de aprovechamiento futuro de agua para uso poblacional e industrial de dicho centro poblado y alrededores, por lo que con el fin de preservar su conservación y planificar su aprovechamiento es necesario realizar el estudio. Esto permitirá que las diferentes entidades vinculadas a su conservación y uso puedan tomar decisiones con fines de aprovechamiento y así mismo garanticen su protección de dicho recurso.

La presente investigación utilizó una metodología que permite determinar el nivel de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero de una manera sencilla y se adecua a la zona con escasa información, asimismo es aplicable para diferentes zonas en la región y en nuestro país.

Se espera que los resultados presentados en la investigación sirvan para la definición de directrices que permitan tanto la protección del recurso hídrico subterráneo (acuífero) como las fuentes de abastecimiento (pozos) y, además puedan ser la base para futuros trabajos de investigación.

### **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION**

#### **1.3.1. Hipótesis general**

El nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado de Jayllihuaya es mediana.

#### **1.3.2. Hipótesis específicas**

Según las características hidrogeológicas y litológicas en el centro poblado de Jayllihuaya existe el tipo de acuífero libre y semiconfinado.

Tales como el tipo de acuífero, litología de la cobertura, profundidad del acuífero, determinan que en ella existan zonas altas y medianamente vulnerables a la contaminación.

Existen zonas específicas del acuífero de Jayllihuaya con bajo, mediano y alto nivel de vulnerabilidad a la contaminación.

#### **1.4. OBJETIVOS**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar el nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya por el método GOD en el año 2017.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Delimitar y caracterizar el acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya-Puno.
- b) Determinar los parámetros de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en el Centro Poblado Jayllihuaya-Puno.
- c) Zonificar y caracterizar el nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya-Puno.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. ANTECEDENTES

#### 2.1.1. Internacionales

Mena y Montes (2010), en su tesis *“Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de mariona, departamento de san salvador”* Tuvo como objetivo evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, para determinar las zonas más vulnerables a la contaminación. En dicho trabajo se aplica el método GOD y se hizo uso del programa ArcView GIS 3.1. Donde se obtuvieron valores de vulnerabilidad que varían de 0.34 a 0.38, determinándose que el área de estudio tiene vulnerabilidad “moderada”; que indica que estas aguas subterráneas tienen una sensibilidad media ante la contaminación, por lo que los esfuerzos por remediar el daño hecho al acuífero también serían de un nivel intermedio. Este resultado se obtuvo mediante la evaluación de tres parámetros, tipo de acuífero, litología de cobertura, profundidad del nivel freático, como su método lo indica; en donde dos de ellos eran constantes en toda la zona, variando únicamente la profundidad al nivel freático y que la mayoría de estos valores pertenecían a un solo rango de evaluación; razón por la cual hubo poca variación en el resultado.

Figueroa (2010) en su tesis *“Evaluación del peligro potencial de contaminación de las aguas subterráneas en la provincia de Talagante”*, El objetivo fue determinar y mapear las zonas en las cuales existe peligro de contaminación de las aguas subterráneas. La metodología que se adoptó, fue determinar en forma independiente para posteriormente superponer los resultados obtenidos. A

través de este proceso, se pudo conocer las áreas en donde existe peligro de contaminación. Por tales motivos, se realizó una descripción y mapeamiento de las características del área de estudio, con lo cual se logró obtener los datos necesarios para la posterior aplicación de los métodos de evaluación de la vulnerabilidad del acuífero, además, esto permitió adquirir una mayor comprensión del área de estudio, lo cual fue útil para la correcta interpretación de los resultados obtenidos tras la aplicación del método. De esta manera, la determinación de la vulnerabilidad del acuífero, se realizó aplicando el método cualitativo conocido como el método GOD. De acuerdo al método, las zonas con un alto nivel de vulnerabilidad, serían aquellas en donde la profundidad de las aguas subterráneas es menor a los 10 mt, disminuyendo a un nivel moderado de vulnerabilidad cuando la profundidad de las aguas supera este último valor.

Cárdenas y Solano (2010), tesis *“Determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos del sector rural de la localidad de Usme, Bogotá D.C, con miras a la formulación de los lineamientos de un plan de gestión ambiental, con énfasis en el recurso hídrico de la zona”*, el objetivo fue realizar un estudio de vulnerabilidad intrínseca del recurso hídrico subterráneo. La metodología usada para la tesis fue la metodología GOD, con el fin de determinar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea. Los resultados de vulnerabilidad, se presentan en la matriz de indexación del método GOD, en la cual se identifican las diferentes unidades geológicas de la zona de estudio, se describen sus características litológicas, el tipo de acuífero al que dichas unidades dan origen y la profundidad del nivel estático. Cada uno de los parámetros, indicado por el método, fue evaluado obteniendo valores que oscilan entre 0 y 1, dependiendo de su influencia en la protección de los acuíferos a la

contaminación. Posteriormente, se calculó el índice de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. Llego a la conclusión de que el método GOD para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos a la contaminación, es una herramienta que favorece la sostenibilidad de los recursos naturales permitiendo la planificación del territorio en función de las potencialidades y debilidades del recurso hídrico de una zona de interés. De igual manera, su implementación es valiosa para regiones que no cuentan con toda la información que requieren otros métodos de determinación de la vulnerabilidad, por lo que se puede presentar como una herramienta de gestión ambiental de primera mano para regiones que cuentan con escasos recursos.

### **2.1.2. Nacionales**

Palomino (2009) investigación *“Análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas utilizando mapas de vulnerabilidad y peligro caso acuífero Aguascocha”*, Tuvo como objetivo analizar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero Aguascocha, frente a los peligros identificados actuales, siendo la principal actividad contaminante las actividades mineras. Construcción de mapas de vulnerabilidad intrínseca, aplicando el método de vulnerabilidad GOD y construcción de mapas de peligros, teniendo como unidad de estudio la cuenca y como principal actividad contaminante las actividades mineras. Para construir el mapa de riesgo de contaminación se construyó previamente el mapa de vulnerabilidad aplicando el método GOD (Foster e Hirata, CEPIS 1991) y el mapa de peligros aplicando la metodología modificada por el autor del COST ACTION 620 (Cooperación Unión Europea para la Investigación Técnica). Al superponer estos mapas se obtuvo el mapa de riesgo que identificó diversas áreas de la cuenca con alto, medio y bajo riesgo de

contaminación. Esta es una herramienta que permite plantear medidas preventivas puntuales para aminorar el riesgo de contaminación en las áreas específicas de la cuenca con riesgo alto.

Molfino (2015) en su tesis *“Correlación de las aguas subterráneas con el ámbito urbano de Piura”* Tuvo como objetivo analizar la litología superficial en correlación con la dinámica subterránea, empleando aquellos años con mayor información histórica, y una distribución de dicha información en el área urbana de Piura considerando su expansión territorial. Se pretendió conocer cómo es la interacción de las aguas subterráneas con el medio, ya que muchas veces será necesario conocer esta relación antes de definir las acciones más adecuadas para la realización de diversos proyectos. Mediante el empleo de los sistemas de información geográfica, se ha podido organizar y relacionar la información litológica, de niveles freáticos y algunos datos de calidad de agua. Permitiendo así crear una base de datos.

### **2.1.3 Locales**

Aguilar (2010) en su tesis *“Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca de Jayllihuaya con fines de consumo doméstico y agropecuario”*, su objetivo fue evaluar la calidad del agua en pozos de abastecimiento público, aguas subterráneas con peligro de contaminación. La metodología usada para la tesis fue, monitorear el comportamiento de los contaminantes tanto en los aspectos físico químico y bacteriológico, considerando un tamaño de muestra de once pozos, a fin de monitorear el comportamiento de los contaminantes. Los análisis se realizaron en los laboratorios de Química de la Facultad de Ingeniería Química y laboratorio de microbiología de la Facultad de Ciencias biológicas de la Universidad Nacional del altiplano. El resultado final en el análisis de la calidad

de agua de los pozos y manantiales actualmente viene siendo utilizado para el consumo doméstico y agropecuario, y son ligeramente aceptables, pero se ve afectado por la contaminación biológica.

Romero (2010) en su tesis *“La actividad antropogénica, el suelo y su efecto en la contaminación del agua subterránea en el centro poblado de Jayllihuaya – Puno – 2010”*, tuvo como objetivo evaluar en qué medida influye la actividad antropogénica, las propiedades del suelo en la calidad del agua subterránea en el Centro Poblado de Jayllihuaya. El estudio consistió en hacer una evaluación del subsuelo, lo que permitió obtener las propiedades físicas y mecánicas, para determinar el comportamiento del suelo y el agua subterránea; que está relacionado a periodos de precipitaciones, a su permeabilidad, actividad antropogénica y la erosión superficial de la roca de basamento. Llegando al siguiente resultado, en el área de estudio el tipo de suelo que predomina es un GM = Gravas limosas, mezclas pobremente gradadas de grava arena-limo, SM= Arenas limosas, mezclas pobremente gradadas de arena-limo, y SC = Arenas arcillosas, mezclas pobremente gradadas de arena-arcilla, por lo tanto, la velocidad obtenida para este acuífero es de 0.001 m/día y la dirección del flujo subterráneo es de Sur a Norte. Así de esta manera concluyo que la contaminación del agua por coliformes totales estaría relacionado con la contaminación superficial desde las letrinas públicas.

Chaiña (1999) en su tesis *“Zonificación geotécnica de los suelos y afloramientos rocosos de la microcuenca de Puno”*, tuvo como objetivo zonificar geotécnicamente el área de la Microcuenca de Puno. La metodología usada para la tesis fue evaluar el comportamiento de los suelos y rocas aflorantes. En el estudio se hace referencia a la evaluación "in situ" y en laboratorio de muestras

de suelos y rocas de la zona bajas, medias y altas; se evaluó los tipos de suelos y de rocas, sus propiedades físicas y mecánicas, parámetros de resistencia, capacidad portante, peso específico, etc. En el área circunlacustre, zonas de Salcedo, Aziruni, Jayllihuaya, Bellavista, Ciudad Universitaria, Barrio Porteño, Chanu Chanu, Cesar Vallejo, Terminal Terrestre. Con la información y la interpretación de los resultados se elaboró el plano de zonificación geotécnica, determinándose zonas estables e inestables; para el Centro Poblado de Jayllihuaya se obtuvo como resultado que tiene características casi similares a la formación de Salcedo, en vista que también han sido originados de rocas de tipo sedimentario como son areniscas y conglomerados, que son depósitos coluviales y fluviales con clastos de arenisca, cuarcita que se observan gravas pobremente graduadas con partículas sobre redondeadas con matriz arenosa no plástica, el tipo de suelo según la descripción AASHTO es arena limosa, grava limosa y gravas arenosas que son suelos bastante porosos.

## 2.2. CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.2.1. Acuífero

Formación geológica, o grupo de formaciones, o parte de una formación, capaz de acumular una significativa cantidad de agua subterránea, la cual puede brotar, o se puede extraer para consumo. Es interesante hacer notar que los acuíferos pueden estar contaminados, ya sea por productos químicos o por microorganismos patógenos, por lo que su uso está cada vez más limitado (Price, 2003).



**FIGURA 1:** Modelo de un acuífero.

Fuente: Custodio & Llamas, (2001).

### 2.2.2. Clasificación de los sistemas acuíferos.

#### 2.2.2.1. Según sus características litológicas.

Es importante previo a hablar de clasificaciones de acuíferos, hacer mención de las formaciones geológicas que pueden o no contener agua en ellas, y estas las podemos clasificar debido a sus características litológicas, por lo que podemos mencionar:

- ✓ Acuífero
- ✓ Acuícludos
- ✓ Acuitardos
- ✓ Acuífugos

**Acuífero:** Del latín aqua=agua y fero=llevar, se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades.

**Acuícludos:** Del latín claudere que significa encerrar o cerrar, se define como aquella formación geológica que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Dentro de este grupo podemos incluir los cienos y legamos (arcillas por lo general) de origen deltaico y/o estuario. Que a pesar de poseer enormes cantidades de agua (superiores al 50% en volumen) no son hidrogeológicamente aptas para construcción de captaciones de aguas subterráneas.

**Acuitardos:** Del latín tardare que significa retardar, hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros ciertos casos. Por ejemplo, un nivel de arcillas limosas o arenosas, puede comportarse como un Acuitardo, si está dispuesto encima o debajo

de un acuífero más importante, al cual puede recargar, o incluso recibir agua del mismo.

**Acuífugos:** Del latín fugere que significa huir, son aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como, por ejemplo, un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación. (Custodio & Llamas, 2001).

#### 2.2.2.2. Según sus características hidrostáticas.

Los acuíferos se clasifican, en función de su estructura y el tipo de porosidad derivada de los materiales que conforman el acuífero.

- **Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** Son acuíferos cuyo piso es impermeable y su techo está a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuífero es directa y se realiza por infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada o por infiltración de ríos o lagos. Son los más afectados en caso de sequía, ya que el nivel freático oscila con los cambios climáticos. Pozos muy someros se ven afectados (se secan), cuando el nivel freático desciende hasta por debajo de la profundidad total del pozo.
- **Acuíferos confinados, cautivos o a presión:** Limitados en su parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad. La presión hidrostática a nivel del techo del acuífero es superior a la atmosférica y la recarga es lateral. Cuando se realiza un pozo en este tipo de acuíferos, el agua contenida en ellos asciende rápidamente por su interior. Si el agua alcanza la superficie, al agua se llama surgente. Superficie potenciométrica se le denomina al nivel de agua virtual que se genera cuando se integran todos los niveles hidráulicos observados en los pozos del acuífero confinado.

- Acuíferos semiconfinados o semicautivos:** Son mucho más frecuentes en la naturaleza que los cautivos. En estos, el techo, el piso o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad que si bien dificultan no impiden la circulación vertical del agua. Para que ello suceda, además de la permeabilidad deben existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y otro superior. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de las unidades de baja permeabilidad denominadas semiconfinantes, filtrantes o acuitardos. (M. Collazo, & J. Montaña, 2012).

A continuación, se presenta un resumen de la correlación de las unidades estratigráficas con las unidades hidrogeológicas, (Ver Tabla 01) indicando la capacidad y características principales de cada uno de los acuíferos:

**Tabla 1:** Clasificación de los sistemas acuíferos.

TRANSMISIVIDAD		COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO		TIPO DE POROSIDAD		CAPACIDAD ESPECIFICA	
Acuífero	Formaciones geológicas que pueden almacenar y transmitir agua	Libre	Son aquellos en los que el nivel superior de la saturación se encuentra a presión atmosférica	Primaria	Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular	Muy Alta	Mayor que 5.0 l/s/m
Acuitardo	Formaciones semipermeables que contienen agua pero la transmiten muy lentamente	Semi-confinado	Son aquellos en que la condición confinante está dado por acuitardos, los cuales permiten un aporte de aguas hacia la zona saturada	Secundaria	Rocas con flujo esencialmente y a través de fracturas (rocas fracturadas y/o carstificadas)	Alta	entre 5.0 y 2.0 l/s/m
Acuicludo	Formaciones porosas que pueden contener agua pero no la transmiten	Confinado	Son aquellos acuíferos en medio de dos formaciones impermeables ya sean acuíferos o acuicludos	Semi-Impermeable	Sedimentos y rocas con limitados a ningún recurso de aguas subterráneas	Mediana	entre 1.0 y 2.0 l/s/m
Acuíferos	Formaciones con nula porosidad que no pueden almacenar ni transmitir agua					Baja	entre 1.0 y 0.05 l/s/m
						Muy baja	Menor que 0,05 l/s/m

Fuente: Gonzales. 2015.Pg: 54

### 2.2.3. Características y propiedades de los acuíferos.

No todas las formaciones geológicas, o rocas en general, poseen, la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua en cantidades apreciables; es por ello que los acuíferos tienen ciertas características que los diferencian de otras formaciones geológicas. Estas características y propiedades que permiten definir y en algunos casos, predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a unas determinadas acciones exteriores. (Custodio & Llamas, 2001).

Todos los acuíferos tienen dos características fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de permitir el flujo del agua subterránea. Pero el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra y su magnitud puede variar con la estructura geológica, de unos cuantos km<sup>2</sup> a muchos miles de km<sup>2</sup>.

Las principales características son las siguientes:

1. Todo acuífero o capa subterránea saturada de agua va a parar al mar, va a un río, o se va otro acuífero o a un lago.
2. Los ríos y cañadas se “recogen” básicamente de los acuíferos, aun en épocas de sequías.
3. Los acuíferos libres están constituidos por arenas y gravas del cuaternario. Debido a su heterogeneidad, estos sedimentos presentan horizontes arcillosos que originan localmente acuíferos confinados.
4. La alimentación de los acuíferos es esencialmente pluvial.

5. Puede almacenar y transmitir cantidades significativas de agua, que puede ser captada en su caso para consumo humano.
6. La recarga de acuíferos se produce de forma natural por infiltración del agua de lluvia que cae sobre ellos, de los ríos o los lagos que los atraviesan o limitan, o del excedente de agua de los cultivos asentados sobre ellos.

#### **2.2.4. Comportamiento y distribución del agua en el subsuelo.**

Es necesario conocer y estudiar la distribución de los materiales en el subsuelo para poder conocer la estructura y entender el comportamiento del agua subterránea. El agua contenida en el subsuelo se distribuye en dos zonas: zona saturada y zona no saturada.

La zona no saturada se encuentra entre la superficie del suelo y el nivel freático, dividiéndose en tres franjas a saber: la humedad del suelo, la intermedia, y la franja capilar. Estas varían en profundidad y sus límites no están definidos exactamente mediante diferencias físicas de los materiales geológicos, por lo cual se da generalmente una transición gradual de una a otra.

La zona saturada se localiza a partir del nivel freático hacia abajo. Se caracteriza porque todos sus poros o grietas se encuentran saturados.

#### **2.2.5. Dinámica del agua subterránea.**

El agua que después de un proceso de infiltración y ayudada por la acción de la gravedad logra incorporarse a la zona de saturación es denominada agua subterránea. La zona de saturación es comparable a un sistema natural de embalse, en el que su capacidad total equivale al

volumen total de los poros o fracturas de las rocas que se hallan saturadas de agua, además de otros parámetros que determinan su dinámica como: permeabilidad, transmisividad, porosidad y coeficiente de almacenamiento.

El espesor de la zona de saturación puede variar en cuanto a que en algunas zonas es de tan solo unos pocos metros mientras que en otras puede llegar hasta cientos de metros. Los factores que determinan la magnitud del grosor de la zona saturada están relacionados principalmente con características locales como la geología (a nivel local), la porosidad primaria o secundaria en las formaciones, la relación entre la recarga y el movimiento del agua desde zonas de recarga hasta áreas de descarga.

#### **2.2.6. Contaminación de acuíferos**

En los últimos años ha tomado gran relevancia el estudio de las aguas subterráneas, ya que estas disponen la mayor parte del recurso hídrico dulce que puede ser usado en diferentes actividades por el ser humano; pero actualmente ya no sólo se trata de cómo encontrar agua, este vital líquido se encuentra afectado por las diferentes actividades humanas que han producido que la calidad de este ya no sea la misma que en el pasado, y es por medio del estudio de acuíferos y estudio de las diferentes fuentes de contaminación de éstos, que podemos llegar a entender en qué forma evitar que las aguas subterráneas sigan siendo contaminadas o por lo menos predecir la evolución del problema, (Mena, & Montes, 2010).

La contaminación de las aguas subterráneas se produce cuando los productos residuales de las diferentes actividades alcanzan el acuífero, provocando la presencia o el aumento de determinadas sustancias características de cada actividad.

Las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar. Sucede esto porque las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación.

Las causas de la contaminación de las aguas pueden ser de dos tipos:

- ✓ Contaminación debida a causas naturales
- ✓ Contaminación debida a actividades humanas

La contaminación debido a causas naturales se debe principalmente a sustancias químicas como el arsénico y flúor que se originan a partir de la disolución en los sedimentos de partículas de origen volcánico que se depositaron en diferentes regiones durante las últimas decenas de miles años; pero también podemos encontrar en menor medida carbonatos de sodio y magnesio, que dan dureza al agua y se depositan en forma de sarro en las superficies metálicas, losas, vidrios, etc.

Sobre la contaminación debido a actividades humanas podemos mencionar la ocasionada por:

- ✓ Residuos sólidos urbanos
- ✓ Aguas residuales
- ✓ Actividades agrícolas
- ✓ Ganadería
- ✓ Actividades industriales y mineras
- ✓ Otras

Existen diferentes tipos de procesos contaminantes que pueden afectar las aguas subterráneas, se suelen distinguir dos tipos de procesos contaminantes de las aguas subterráneas: los “puntuales” que afectan a zonas muy localizadas, y los “difusos” que provocan contaminación dispersa en zonas amplias, en las que no es fácil identificar un foco principal.

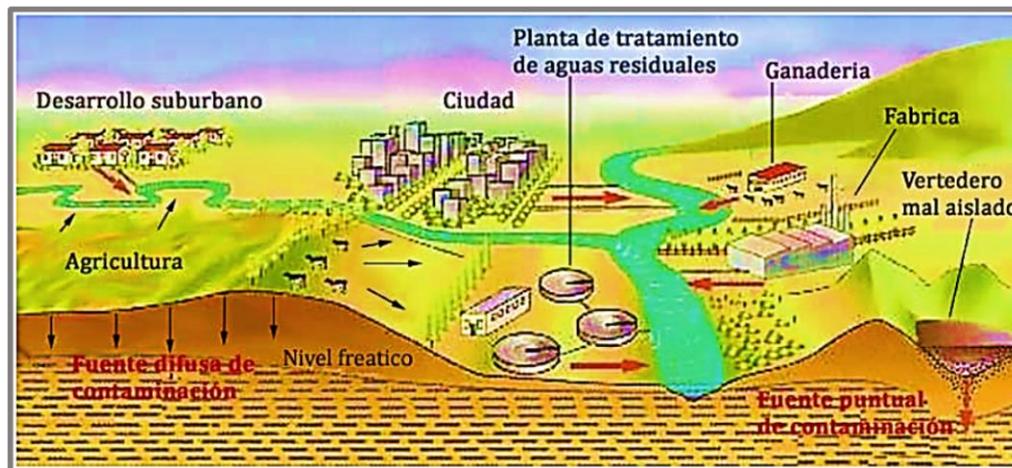
Entre las actividades que causan contaminación puntual encontramos a:

- ✓ Lixiviados de vertederos de residuos urbanos y fugas de aguas residuales que se infiltran en el terreno.
- ✓ Lixiviados de vertederos industriales, derrubios de minas, depósitos de residuos radiactivos o tóxicos mal aislados, gasolineras con fugas en sus depósitos de combustible, etc.
- ✓ Pozos sépticos y acumulaciones de purines procedentes de las granjas.

Entre las actividades que causan contaminación difusa encontramos a:

- ✓ Uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura o en las prácticas forestales.

- ✓ Explotación excesiva de los acuíferos que facilita el que las aguas salinas invadan la zona de aguas dulces, por desplazamiento de la interface entre los dos tipos de aguas.



**FIGURA 2:** Fuentes difusas y puntuales de contaminación del acuífero.

Fuente: Mena, & Montes, (2010).

El tiempo con que se produce la contaminación obedece a varios factores, los cuales se describen a continuación:

a) Dilución

La importancia de este proceso viene ligada a la forma de producirse la contaminación; el agua contaminada es dispersada en el acuífero, lo cual supone un cierto grado de mezcla de los contaminantes con el agua, por lo que el ambiente físico y la estructura, mineralogía y características hidráulicas de los acuíferos juegan un papel muy importante en la resistencia a la contaminación.

b) Filtración mecánica

En materiales granulares finos pueden retenerse partículas en suspensión y microorganismos. En arenas gruesas, gravas o acuíferos

fracturados, es casi inexistente. Además, la capacidad de cualquier filtro es limitada.

c) Precipitación

Pueden precipitar diversas sustancias según los cambios en el pH o el potencial redox del medio, al igual que la filtración, puede disminuir fuertemente la permeabilidad del medio.

d) Procesos de oxidación reducción

Los procesos de oxidación son muy importantes en la disminución de la contaminación por productos orgánicos y nitrogenoides; se realiza predominantemente durante la infiltración en medio no saturado, aunque también pueden producirse en el medio no saturado mientras no se consuma el oxígeno disuelto en el agua.

e) Adsorción y absorción por el terreno

Un terreno puede retener cantidades importantes de materiales contaminantes, en especial aquellos que consisten en moléculas complicadas y de gran tamaño. La capacidad de retención tiene un límite, de modo que, si el compuesto retenido no se descompone por otras acciones o se desintegra radiactivamente, el terreno no solo admite en unas determinadas circunstancias una cantidad máxima del mismo.

f) Desintegración o descomposición

Los elementos radiactivos y algunos productos químicos, como los pesticidas, desaparecen con el paso del tiempo, se habla de desintegración radiactiva o de descomposición, en el caso de los pesticidas. En ambos, el factor crucial es la vida media (tiempo en el que la concentración de la sustancia se reduce a la mitad). Esto será efectivo en elementos cuya vida

media sea corta en relación con el tiempo de tránsito del agua en el acuífero. La vida media de algunos pesticidas es de unos pocos días, mientras que la de ciertos elementos radiactivos es de miles de años.

### **2.2.7. Vulnerabilidad de acuíferos.**

La definición tradicional de vulnerabilidad de un acuífero se refiere a la susceptibilidad natural que presenta a la contaminación, y está determinada principalmente por las características intrínsecas del acuífero, es decir de las características propias del sistema natural del acuífero. De acuerdo al National Academy Council (1993) el concepto de Vulnerabilidad del Agua Subterránea se refiere a la tendencia o probabilidad que un contaminante alcance una posición especificada en el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno.

Otros autores definen la vulnerabilidad del acuífero como su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta. Es en efecto, lo inverso a la capacidad de asimilación de contaminantes de un cuerpo receptor de agua superficial, con la diferencia que los acuíferos tienen una cubierta de substratos que proporcionan una protección adicional.

Siguiendo este orden de ideas, la vulnerabilidad a la contaminación también se definiría como la probabilidad de que el agua subterránea en la parte superior de un acuífero sea contaminada en un nivel inaceptable por las actividades que se desarrollan en la superficie del terreno que la suprayace.

Se produce contaminación de aguas subterráneas cuando las sustancias residuales de cierta actividad llegan al nivel piezométrico o freático, a través

de los diferentes estratos ubicados sobre éste nivel, provocando la presencia o aumento de estas sustancias en el sistema.

La vulnerabilidad estaría dada por las características intrínsecas de un acuífero, que lo hacen más o menos sensible a ser adversamente afectado por una carga contaminante. La vulnerabilidad de un acuífero no es una propiedad absoluta y tampoco es mensurable, por tales motivos no tiene dimensión. Foster & Hirata (1991).

La vulnerabilidad a la contaminación no es independiente a la clase de contaminante, por eso se definen dos tipos de vulnerabilidad:

**Vulnerabilidad intrínseca o natural (vulnerabilidad del acuífero):**

Depende exclusivamente de las características hidrogeológicas del acuífero, es decir es función de las condiciones naturales del acuífero y no considera ni los atributos ni el comportamiento de contaminantes específicos. Es decir, se trata de la evaluación de la capacidad de respuesta en general que tiene el sistema cuando no se considera los factores externos y tiene una validez genérica. Así habrá sistemas, que por sus características son intrínsecamente más difíciles de contaminar que otros.

**Vulnerabilidad específica (vulnerabilidad por la actividad):**

Hace referencia a un contaminante o un grupo de contaminantes con propiedades similares, tendrá en cuenta factores de carácter externo, por ejemplo, de origen climatológico (pluviometría y temperatura.) y otros relativos a la carga contaminante: procedimiento y lugar de penetración del contaminante en el acuífero, movilidad y persistencia del contaminante en el terreno.

De esta manera, la vulnerabilidad de un acuífero está en función en función de los siguientes factores:

- La inaccesibilidad de la zona saturada en un sentido hidráulico a la penetración de contaminantes, y
- La capacidad de atenuación de los estratos ubicados encima de la zona saturada del acuífero, como resultado de su retención física y reacción química con los contaminantes.

#### **2.2.8. Importancia de la zona no saturada en la atenuación de contaminantes.**

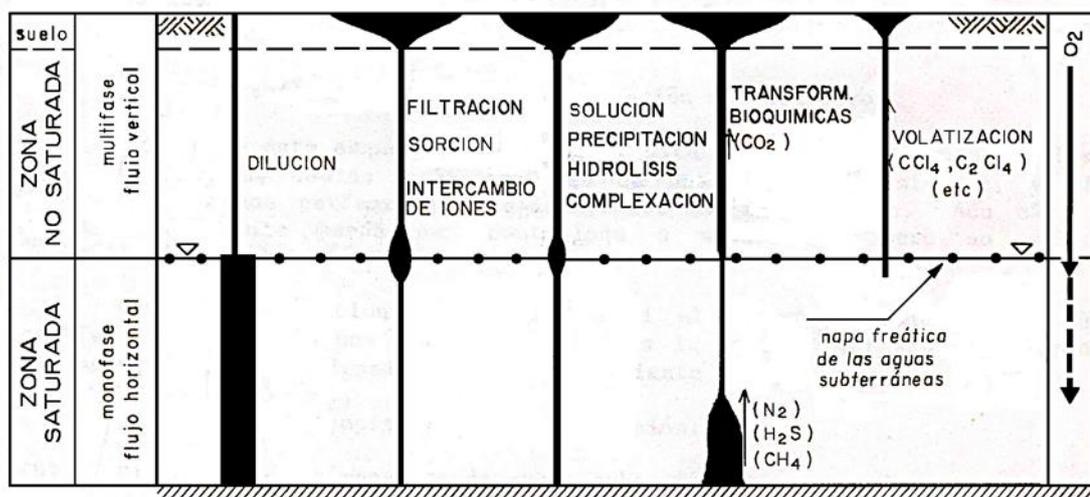
La zona no saturada es de especial importancia debido a que representa la primera línea de defensa natural contra la contaminación del agua subterránea. Esto no es solo debido a su posición estratégica entre la superficie y los acuíferos, sino también a que es un ambiente favorable para atenuar o eliminar contaminantes.

De acuerdo a Foster & Hirata (1991), la zona no saturada también cumple un papel fundamental en la atenuación de contaminantes, en ella el flujo de agua es normalmente lento y se restringe a los poros más pequeños. Además, la condición química en esta zona es normalmente aeróbica y frecuentemente alcalina.

Estas características, favorecen el desarrollo potencial de procesos tales como: la intercepción, sorción y eliminación de bacterias y virus, la atenuación de metales pesados y otros químicos inorgánicos a través de precipitación, y la sorción o biodegradación de hidrocarburos y compuestos orgánicos sintéticos.

Por lo tanto, un mayor espesor de la zona no saturada implica un mayor tiempo de tránsito de los contaminantes y mayor tiempo de contacto con el medio, lo que posibilita procesos de atenuación de mayor duración.

Entonces un acuífero tendrá baja vulnerabilidad a la contaminación cuando la zona no saturada sea de gran espesor y con gran contenido de arcillas y materia orgánica. Por el contrario, se evaluará un acuífero con vulnerabilidad alta cuando la zona saturada tenga poco espesor y altos contenidos de arena, grava o rocas de alta permeabilidad.



**FIGURA 3:** Proceso de atenuación en la zona no saturada en los sistemas de un acuífero.

Pese a lo anterior el flujo de agua en la zona no saturada por lo general resulta ser un proceso muy complejo, por lo que es difícil de predecir la capacidad de atenuación de contaminantes en ella. Este grado de atenuación dependerá del tiempo de recorrido o residencia del contaminante en esta zona, sin embargo, en el caso de contaminantes persistentes y móviles, la zona no saturada simplemente causa un retardo en su llegada a la napa sin que cause atenuación beneficiosa.

### **2.2.9. Resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico.**

La resistencia o inaccesibilidad de la zona no saturada en sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes es función de tres factores: (1) el régimen hidráulico del acuífero, grado de confinamiento, (2) la profundidad del nivel de agua en acuíferos libres o techo del acuífero confinado, (3) las características litológicas y el grado de consolidación de la zona no saturada o capas confinantes.

#### **1) Régimen hidráulico del acuífero.**

El régimen hidráulico del acuífero se refiere al grado de confinamiento de las aguas que contienen. Se distinguen así tres tipos de acuíferos: libres, confinados y semiconfinados. Así, por ejemplo, un acuífero confinado con un gran espesor confinante será menos vulnerable a la contaminación que un acuífero libre.

En caso de acuíferos multicapa se debe considerar el nivel permeable más superficial, salvo que se traten de pequeños niveles colgados. Asimismo, si existiese alguna duda sobre la continuidad y/o la naturaleza de los niveles confinantes, se considerará al acuífero como libre.

#### **2) Profundidad del agua subterránea.**

La profundidad del agua subterránea se refiere al *nivel freático* en los acuíferos libres y al *techo del acuífero* en los acuíferos confinados. La vulnerabilidad a la contaminación será menor en aquellos acuíferos que tengan un nivel freático a mayor profundidad. En estos casos, el espesor de la zona no saturada será mayor y, por lo tanto, el tiempo de tránsito para un contaminante en alcanzar el agua subterránea será mayor también, lo que

proporciona más posibilidad de atenuación de una cierta carga contaminante por degradación o retención natural.

### **3) Características litológicas.**

El tiempo de tránsito de un contaminante para alcanzar la zona saturada no es sólo función del espesor de la zona no saturada sino también de las características de los materiales que contiene. Estas características de la zona no saturada y de las capas confinantes hacen referencia a: (1) el *tipo de litología*, considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad de la matriz y contenido de humedad o retención específica en la zona no saturada y (2) el *grado de consolidación*, teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad secundaria por fisuras.

En medios granulares, por ejemplo, el tamaño de los granos determina la permeabilidad del medio, así cuanto mayor sea la granulometría menor será la capacidad de atenuación de la zona no saturada o de las capas confinantes. Por el contrario, en medios con granos finos (suelos con contenidos de arcilla y limo) la permeabilidad es menor, haciendo que el recorrido de los contaminantes sea más tortuoso hacia el acuífero. En un medio fracturado, por su parte, la vulnerabilidad es función de la intensidad y densidad del fracturamiento.

La información relativa a este factor deberá servir para describir la influencia del terreno en las condiciones de flujo de agua y transporte de contaminantes.

#### **2.2.10. Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero.**

Existen diferentes tipos de metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero las más importantes y trabajadas en

diferentes ámbitos y países, GOD, DRASTIC, SINTACS, GODS, EPIK, EKv,  $\Delta hT^1$ , estas metodologías se caracterizan por la determinación de la vulnerabilidad debido a las características intrínsecas del medio. Cada uno de los métodos tiene limitaciones en su uso que dependen de la cantidad y calidad de los datos disponibles y de la dimensión y objetivo de la evaluación (Vrba, 1994).

**Tabla 2:** Métodos para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos.

MÉTODOS	FACTORES	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD
**DRASTIC <sup>(7)</sup>	D: Profundidad del agua subterránea R: Recarga neta A: Litología del acuífero S: Tipo de suelo T: Topografía I: Impacto en el acuífero. Naturaleza de la zona no saturada C: Conductividad hidráulica del acuífero	$iV = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$ r: Factor de clasificación o valoración w: Factor de ponderación
*GOD <sup>(6)</sup>	G: Grado de confinamiento hidráulico. Hace referencia al tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea O: Litología de la zona no saturada. Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada. D: Profundidad del agua subterránea o del techo del acuífero confinado.	$iV = G \times O \times D$ Los parámetros G y O, pueden considerarse estables a lo largo del tiempo, mientras que el parámetro "D" es variable.
**SINTACS <sup>(8)</sup>	S: Profundidad del agua I: Recarga neta N: Zona no saturada T: Topografía A: Medio acuífero C: Conductividad hidráulica S: Suelo	$iV = (S_r \times S_w) + (I_r \times I_w) + (N_r \times N_w) + (T_r \times T_w) + (A_r \times A_w) + (C_r \times C_w) + (S_r \times S_w)$ r: Puntuación (1 – 10) w: Peso (1 – 5)
**EPIK <sup>1 (9)</sup>	E: Zona de intensa karstificación. P: Cobertura de protección I: Condiciones de infiltración K: Red kárstica.	$iV = (a \times E) + (b \times P) + (g \times I) + (d \times K)$ iV: factor de protección o índice de vulnerabilidad. E, P, I, K: puntuaciones de los parámetros a, b, g, d: factores de ponderación
**GALDIT <sup>(2)</sup>	G: Tipo de acuífero A: Conductividad hidráulica del acuífero L: Nivel del agua subterránea sobre el mar D: Distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa I: Impacto existente de la intrusión marina T: Espesor del acuífero	$iV = (W_1 \times G) + (W_2 \times A) + (W_3 \times L) + (W_4 \times D) + (W_5 \times I) + (W_6 \times T)$ W <sub>1</sub> a W <sub>6</sub> son pesos relativos asignados a los 6 factores.
<sup>1</sup> Método para estimar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos <sup>2</sup> Método aplicado para vulnerabilidad a la intrusión marina * Método de puntuación –RS. ** Método de puntuación y ponderación –PSCM..		iV = Índice de Vulnerabilidad

Fuente: Auge (2004)

Existen otros métodos como el de factores de atenuación que están muy relacionados con el tipo de contaminante y resultan mucho más complejos. Debido a la densidad y características de la información obtenida. Para este caso específico, se definió desde el anteproyecto, que la metodología más apta para la evaluación de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación es la G.O.D, debido principalmente a la cantidad de información disponible y la extensión del área.

Además, los autores Vrba & Zaporozec (1994), realizan una clasificación de los métodos que existen para la evaluación de la vulnerabilidad, según la forma en que se trabaja con los datos y se evalúan los parámetros. De esta manera, los métodos se clasifican de la siguiente forma:

- **Métodos paramétricos:** Estos métodos están elaborados para zonas en las que no se cuenta con información detallada de algunos aspectos específicos del acuífero. En ellos se manejan parámetros muy diversos los cuales son numéricos y otros descriptivos. Finalmente, los diferentes valores se combinan en un índice que es la suma directa, o después de haber sido afectada de un cierto factor de ponderación que en general refleja su importancia en decidir cuál es la vulnerabilidad.
- **Modelos de simulación y métodos estadísticos:** Estos métodos se basan en la aplicación de modelos matemáticos de transporte en medios no saturados, basándose en las ecuaciones de dispersión y advección y funciones de decaimiento de las sustancias contaminantes.

Estos métodos difieren principalmente, en la cantidad y especificidad de los datos necesarios en sus aplicaciones, lo cual hace que algunos de ellos sean más viables que otros dependiendo del objetivo de la evaluación.

De esta manera, los métodos paramétricos son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y específica. Estos métodos son relativamente fáciles de aplicar y se puede trabajar con ellos a escalas regionales. Sin embargo, es recomendable la participación de un grupo profesional diverso en sus aplicaciones, para la adecuada ponderación de los distintos parámetros utilizados.

Por su parte, los métodos de simulación y estadísticos son utilizados frecuentemente para la evaluación de la vulnerabilidad específica. Dada la complejidad y cantidad de datos que se requieren en sus aplicaciones, difícilmente pueden ser aplicados a escalas regionales, más bien están diseñados para ser aplicados localmente.

Por otra parte, podemos evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas por medio de modelos de simulación, los que son muy difíciles de realizar en países en vías de desarrollo, debido a la gran cantidad de información necesaria. Sin embargo, este método es muy apropiado para analizar situaciones puntuales o con poca extensión espacial. Los métodos estadísticos o de monitoreo no permiten determinar la vulnerabilidad, sino que se utilizan para realizar estudios probabilísticos, que evalúen la posible dispersión del contaminante. Debido a lo anterior, resulta conveniente el uso de los métodos paramétricos, para los cuales

existen experiencias a nivel tanto nacional como internacional que avalan su correcto funcionamiento, (Cerros, 2007).

#### 2.2.10. Método GOD

Fue desarrollado por Foster (1987), trata de ser simple y sistemático. Este método se aplica habitualmente como primer paso para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades y determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante. Los factores considerados por el autor para la evaluación de la vulnerabilidad son: la profundidad del nivel del agua o nivel freático, el tipo de substrato litológico y el tipo de confinamiento del acuífero. El método se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a las 3 variables, que son las que dan nombre al método:

$$V = G * O * D$$

- G = Ground Water Occurrence (Tipo de acuífero)
- O = Overall Lithology (Litología de la cobertura)
- D = Depth to Groundwater (Profundidad del nivel freático)

(Cerros, 2007). Manifiesta que, cada uno de los parámetros tiene un valor de asignación dependiendo de sus características, el valor de vulnerabilidad es el resultado de la multiplicación de estos parámetros, podemos entenderlo mejor mediante la siguiente fórmula:

Dónde:

- ✓ (V) representa la vulnerabilidad.
- ✓ (G) representa el tipo de acuífero.

(D) representa el nivel freático del pozo en observación.

**Tabla 3:** Valoración del índice GOD.

Rango obtenido	Clasificación de la vulnerabilidad del acuífero
0.0 – 0.1	Muy baja
0.1 – 0.3	Baja
0.3 – 0.5	Moderada
0.5 – 0.7	Alta
0.7 – 1.0	Extrema

Los valores resultantes de la ecuación anterior, son clasificados en intervalos que definen el grado de vulnerabilidad:

- **Vulnerabilidad despreciable:** Si el valor es menor a 0.1, no existe peligro de contaminación del acuífero.
- **Vulnerabilidad baja:** Si el valor está entre 0.1 y 0.3, el acuífero es vulnerable a largo plazo a contaminantes persistentes.
- **Vulnerabilidad moderada:** Si está entre 0.3 y 0.5, el acuífero es vulnerable a mediano plazo a la mayoría de contaminantes.
- **Vulnerabilidad alta:** Si está entre 0.5 y 0.7, el acuífero es vulnerable a la mayoría de los contaminantes.
- **Vulnerabilidad extrema:** Si es mayor a 0.7, el acuífero es vulnerable a la mayoría de los contaminantes y con un impacto relativamente rápido.

**Tabla 4:** Definición práctica de los distintos niveles de contaminación del acuífero.

NIVEL DE VULNERABILIDAD	DEFINICION CORRESPONDIENTE
Extrema	Vulnerabilidad a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
Alta	Vulnerabilidad a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
Media	Vulnerabilidad a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
Baja	Solo vulnerable frente a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
Muy Baja	Presenta capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

El método tiene una estructura simple y pragmática y fue desarrollado específicamente para zonas cuya información acerca del subsuelo y sistemas de agua subterránea es escasa. Las grandes simplificaciones introducidas por este método están justificadas por la disponibilidad real de datos, pero como contrapartida, se pierde definición y no es posible diferenciar un tipo de contaminante de otro. Así, el valor numérico obtenido significa una u otra cosa en función del contaminante que se considere y su interpretación queda en cierto grado, (Custodio, 1995).

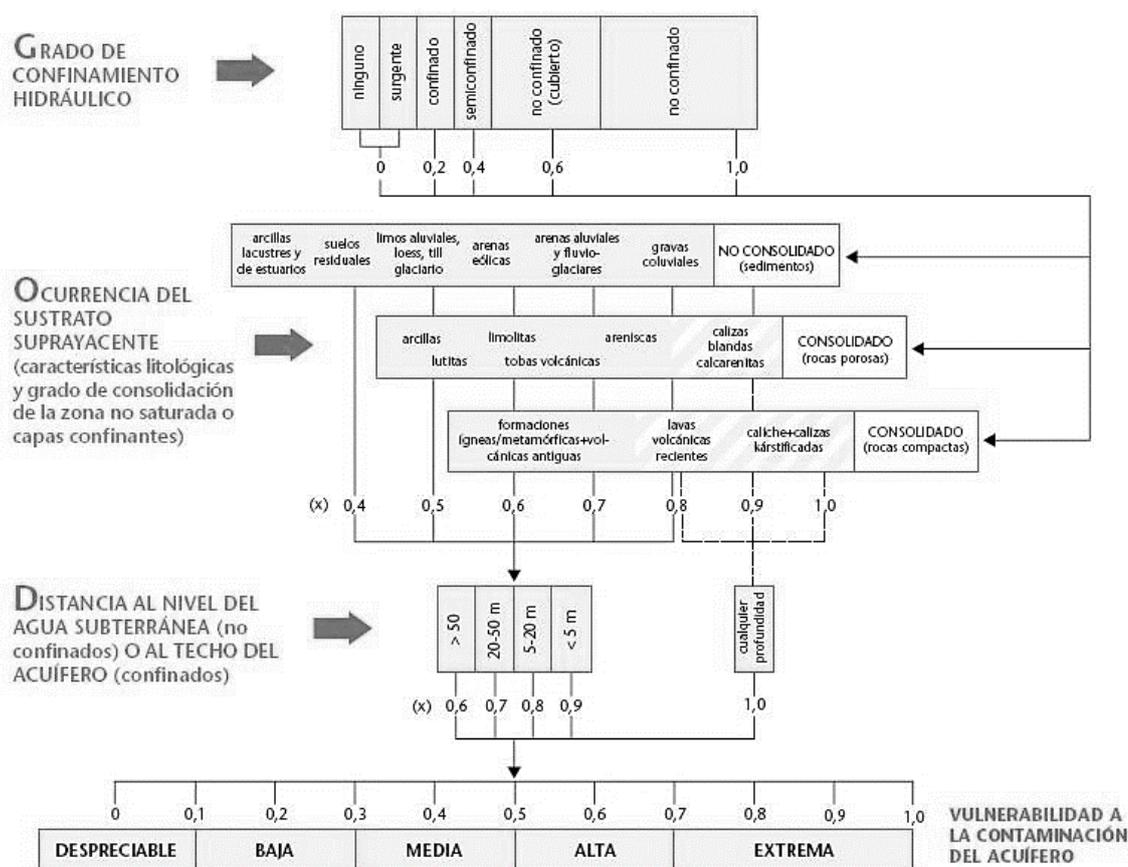
La estimación del índice de vulnerabilidad GOD involucra una serie de etapas concretas siendo éstas las siguientes:

1. Identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0.0 a 1.0.

2. Especificar las características del sustrato supra yacente a la zona saturada del acuífero en términos de:
- Grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras).
  - Tipo de litología (considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad de la matriz y contenido de humedad en la zona no saturada o retención específica) y, asignar un índice a este parámetro en una escala de 0.4 a 1.0.
  - Estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0.6 a 1.0, (Foster, 2002).

Otros factores reconocidos como modificadores de la vulnerabilidad son tomados en cuenta por el método dentro de la carga contaminante. Entre estos se puede citar la infiltración efectiva y el tipo de suelo.

A continuación, se explicará por separado en qué consiste cada uno de los parámetros a determinar en la metodología GOD para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, (Alvarado, 2007).



**FIGURA 4:** Diagrama del índice GOD.

Fuente: Foster, (2002).

### Tipo de acuífero (G)

Este parámetro que corresponde simbólicamente a la letra “G” que aparece en el acrónimo GOD y que en inglés se refiere a “Ground water occurrence”, Se refiere al tipo de acuífero presente en la zona donde se está investigando. Varía desde acuíferos libres hasta confinados. Siendo más vulnerables a aquellos acuíferos que están expuestos de forma directa con la superficie (libres) o están cubiertos por pequeñas capas menos permeables (cubiertos), y el índice varía de 0 a 1.

Escobar, Garcia, & Guerrero, (2002). El tipo de acuífero se puede catalogar de la siguiente manera:

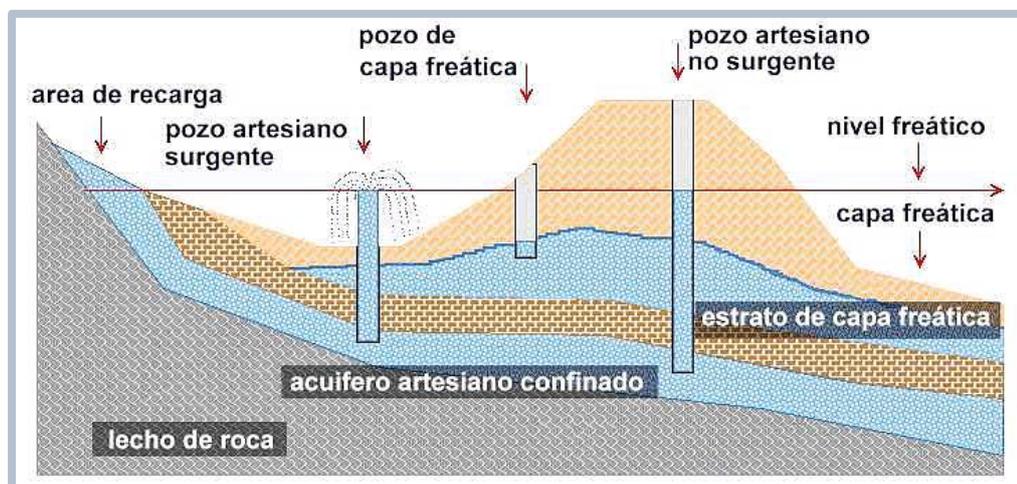
- Ninguno
- Surgente
- Confinado
- Semiconfinado
- No confinado (cubierto)
- No confinado

### **Acuífero ninguno**

Son un caso particular (y frecuente) de acuíferos en los que se suceden niveles de distinta permeabilidad.

### **Acuífero surgente**

Cuando se perfora un pozo hasta el nivel de un acuífero confinado, el agua asciende espontáneamente hasta alcanzar el nivel piezométrico. Si dicho nivel está por debajo de la superficie topográfica, el pozo será artesiano, por estar sometido a presión. Sin embargo, no será surgente, y habrá que completar la extracción hasta la superficie, mediante bombeo. En cambio, si el nivel piezométrico es más alto que la superficie del terreno, el agua, en su tendencia a alcanzarlo, surge de manera espontánea, constituyendo un pozo artesiano surgente.



**FIGURA 5:** Ilustración de un acuífero surgente.

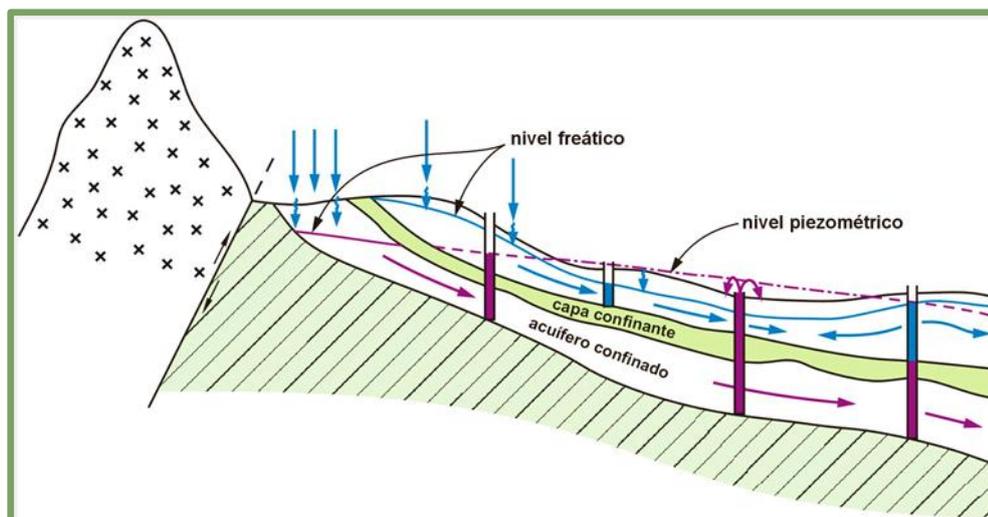
Fuente: Escobar, Garcia, & Guerrero, (2002)

### Acuífero confinado

Son aquéllos cuya recarga es menos dependiente de las precipitaciones locales, porque están aislados de la superficie puesto que el material poroso y permeable (acuífero) saturado con agua, se halla dentro de un paquete de estratos impermeables, (acuicludos o acuífugos) que lo limitan por arriba y por abajo.

En esos casos, el agua no ha podido percolar en forma directa, y normalmente la recarga ocurre a distancia, aguas arriba, en algún punto en que el material permeable aflora.

Desde el lugar de ingreso, el agua fluye subsuperficialmente hacia abajo por la topografía, constituyendo lo que se conoce como flujo artesiano.



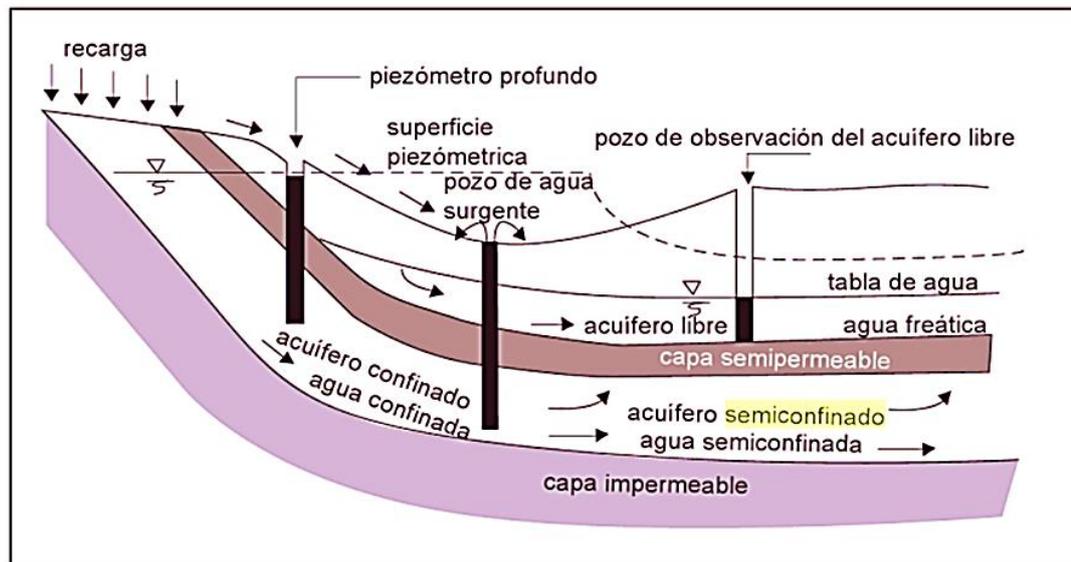
**FIGURA 6:** Ilustración de un acuífero confinado.

Fuente: Escobar, Garcia, & Guerrero, (2002)

### **Acuífero Semiconfinado**

Los acuíferos semiconfinados son acuíferos completamente saturados sometidos a presión que están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuicierre o acuífugo) o también por otro acuitardo. En este tipo de acuífero, la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo, por ejemplo, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el acuitardo, que actuará como recarga del acuífero. Las características del acuitardo confinante en un acuífero semiconfinado son tales que puede ignorarse la componente horizontal del flujo en el acuitardo. Acuífero cubierto y/o sustentado por una capa relativamente

delgada de material semipermeable, a través de la cual tiene lugar el flujo hacia o desde el acuífero.



**FIGURA 7:** Ilustración de un acuífero semiconfinado.

Fuente: Escobar, Garcia, & Guerrero, (2002)

### Acuífero no confinado (cubierto)

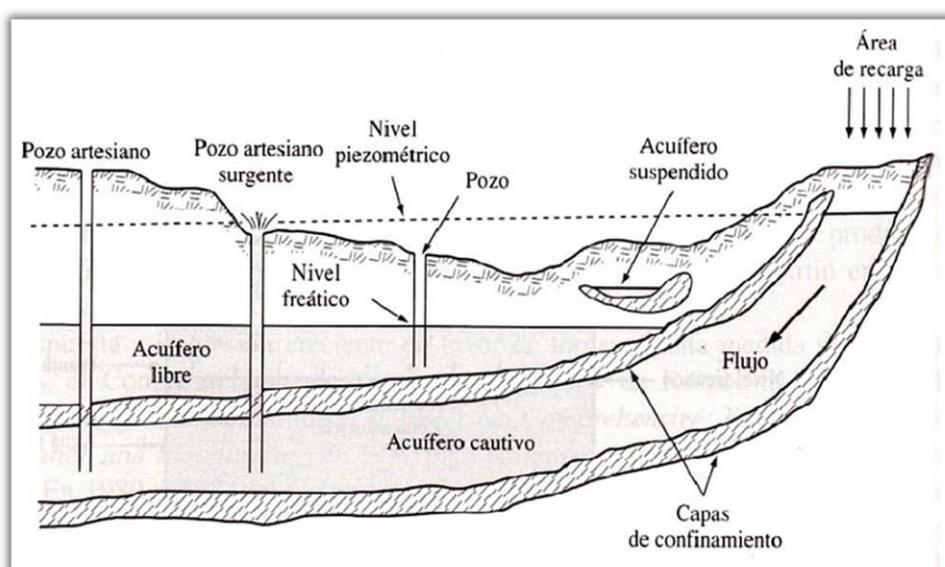
Cuando se dice que un acuífero es no confinado cubierto o simplemente acuífero libre cubierto, es porque hay cobertura de sedimentos finos, esto en el estrato suprayacente como pueden ser desde limos y arcillas hasta arenas y gravas con espesor variable, que mayormente este tipo de acuíferos encuentran albergado en un relleno aluvial o aluvial.

### Acuífero no confinado

Un acuífero no confinado (libre), también conocido como acuífero freático, está limitado por su extremo inferior por un acuitardo y carece de una capa superior que lo confine. El nivel del agua subterránea se encuentra a presión atmosférica puesto que se trata de una lámina libre de agua, en contacto directo con el aire

exterior, situada por debajo del techo de la formación permeable. Los recursos hídricos que ceden este tipo de acuíferos son los que tienen almacenados en sus poros, siendo su volumen alto respecto a los otros tipos de acuíferos. Los acuíferos libres presentan una gran inercia (tardan minutos, horas o incluso días en presentar descensos debidos al bombeo en puntos relativamente alejados de éste) y sus conos de bombeo suelen ser de elevada profundidad cerca del pozo y de corto radio de influencia. Su límite superior es el nivel del agua, que sube y baja libremente. El agua de un pozo que penetra en un acuífero no confinado está a presión atmosférica y no se eleva por encima del nivel freático.

La ilustración de la (Figura 8) muestra un acuífero libre, un pozo perforado hasta la zona saturada de tal acuífero, tendrá agua a la presión atmosférica en el nivel freático. El agua subterránea contenida en un acuífero cautivo, que es aquel encerrado entre dos capas de confinamiento; puede estar bajo presión, de modo que en un pozo perforado en dicho acuífero; el agua alcanzará una altura mayor del nivel a que se encuentra confinada, en cuyo caso se denomina pozo artesiano.



**FIGURA 8:** Ilustración de un acuífero semiconfinado.

Fuente: Escobar, Garcia, & Guerrero, (2002)

### **Sustrato litológico (O)**

El tiempo que demora el agua en recorrer el camino hasta la zona saturada no sólo depende de la longitud, sino también del tipo de material con que se encuentra. Las características del espesor, composición litológica, propiedades químicas de las rocas determinan las condiciones de atenuación del material que se encuentra por debajo del horizonte del suelo y por encima de la capa freática. La biodegradación, la neutralización, la fricción, reacción química, volatización y dispersión son fenómenos que pueden ocurrir y contribuyen al proceso de atenuación en la zona vadosa, (Hernández, 2006).

(O) “Overall” este es un parámetro que se refiere al tipo de unidad litoestratigráfica que se encuentra encima del acuífero estudiado. Siendo más vulnerables aquellos acuíferos que están supra yacidas por texturas más granulares. Estos valores varían entre 0.4 y 1.0; y para la obtención de este parámetro es necesario contar con información geológica.

Para la obtención de este parámetro es necesario recurrir a la información de pozos perforados o excavados, y afloramientos observados en la zona que se estudia; estudios hidrogeológicos previos pueden darnos toda esta información o complementar los estudios de campo que se quieran realizar.

### **Profundidad del acuífero (D)**

Este parámetro simbolizado por la letra “D” que en inglés es “Depth” considera la profundidad del nivel freático. Como criterio inicial, se asume que la vulnerabilidad disminuye con la profundidad, en su valoración se emplean datos de puntos de agua (pozos en el área de estudio) con medidas

de campo, para la determinación de este parámetro es necesario conocer la profundidad a la cual se encuentra el nivel del agua subterránea en los acuíferos no confinados y al techo de éste cuando es confinado, el índice varía de 0.6 a 1.0.

Para la obtención de este parámetro se necesita información sobre inventario de pozos cercanos, hidrogeología de la zona y el MED.

La detección del nivel freático se realiza normalmente a través de una sonda, la cual detecta la presencia de agua en el subsuelo. Las características geológicas y climáticas de un lugar son las que determinan la profundidad del nivel freático, (Alvarado, 2007).

El nivel freático también se puede medir mediante una vincha métrica cuando no se tiene una profundidad alta del pozo de observación. El nivel de agua en la vincha corresponde con el nivel freático, aquí la presión del agua es igual a la presión atmosférica.

#### **2.2.11. Aplicación de sistemas de información geográfica ArcGIS.**

El ArcGIS Desktop es como un conjunto de aplicaciones integradas: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, con las cuales se puede desarrollar actividades o tareas SIG, desde una muy simple hasta una muy avanzada, incluyendo mapeo, administración de datos, análisis geográfico, edición de datos y geoprocésamiento.

Un SIG es un conjunto informatizado de datos, que representa la realidad posibilitando la modelización de eventos a futuro, es decir; un conjunto de datos referenciados a puntos territoriales o espaciales que permiten la

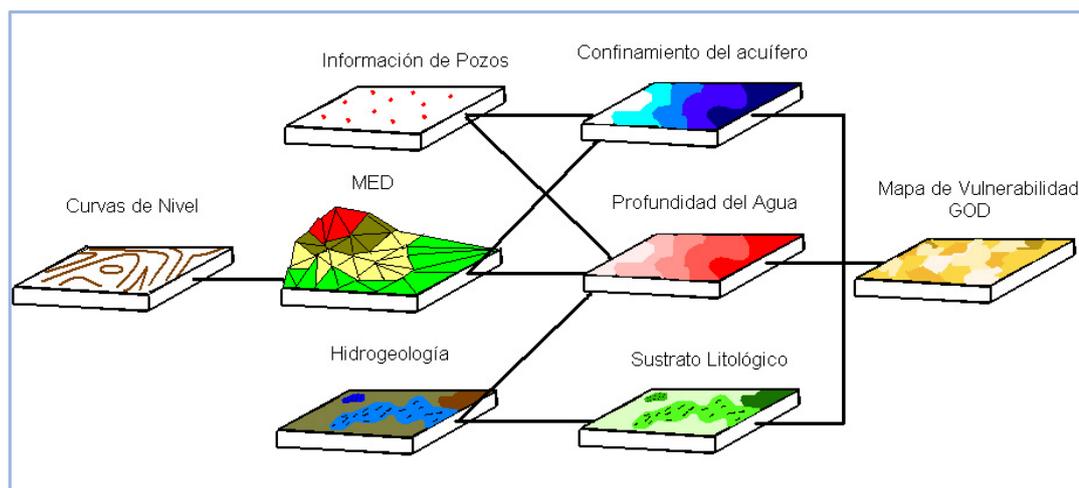
obtención de información indispensable para todo tipo de planificación y evaluación de gestión. (Duarte, 2005)

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a la evaluación de vulnerabilidad, la herramienta suministrada por el SIG permite realizar la superposición de información temática requerida para el análisis de metodología GOD, con el fin de evaluar la vulnerabilidad a la contaminación, adicionalmente permite organizar la información y visualizarla de manera práctica.

Para realizar estos mapas se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG), que es una herramienta diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos de: información geográfica, cartografía digital, bases de datos de atributos y estadísticas, de una manera simultánea y automatizada, (Pérez y Pacheco, 2004).

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor vulnerabilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área, (Bessouat, 2001).

El resultado obtenido se reclasifica de acuerdo a la metodología GOD para finalmente obtener el mapa de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero. (Ver Figura 9)



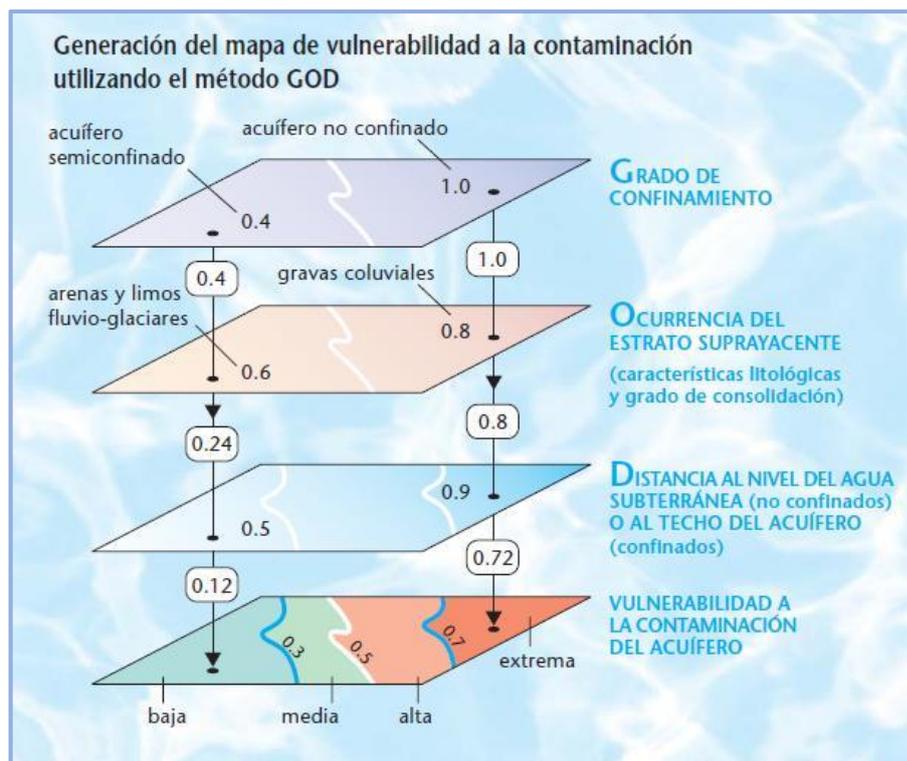
**FIGURA 8:** Descripción esquemática de la determinación de los parámetros del método GOD.

Fuente: Foster, (2002).

### 2.2.12. Cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos.

La forma más adecuada de representar los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad, es a través de mapas. La escala del mapa considera su fiabilidad, ya que los datos requeridos se obtienen con distintos grados de precisión dependiendo de la extensión del área que se pretende evaluar.

El mapa de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación representa sectores de vulnerabilidad homogénea para un territorio dado (ver Figura 10), como resultado de la aplicación de la metodología GOD. Estos mapas representan la capacidad que tiene el medio para proteger los acuíferos de la contaminación. Cabe aclarar que estos mapas representan la vulnerabilidad del acuífero y no de los puntos de captación específicos (perímetros de protección) y, por consiguiente, buscan proteger el recurso hídrico subterráneo y no a las captaciones.



**FIGURA 9:** Mapa de Vulnerabilidad método GOD.

Fuente: Foster, (2002).

De acuerdo a Zavatti (1994) citado en Custodia (1995), un mapa de vulnerabilidad representa un escenario estático de los riesgos ambientales para la previsión y prevención de la degradación de la calidad del agua en un acuífero. Según este autor, con la utilización de un mapa de vulnerabilidad se pueden pretender la siguiente secuencia de objetivos:

- Proporcionar en un área determinada, una zonificación que indique la posibilidad de penetración y difusión de un contaminante en un acuífero.
- Correlacionar la información obtenida a través de la evaluación, con la presencia de fuentes puntuales o difusas de posible contaminación.

- Realizar una valoración del impacto que tendría sobre la calidad del agua subterránea, sucesos de tipos catastróficos o accidentales, con el objetivo de prevenirlos y reducir tales efectos.
- Definir los objetivos de la prevención y de la protección, en una planificación del aprovechamiento y uso de los recursos de agua.
- Orientar la organización del control y seguimiento de la calidad del agua subterránea, y del medio ambiente relacionado.
- Orientar las decisiones de ordenación del territorio.
- Marcar prioridades en la aplicación presupuestarias y mejorar la educación en general.

Dado que un mapa de vulnerabilidad de agua subterránea es la representación gráfica de los resultados obtenidos en una evaluación, en donde se relacionaron y se ponderaron factores de distinta naturaleza y que apunta a un objetivo determinado, su utilización requiere de una adecuada interpretación. Por tales motivos Custodio (1995) enfatiza que, al momento de hacer uso de un mapa de vulnerabilidad, se debe tener claro los siguientes aspectos:

- Los resultados que representa deben ser considerados como orientaciones.
- Cualquier propuesta de decisión territorial debe ir acompañada de un dictamen de expertos.
- Cualquier autorización para la localización de actividades potencialmente polucionantes y sus restricciones, deben ser objeto de un estudio de detalle.

- Las decisiones tomadas con solo el apoyo de las indicaciones del mapa, pueden llegar a diferir grandemente de la realidad a nivel local.
- Que menor vulnerabilidad no quiere decir menor necesidad de protección, y a lo más, solo quiere decir menor prioridad en las acciones de protección.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO:

##### 3.1.1. Ubicación Política:

El Centro Poblado de Jayllihuaya tiene la siguiente ubicación política:

Región	: Puno
Provincia	: Puno.
Distrito	: Puno
Centro Poblado	: Jayllihuaya

##### 3.1.2. Ubicación Geográfica:

El Centro Poblado de Jayllihuaya tiene la siguiente ubicación geográfica:

##### Coordenadas Geográficas:

Latitud Sur	: 15° 53' 21.5" S	(-15.88929292000)
Longitud Oeste	: 69° 57' 47.6" W	(-69.96321676000)
Altitud entre	: 3806 – 5100	m.s.n.m.

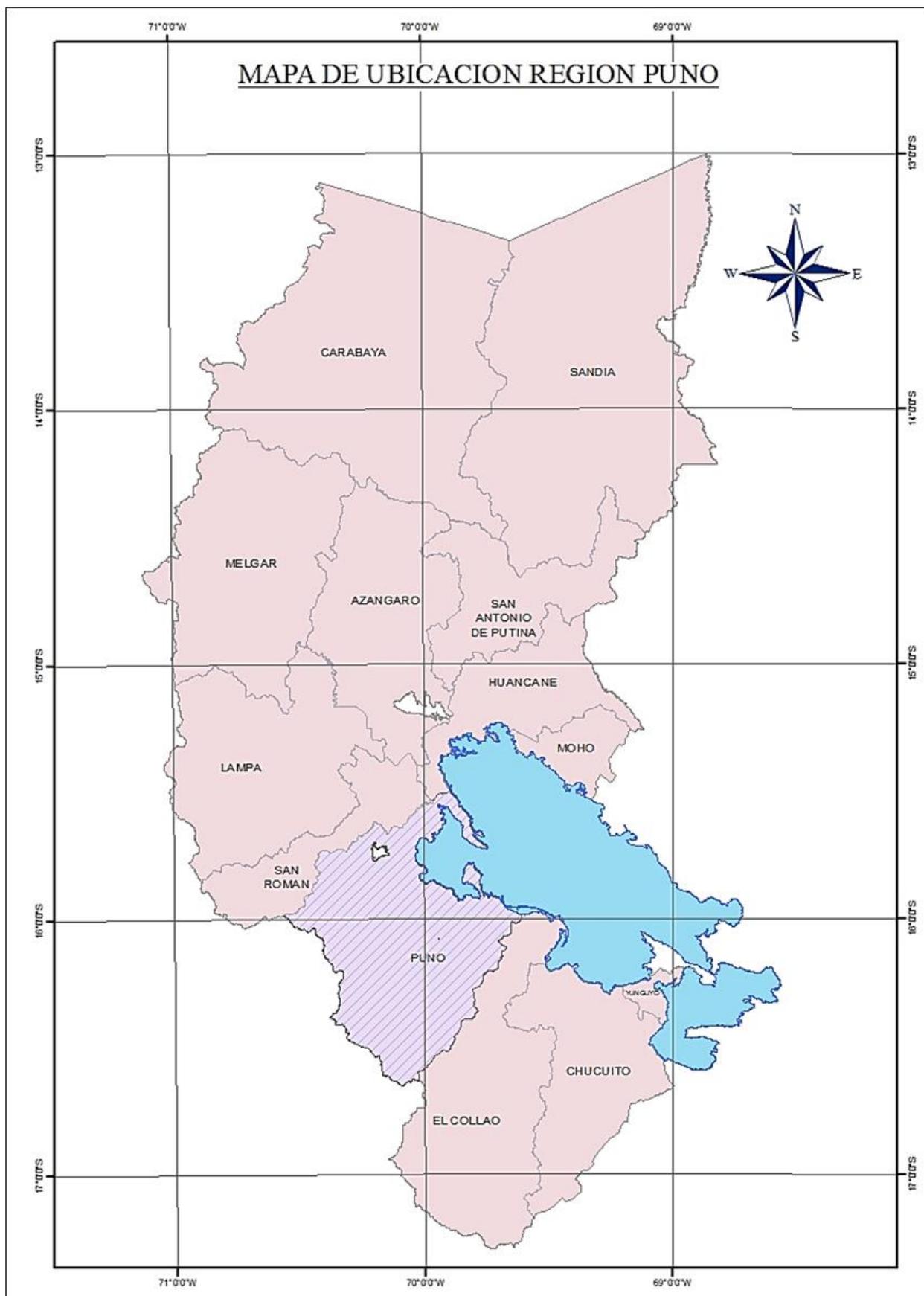
##### 3.1.3. Ubicación Hidrográfica:

Hidrográficamente el Centro Poblado se encuentra ubicada en:

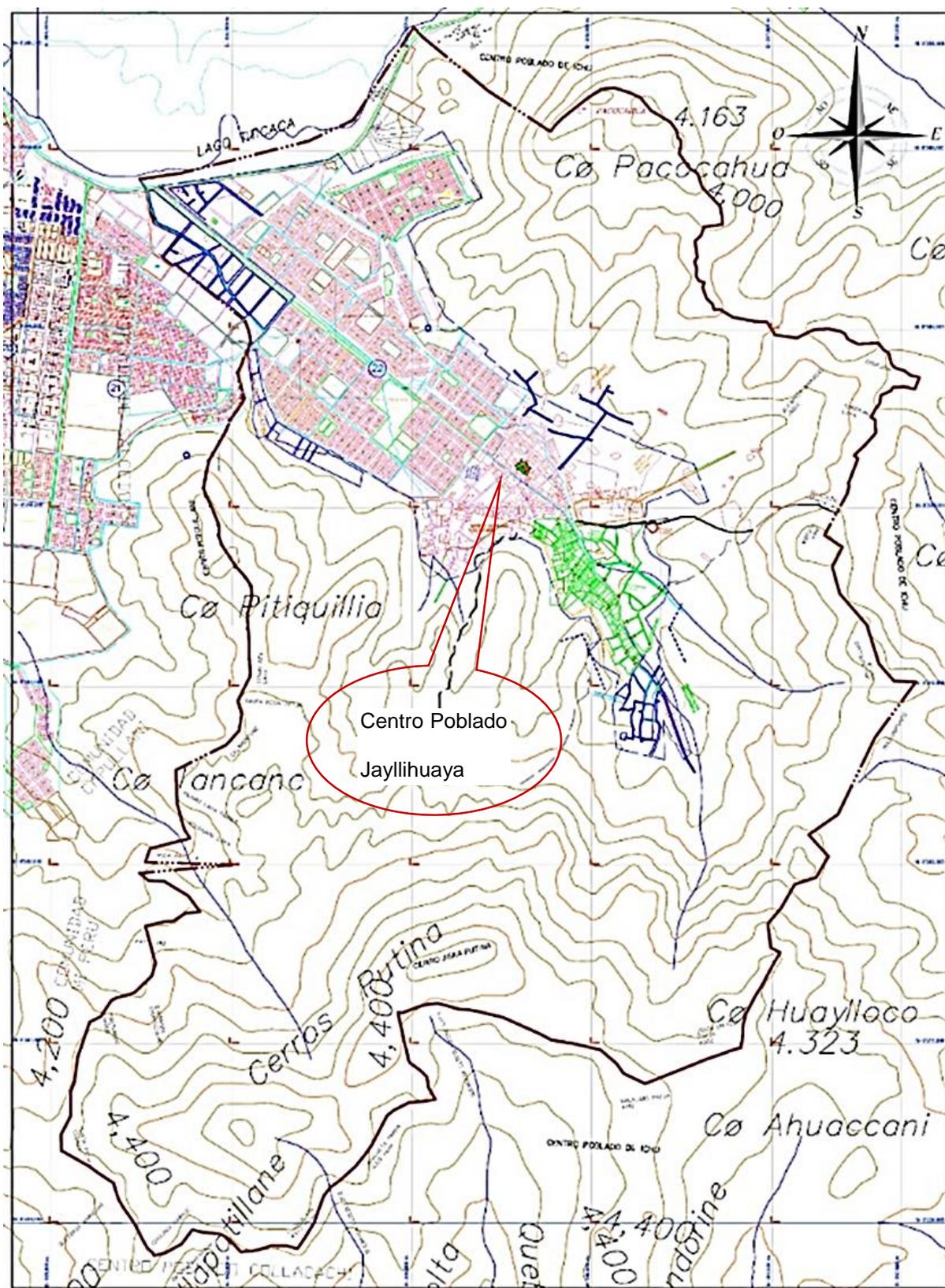
Región hidrográfica	: Titicaca
Sistema hídrico	: TDPS



**FIGURA 10:** Ubicación geográfica del Centro Poblado de Jayllihuaya.



**FIGURA 11:** Ubicación política del Centro Poblado de Jayllihuaya.



**FIGURA 13:** Ubicación del Centro Poblado de Jayllihuaya.

#### **3.1.4. Descripción general del centro poblado de Jayllihuaya:**

La zona a estudiar es el Centro Poblado Jayllihuaya, distrito de Puno, Provincia de Puno, Departamento de Puno. El centro poblado se inicia en una derivación de las partes altas en la fila del cerro Pitiquillani, extendiéndose hacia el sur pasando por los cerros de Jichuntata, hasta Arichuhyani, al sur este se desvía sobre la fila del cerro Llallahuani, Tunuhiri, volteando hacia el norte sobre Apacheta, hasta la fila del cerro Chimu, y terminando en la bahía del lago Titicaca. El centro poblado tiene una superficie aproximado de 1581.41 Has y en una altitud desde 3810 hasta 4496 m.s.n.m. y con una población aproximada de 5271 habitantes, de los cuales hasta la fecha la gran mayoría tiene acceso al servicio de agua con conexión a domicilio y otra parte de la población tienen la necesidad de consumir agua de pozo y manantiales, esto se ve en las laderas a los cerros. El centro poblado Jayllihuaya, geológicamente está constituido y encerrado de varias montañas. La temperatura promedio es de 9°C, entre un máximo y mínimo de 20°C a -1.9°C, el clima es frío y semi-seco, con una precipitación promedio de 700 mm al año.

#### **3.1.5. Características principales de la zona de estudio**

A continuación, se presenta una breve descripción de algunas características generales de la zona que son necesarias conocer para realizar cualquier estudio, algunas de ellas influyen directamente en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación y otras influyen de manera indirecta, que dependerá del análisis que se haga para tomarlas en cuenta.

#### **3.1.5.1. Precipitación**

La precipitación generalmente ocurre entre los meses de septiembre a abril, concentrándose aproximadamente la  $\frac{3}{4}$  partes de las lluvias entre los meses de diciembre a marzo, con un promedio anual de 700 mm.

#### **3.1.5.2. Temperatura.**

La temperatura del medio ambiente en el ámbito de estudio según la información establecida por la estación meteorológica de INIA (Instituto Nacional de Investigación Agraria-Salcedo), al año tiene una fluctuación entre 14°C y 20°C. Y los valores de la temperatura mínima diarias oscilan entre -1.9°C a 7°C. Motivando la presencia de heladas, la misma que se encuentra principalmente en función de la intensidad de la radiación solar.

#### **3.1.5.3. Humedad Relativa.**

La principal fuente de humedad del medio ambiente en el área de estudio proviene de las precipitaciones pluviales y de la evapotranspiración del lago Titicaca, el promedio anual de humedad relativa es de 56.38%, lo que significa una relativa sequedad en el medio ambiente, en los meses lluviosos dicha humedad relativa aumenta hasta un 70.70%.

#### **3.1.5.4. Evapotranspiración Potencial.**

La evapotranspiración promedio mensual en el centro poblado de Jayllihuaya es de 112.9 mm.

#### **3.1.5.5. Relieve**

El ámbito de estudio está constituido en un 60% de su superficie por un sistema fisiográfico colinoso por presentar relieve de montañas altas y gran

parte de estas el relieve que presenta es rocoso y con pendiente pronunciada de muy poca vegetación. Además, en esta zona existen zonas con afloramientos de rocas sedimentarias tales como areniscas que son los que más resaltan en la zona, y en la parte baja presenta una superficie plana con pendiente mínima y algunas ondulaciones.

#### **3.1.5.6. Geología**

Se detalla los aspectos litológicos, estructurales y morfológicos más resaltantes de cada una de las unidades geológicas observadas en la zona de estudios; caracterizados por formaciones de capas rojas de areniscas arcósicas, feldespáticas, tufáceas y conglomerados; superpuestas por rocas volcánicas; dichos afloramientos se pueden observar en la parte alta de la micro cuenca del Centro Poblado. Los depósitos de cuaternarios y pie de monte están constituidos de cantos, gravas y arenas englobados en una matriz de arena limoso generalmente. La estratigráfica que representa es como sigue.

#### **3.1.5.7. Estratigrafía**

La zona de estudio forma parte de la Cuenca del Titicaca que es una depresión alargada en dirección NW – SE de origen tectónico; que tiene como roca de basamento impermeable rocas del Paleozoico y permeables del Mesozoico.

Según Newell (1949). La columna estratigráfica generalizada de la cuenca, incluye rocas sedimentarias y volcánico de edad Paleógeno, alcanzarían un espesor de 25,000 m; las rocas más antiguas debido a varios períodos orogénico ocurridos en el área. Parte de los afloramientos de la sección han

sido erosionados; motivo por el cual no es posible encontrar una sección completa en el área y se estima que el espesor máximo sería de 20,000 m.

#### **3.1.5.8. Topografía**

La zona de investigación se encuentra en un relieve relativamente llano con una inclinación desde 3 821.00 m.s.n.m. hasta las faldas de los cerros circundantes con 3 854.00 m.s.n.m. con una pendiente aproximada de 2.65% en las zonas habitacionales, cubriendo un área de 82.730 hectáreas.

#### **3.1.5.9. Hidrología**

Hidrográficamente el Centro Poblado Jayllihuaya se encuentra en la Micro cuenca Jayllihuaya. En un estudio efectuado por Salas P.M. (1992); “Hidrología del Drenaje Superficial de las micro cuencas aledañas de la ciudad de Puno” determinó que, durante las épocas de avenida, descarga un caudal de escorrentía superficial entre 6.65 y 9.46 m<sup>3</sup>/s, en un área receptora de 324.20 Has. Que en épocas de avenidas desembocan considerables volúmenes de agua en la bahía del Lago Titicaca, a través de un colector natural no bien definida.

#### **3.1.5.10. Hidrología superficial**

El agua superficial está conformada por el agua que fluye sobre la superficie de la tierra o se tiene almacenado sobre ella, e inter actúa continuamente con el vapor de agua y el agua superficial.

#### **3.1.5.11. Drenaje**

El sistema de drenaje en la cuenca de Jayllihuaya es irregular, debido a que en la parte baja no existe un curso de desagüe bien definido, en consecuencia, la Zona C (zona inundada), solamente se aprovecha el 6.43%, siendo

inundable el 93.57%, esto ocurre en los períodos de lluvia donde hay presencia de aguas turbias con materiales de acarreo que es producto de la erosión.

La pendiente mínima que tienen los terrenos materia de estudio hace que ocasionen la subida del nivel freático en los meses de enero, febrero, marzo y parte de abril que son meses de lluvias de intensidades altas.

#### **3.1.5.12. Energía Solar**

La energía promedio anual en el centro poblado de Jayllihuaya es de 8.2 horas/días. Donde los meses más soleados ocurren en la estación de invierno siendo un periodo muy seco y en los meses de transición; según estudios anteriores el mes de Julio tiene el promedio más alto del año con un 9.6 horas/días. También se resalta que la temporada menos soleado es la estación de verano época de lluvias, siendo enero el mes con menor insolación de 6.2 horas/días.

#### **3.1.5.13. Flora y Fauna**

##### ✓ Flora

Siendo Jayllihuaya una zona con un microclima favorable es que permite la presencia de una flora variada, los especies tales como ichu, eucalipto, chilligua, queñua, tola, cactus, cantuta, etc., como también alberga especies de tubérculos y gramíneas.

##### ✓ Fauna

Por las condiciones climáticas de una zona alto andina se distingue por poseer una diversidad de fauna, en la zona de estudio se identificó zorros,

vizcachas, reptiles, etc., y algunas aves silvestres tales como águilas, perdiz y otras especies propios de la zona.

#### **3.1.5.14. Agricultura y Ganadería**

El centro poblado Jayllihuaya, en cuanto a la agricultura es una zona dedicada por la minoría de sus pobladores a la agricultura familiar de subsistencia debido a las limitaciones de terreno, cultivando pequeñas parcelas de habas, papa, quinua, oca, y cebada esto se da en las zonas alta, media, y baja. Por otra parte, una cierta cantidad de pobladores se dedican a los huertos e invernaderos de hortalizas y flores esto en gran parte en la zona media las cuales son el sustento económico de los pobladores que se dedican a esta actividad, llevando sus productos a los mercados cercanos.

En cuanto a la ganadería (ovino y vacuno) es una de las pocas actividades en el centro poblado Jayllihuaya, pero un sector minoritario de la población se dedica a la crianza de ovinos y vacunos, esto se da en la zona alta.

#### **3.1.5.15. Población económicamente activa**

Los pobladores económicamente activos del centro poblado Jayllihuaya, es extractiva, transformación y servicio. Las ocupaciones a las que se dedican es la agricultura, trabajos calificados, oreros de manufactura, minería, construcción civil, comerciantes, vendedor ambulante, trabajos no calificados de servicio y otros, y en un porcentaje menor con trabajos permanentes y seguros que pertenecen a las instituciones públicos y privados.

#### **3.1.5.16. Actividad productiva**

La actividad productiva en el centro poblado Jayllihuaya está en la agricultura, donde la gran mayoría a de sus pobladores se dedican al cultivo de hortalizas

y flores contando con huertos e invernaderos las cuales están sectorizados, y otros pobladores a la producción de cultivos de pan llevan para el consumo familiar tales como el cultivo de la quinua, papa, haba, oca y trigo, y crianza de la pequeña ganadería, esto debido a los suelos con pequeñas áreas de pastizales.

➤ **Zona alta**

Del Centro Poblado en esta zona se encuentra con pequeñas áreas para el cultivo como la papa, quinua, trigo, haba, oca, etc. Ya que el resto del área es rocoso y cuenta con mínimas áreas de pastizales para el pastoreo de los animales, Además que en la época de estiaje no hay presencia de agua ni manantiales.

➤ **Zona media**

Del Centro Poblado el uso de suelo está caracterizado por el cultivo de hortalizas, flores y productos de primera necesidad, además se tiene pequeñas áreas de bosques, también se observó que es la zona que mayor se pobló en los últimos años, pero además en esta zona se tiene manantiales naturales de agua que son utilizados para el consumo humano, agropecuario y la preparación de alimentos, pese a que ya cuentan con servicio de agua potable. En esta zona también se aplica el riego para el cultivo de las hortalizas, aprovechando los pozos existentes ahí.

➤ **Zona baja**

La zona baja del Centro Poblado de Jayllihuaya existen pequeñas áreas de cultivo, donde se producen productos de primera necesidad y

forraje en mínima cantidad, donde también existen grifos, almacén de cueros y en la época de lluvias esta zona se encuentra inundada, debido a que existen bojedales naturales.

### **3.1.5.17. Tenencia de Tierras**

En el Centro Poblado de Jayllihuaya en la parte baja se encuentra la Reserva Nacional del Titicaca, establecida mediante D.S. N°185-78-AA. Del 31 de octubre de 1978, forma parte del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SINANPE), cuyo ente normativo es el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP), entidad adscrita al Ministerio del Ambiente desde mayo del 2008. Encargado de velar por la conservación y el aprovechamiento sostenible de los Recursos Naturales con miras a fortalecer los pilares del desarrollo sostenible del país. La tierra en esta zona pertenece a pequeños productores (descendientes de antepasados), En el Centro Poblado Jayllihuaya el 85% de los productores posee tierra propia (tierra heredada y comprada, legalizada). El 12% posee tierras en proceso de legalización. El 3% pertenece a los agricultores que poseen pequeñas parcelas (zona orilla del lago).

### **3.1.5.18. Población**

En el centro poblado de Jayllihuaya, según el censo realizado por el INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática) existe una población aproximada de 5,271 habitantes. Pero el coeficiente de crecimiento poblacional del Centro Poblado de Jayllihuaya es del orden del 1.5%; (INEI – 2007) éste crecimiento es en forma lineal lo que principalmente en el Centro Poblado Jayllihuaya el crecimiento de la Población de Puno, es por la

expansión urbana que se viene dando hacia el Centro Poblado Jayllihuaya por ser una zona aparente principalmente por la existencia de terrenos en ésta zona; la Población crece en este sector.

#### **3.1.5.19. Migración**

La región Puno es considerada migrante, los mismo ocurre con los pobladores de Jayllihuaya que migran hacia las grandes ciudades como Puno y Juliaca y a otros departamentos de la costa peruana principalmente varones y mujeres a realizar labores de comercio, construcción civil, labores domésticas, etc. En los meses de enero y marzo en su mayoría varones emigran al interior del país a realizar labores de construcción y agrícolas, para mejorar sus ingresos y por ende mejorar la calidad de vida de su familia.

#### **3.1.5.20. Educación**

En el Centro Poblado de Jayllihuaya se cuenta con instituciones educativas de los niveles tales como (wawahuasi, PRONOEIS, inicial (2), primaria (1), secundaria (1). Las instituciones educativas algunas ya cuentan con servicios de saneamiento, mientras que otras carecen de este servicio vital, por lo que se sienten obligados a usar pozos sépticos, así mismo estas instituciones no cuentan con equipamiento adecuado en sus ambientes para brindar las condiciones necesarias y didácticas para una enseñanza de calidad, lo cual hace que algunos estudiantes migren hacia la ciudad de Puno, también se cuenta con el programa PRONAMA de alfabetización para las personas adultas.

### **3.1.5.21. Salud**

En el ámbito de estudio se cuenta con un solo centro de salud, teniendo un mínimo de personal en la salud para atender 3,271 habitantes aproximadamente y en estos últimos años la población en el centro poblado Jayllihuaya se vio un crecimiento considerable, siendo esta insuficiente, por lo que se requiere ampliar la capacidad del establecimiento e implementar los equipos necesarios y profesionales en la salud, como también dotarse de medicinas para cualquier emergencia de salud. Uno de los problemas ms frecuentes en el ámbito de estudio, son las infecciones estomacales, diarrea, anemia, respiratorias y otras enfermedades comunes, la causa de la mala alimentación y la calidad de agua que consumen, se señala que para las emergencias muy particulares y de especialidad, los pacientes son derivados a los establecimientos de salud de la ciudad de Puno.

### **3.1.5.22. Vías de comunicación y transporte**

Para acceder al Centro Poblado de Jayllihuaya existen varios vías y medios de comunicación que se describe a detalle a continuación:

Vía Puno-Desaguadero, hasta el km 5 a la margen derecha existe un desvío hacia Jayllihuaya, avenida asfaltada denominada orgullo aimara siendo esta ruta la más usada como vía de transporte, por otro lado, existe una ruta alterna que está en el Centro Poblado de Salcedo siendo estas las dos únicas vías de acceso para llegar al Centro Poblado de Jayllihuaya con una distancia de 7 km desde la ciudad de Puno, y un tiempo aproximado de 25 min.

### **3.1.5.23. Instituciones y organizaciones existentes**

La zona de estudio cuenta con un Municipio menor, Instituciones Educativas, Organizaciones de mujeres, MINSA, Organización de barrios, Asociación de Productores de Horticultura, Núcleos ejecutores, Asociación de comerciantes, Asociación de artesanos y algunas Instituciones no Gubernamentales, etc., las cuales actúan de manera somera en el Cetro Poblado de Jayllihuaya.

## **3.3. MATERIALES**

### **3.3.1. Información cartográfica:**

Para el presente proyecto de tesis se han utilizado cartas nacionales que abarcan el Centro Poblado de Jayllihuaya se utilizaron las siguientes hojas de la carta nacional: 30v, 30x, 30y, 31v, 31x, 31y, a escala 1: 100,000; elaborados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), las cuales fueron digitalizadas bajo el entorno de SIG.

### **3.3.2. Equipos y programas de cómputo:**

Los materiales y equipos utilizados para la obtención de la información de campo procesamiento de datos en el presente trabajo de investigación son los siguientes:

#### **Materiales de escritorio:**

- Papel bond A4, A3,
- Memoria USB 16 GB
- Tinta de Impresora
- Materiales de escritorio (lapiceros, borrador, marcadores, entre otros)

**Materiales y equipos de campo:**

- Cartas nacionales
- Cámara fotográfica digital
- GPS Garmin
- Bincha de 8m
- Fichas de registro
- Marcadores

**Materiales y equipos de gabinete:**

- Laptop corei7 ASUS, RAM 8 GB, velocidad 3.2 GHz, 500 GB memoria.
- Impresora multifuncional Epson L365 sistema continuo.
- Plotter
- Cartas nacionales
- Fotografías Digitalizadas
- Bibliografía necesaria
- Registro de datos de campo

**Softwares utilizados:**

- Arc Gis 10.3
- Microsoft Office Word 2016
- Microsoft Office Excel 2016
- AutoCAD 2016
- Google Heart
- Ilwis 3.7

### 3.4. METODOLOGÍA

#### 3.4.1. Tipo de investigación

La presente tesis está referido a una investigación descriptiva, observacional – prospectiva, se considera observacional – prospectiva debido a que el estudio tiene como característica la de observar y obtener datos necesarios en la zona de manera presencial para luego ser procesados, para la determinación de los niveles de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Jayllihuaya.

#### 3.4.2. Variables

##### Variable dependiente

Nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

VARIABLE	DIMENSION	INDICADOR	VALORES FINALES
Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero	Tipo de acuífero (G)	Hidrogeología Características litológicas	Libre
			Semiconfinado
			Confinado
	Litología de cobertura (O)	Geología de la Zona de interés.	Suelo residual
			Limos y arcillas
			Cenizas volcánicas
			Arenas
	Profundidad del nivel freático (D)	Profundidad del pozo	Gravas
			Nivel freático

#### 3.4.3. Población y muestra

##### 3.4.3.1. Población:

Para el presente estudio se consideró como población al acuífero existente en el Centro Poblado de Jayllihuaya.

##### 3.4.3.2. Muestra:

Para el presente trabajo de investigación se consideró como muestra el conjunto de datos recopilados de la zona de estudio. Estos datos son

considerados como muestreo aleatorio. Los datos recopilados son la profundidad del nivel freático, litología de la zona no saturada y el tipo de acuífero.

#### **3.4.4. Técnicas e instrumentos**

##### **3.4.4.1 Técnicas:**

La técnica a emplear viene a ser el método GOD y las herramientas y técnicas ofrecidas por el Sistema de Información Geográfica como son, ArcGIS, ArcCatalog. Esta última para generar los mapas de vulnerabilidad, información que permitirá a hacer mayor control de los niveles de vulnerabilidad.

##### **3.4.4.2 Instrumentos:**

Equipo de cómputo implementado con el software: AutoCAD, ArcGIS.

#### **3.4.5. Metodología seguida**

La metodología seguida para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación se detalla a continuación:

##### **3.4.5.1. Recopilación bibliográfica de los antecedentes internacional, nacional y regional.**

La evaluación de la vulnerabilidad del sistema acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya partió de la identificación de la metodología que tendría aplicabilidad en la zona de acuerdo con sus características hidrogeológicas y de la disponibilidad de información, fue así como se decidió probar los procedimientos intrínsecos de evaluación denominado GOD.

En esta fase del presente estudio, también se identificaron las instituciones públicas y privadas que han efectuado estudios y/o proyectos de aguas subterráneas, con la finalidad de recopilar el mayor número de informes y/o datos de investigaciones realizadas, en el Centro Poblado Jayllihuaya, con la finalidad de recolectar información, incluso parcial, de datos textos e interpretaciones sobre la hidrogeología del área en estudio.

Actualmente no se cuenta con información suficientemente depurada acerca del estado de los recursos naturales de la zona y especialmente del recurso hídrico subterráneo, ya que la información geológica e hidrogeológica de la zona presenta vaga información.

#### **3.4.5.1. Delimitación y caracterización del acuífero Jayllihuaya.**

Esta etapa contempló la georreferenciación de la zona de interés, el cual vendría a ser el acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya.

Para la evaluación de los niveles de vulnerabilidad a la contaminación, el área de estudio fue diferenciada en tres zonas en función de la litología e hidrogeología, previa realización de un estudio bibliográfico detallado de las descripciones geológicas en cada sector.

La recopilación de datos se orientó hacia: Inventariado de puntos de pozos, estudio hidrogeológico y la litología de la zona no saturada, esta se realizó mediante la revisión bibliográfica al ser una opción más idóneo para empezar a conocer rápidamente las características necesarias de la zona en la que se consultó una compilación de informes técnicos de diferentes fuentes como; Alcaldía del Centro Poblado Jayllihuaya, entidades gubernamentales

y Universidades, de estos informes se consideraron principalmente datos Geológicos, hidrogeológicos, y mapa de localización.

#### **3.4.5.2. Identificación y caracterización de los pozos existentes:**

El trabajo consistió en recopilar la información técnica concerniente a los pozos, con el propósito de contar con la base de datos necesario para cumplir con el objetivo del estudio. La fase del inventario se inició por la parte baja del Centro Poblado Jayllihuaya, posteriormente se continuo por la parte central y alta. Los puntos identificados corresponden a pozos en los que principalmente se puede medir el nivel freático.

#### **3.4.5.3. Determinación de los parámetros de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.**

La determinación de los parámetros requeridos para la determinación del nivel de vulnerabilidad del acuífero de interés objeto de este trabajo de investigación, fue realizada conforme la metodología GOD propuesta por (Foster e Hirata, 1987).

La información básica consultada para la obtención de los parámetros más significativos son los siguientes:

- ✓ Cartografía básica de la zona.
- ✓ Inventario de pozos.
- ✓ Mapas geológicos e hidrogeológicos.
- ✓ Descripción litológica de la zona.

#### **3.4.5.4. Control del nivel freático mensual:**

Esta información se obtiene a partir de las visitas de campo a la misma zona de estudio, la mayoría de los pozos están dentro de las viviendas, siendo dificultoso acceder a ellas, es por ello que se tomaron puntos estratégicos, es decir que se ubicaron puntos de pozos de fácil acceso.

Los controles de los niveles freáticos fueron en forma mensual, en 20 pozos piloto en un periodo de 3 meses en la época de lluvias, actividad que tuvo como finalidad observar el incremento y descenso del nivel freático de cada pozo en el área de interés. Los equipos utilizados fueron, ficha de control del nivel freático, vincha de 8m de longitud, posicionador de coordenadas (GPS Garmin Extrex20) para ubicar las coordenadas y las altitudes de cada uno de los pozos en observación, anotando estos datos en la ficha de observación.

El método utilizado para medir la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático, es el método de la cinta graduada, que consiste de una cinta de acero graduada en milímetros, la cual tiene un peso en su extremo para mantenerla recto dentro del pozo.

#### **3.4.5.5. Caracterización litológica del acuífero:**

La información requerida se obtiene a partir de los estudios de los diferentes trabajos previamente consultados con referente al Centro Poblado Jayllihuaya, precisamente para la determinación de la litología se ha utilizado la información del estudio titulado como: Zonificación geotécnica de los suelos y afloramientos rocosos de la microcuenca Puno en el año (1999), en

este estudio, se hace una clasificación de los suelos en gran parte de la microcuenca Puno abarcando en esta área al Centro Poblado Jayllihuaya.

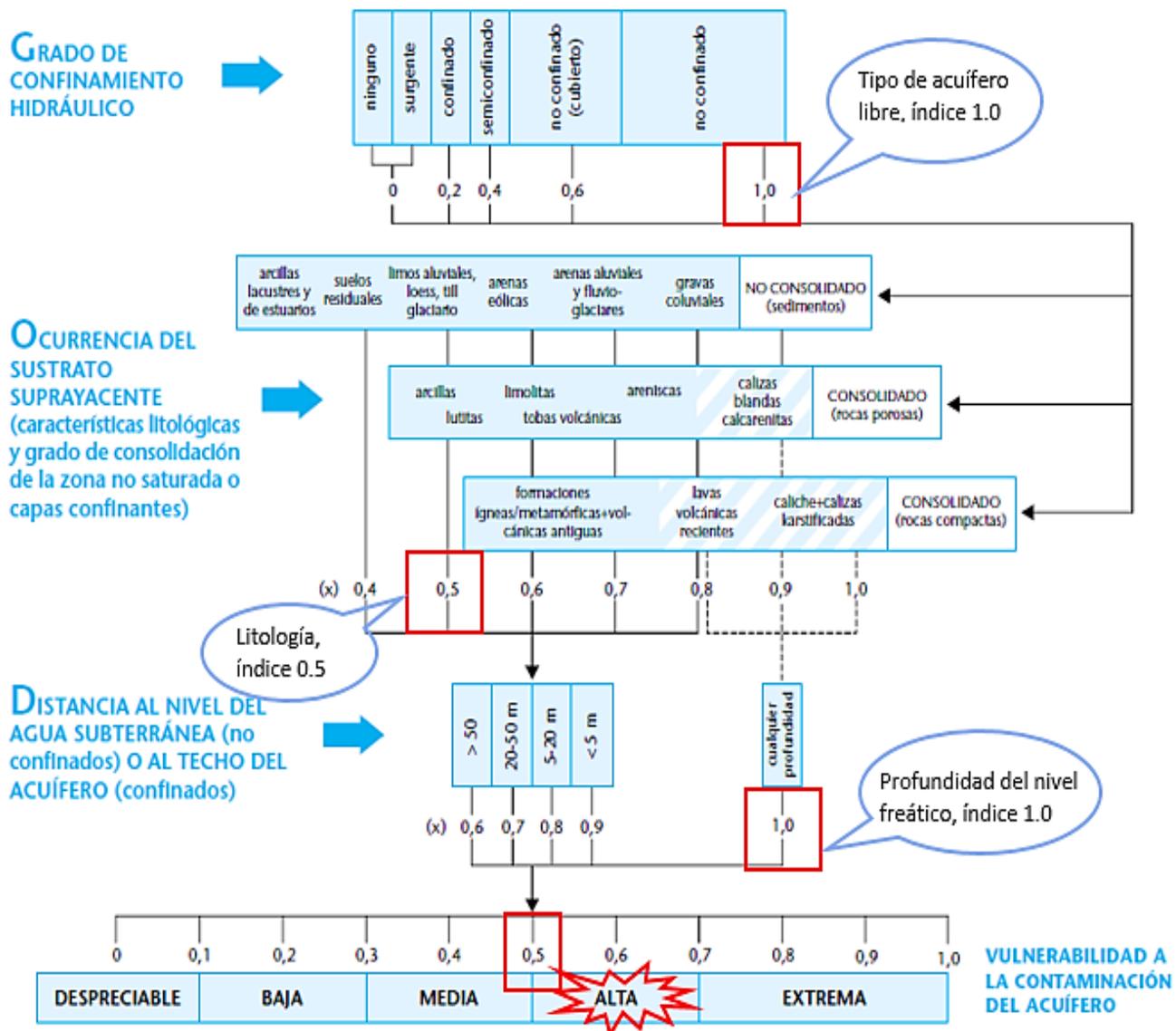
Esta información nos permitió conocer a través de la geología de la superficie, y por medio del perfil geológico se registra la naturaleza litológica o estratigráfica, y las características de los afloramientos de las rocas. Para dar veracidad a la información recopilada de las características litológicas fue necesario hacer un recorrido por toda el área de estudio, con el objetivo de hacer un reconocimiento in situ de las particularidades geológicas y litológicas de la zona en forma visual. Se tomaron fotografías y se elaboró un croquis a mano alzada de la ubicación del área de estudio donde se anotaron las particularidades litológicas de cada sector, para ello se usó posicionador de coordenadas (GPS Garmin Extrex20). Las mismas fueron referenciadas utilizando ArcGIS en el plano catastral disponible del Centro Poblado Jayllihuaya.

#### **3.4.5.6. Caracterización del tipo de acuífero.**

La caracterización del acuífero en la zona se hizo a partir de informaciones secundarios, como son las descripciones de las unidades hidrogeológicas realizados por el INGEMMET y a partir del modelo geológico local, esta información contempla la existencia de acuíferos libres, confinados y semiconfinados al valorar el tipo de materiales existentes en la zona no saturada. Estos estudios nos permitieron establecer el tipo de sistema que conforma el acuífero del Centro poblado Jayllihuaya.

### 3.4.5.7. Sistematización de la información del acuífero en la matriz de indexación GOD.

Para sistematizar toda la información recopilada para su posterior cálculo se empleó el diagrama de indexación diseñado por Foster & Hirata (1991) que cualifica la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, los tres índices se ubican en el diagrama resultando un valor, el cual se clasifica dentro de una escala, que va desde 0 a 1 como se muestra en la siguiente figura:



#### **3.4.5.8. Determinación de los niveles de vulnerabilidad.**

El nivel de vulnerabilidad total de cada zona se obtendrá multiplicando los tres parámetros propuesta por el método GOD que son variables significativas (G) Tipo de acuífero, (O) Litología natural de la zona (D) Profundidad del nivel freático, y con el valor resultante para cada zona se asigna el nivel de vulnerabilidad relativo que vendría a ser: extremo, alto, medio, bajo o despreciable.

$$NV = G * O * D$$

Lo anterior se presenta gráficamente en un mapa donde se diferenciaron tres zonas en función de la hidrogeología, previa realización de un estudio detallado de las descripciones litológicas y las profundidades del nivel freático en cada caso, estas zonas se distinguen claramente y son identificados por sus nombres.

#### **3.4.5.9. Caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Jayllihuaya**

Para realizar la caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya fue necesario realizar mapas utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG), ya que es una herramienta diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos.

#### **3.4.5.10. Generación de mapas y zonificación de niveles de vulnerabilidad a la contaminación con ArcGIS.**

La generación de mapas de los niveles de vulnerabilidad a la contaminación se realizó mediante la superposición de los mapas con la ayuda del Sistema de Información Geográfico, en el cual se multiplicaron

automáticamente los tres parámetros evaluados descritos en la metodología GOD (tipo de acuífero, litología de la zona, profundidad del nivel freático), obteniendo niveles variados.

Para identificar mejor los diferentes niveles de vulnerabilidad a la contaminación, se zonificó el área de estudio en las que se distinguen los niveles de baja hasta alta.

### **Proceso de generación de los mapas de vulnerabilidad con ArcGIS**

Para calcular el nivel de vulnerabilidad con ArcGIS se siguió 3 pasos en los que se utilizaron análisis de superficie (slope), interpolación, reclasificación y álgebra de mapas, funciones de la herramienta Spatial Analyst.

Paso 1. Construir los mapas que representan la distribución espacial de cada una de las variables, para ello se puede utilizar ya sea métodos determinativos (IDW, Spline) o geoestadísticos (Krigin).

Paso 2. Consiste en Reclasificar los mapas obtenidos para cada una de las variables de acuerdo a los datos consignados. Esto se realiza por medio de la función Reclassif de la extensión Spatial Analyst. Para los datos no numéricos como Formación geológica que constituye el acuífero, Cubierta edáfica bajo la superficie del terreno y Tipo de material geológico de la zona no saturada, simplemente se le da una valoración al tipo de material de acuerdo a las tablas anteriores para construir el raster correspondiente.

Paso 3. Álgebra de mapas. Con los mapas ya reclasificados de acuerdo al paso anterior, lo que sigue es realizar la suma ponderada de cada uno de

ellos. Para ello ArcGIS cuenta con la herramienta Raster Calculator de la extensión Spatial Analyst.

El resultado obtenido en los pasos anteriores se reclasifica de acuerdo a la Metodología GOD para finalmente obtener el mapa de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero.

#### **3.4.5.12. Descripción de los niveles de vulnerabilidad del acuífero.**

Esta fase se determinó de la siguiente manera:

**Vulnerabilidad extrema:** acuífero vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua, con un impacto relativamente rápido en muchos escenarios de polución.

**Vulnerabilidad alta:** vulnerable a muchos contaminantes, excepto a aquellos muy absorbibles o fácilmente transformables.

**Vulnerabilidad moderada:** vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.

**Vulnerabilidad baja:** acuífero vulnerable a los polucionantes más persistentes y a largo plazo.

**Vulnerabilidad despreciable:** zona en donde las presencias de capas confinantes no permiten ningún flujo vertical significativo.

## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cálculos y resultados finales que se dieron en la determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya dependieron de distintos factores, el primero es la variación del nivel freático en diferentes puntos de la misma zona de estudio y la litología de la zona no saturada del acuífero.

### **4.1. Delimitación y caracterización del acuífero del centro poblado Jayllihuaya.**

Los sectores en los cuales se diferenció en el área de estudio fueron. I) Barrio Panamericana, Barrio Llamajahuira, Urbanización Aziruni I etapa, Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Najjar, Urbanización Rosario Coñiri, II) Urbanización Aziruni III etapa ciudad jardín, Barrio central Santiago apóstol, Barrio Santiago Aziruni, Barrio Salihuani, Barrio Inkapujhio sasani, Barrio Turnui Miraflores, III) Barrio Santiago Vizcachani, Barrio ecológico Yauruyo, Urbanización las lomas Jayllihuaya y Barrio alto Jayllihuaya.

#### **Identificación y caracterización de los pozos existentes**

En el Centro Poblado Jayllihuaya se han inventariado un total de 20 pozos georreferenciándolos respectivamente; la mayoría de los pozos construidos a tajo abierto, en años anteriores la cantidad de pozos era mayor, en la actualidad los pozos fueron abandonados por bajo rendimiento en la época de estiaje, por lo que tuvieron que enterrarlos y sellarlos, por otro lado, a medida que se fue expandiendo la población en la zona, los sectores ya cuentan con servicios de saneamiento básico, reduciendo de esta manera la cantidad de pozos en la zona.

Los estados de los pozos durante el inventariado se encontraban funcionando (operativos) y cuyas aguas extraídas en algunos sectores son usados para consumo humano y actividades agrícolas.

En sectores específicos de Jayllihuaya los pozos inventariados corresponden principalmente a surgencias estacionales de agua, es decir, que durante la estación seca permanecen casi secos o secos y durante la estación de lluvias las aguas subterráneas emergen parcialmente debido a la sobresaturación del acuífero. La mayoría de éstos pozos están en las zonas de poca cobertura vegetal, las aguas de los pozos son captados de poca profundidad (1 a 8 m), y de diámetro máximo 1,2 m revestidas en mampostería de piedras, en algunos casos abiertos.

**Tabla 5:** Inventariado de pozos en el Centro Poblado de Jayllihuaya.

ZONAS	SECTORES IDENTIFICADOS	POZOS PILOTO	FECHA
BAJA	Barrio Panamericana	1	26/01/2017
	Barrio Llamajahuira	1	26/01/2017
	Urbanización Aziruni I etapa	1	26/01/2017
	Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Najar	1	26/01/2017
	Urbanización Rosario Coñiri	2	26/01/2017
MEDIA	Urbanización Aziruni III etapa ciudad jardín	2	27/01/2017
	Barrio central Santiago Apóstol	1	27/01/2017
	Barrio Santiago Aziruni	1	27/01/2017
	Barrio Salihuani	2	27/01/2017
	Barrio Inkapujhio sasani	1	27/01/2017
	Barrio Turnuhui Miraflores	1	27/01/2017
ALTA	Barrio Santiago Vizcachani	2	28/01/2017
	Barrio Ecológico Yauruyo	1	28/01/2017
	Urbanización las lomas Jayllihuaya	1	28/01/2017
	Barrio alto Jayllihuaya	2	28/01/2017

**Fuente:** Elaboración propia del investigador.

#### 4.2. Determinación de los parámetros de vulnerabilidad a la contaminación.

- **Control del nivel freático mensual**

En el Centro Poblado Jayllihuaya existen numerosos manantiales indicadores que el nivel freático está muy cerca o coincide con la superficie del suelo, sobre todo en la zona baja y media. El agua subterránea es generada por la infiltración desde la superficie y es percolada hacia el interior del acuífero, en el área de estudio, se pueden observar variaciones espaciales y temporales en la profundidad del agua subterránea, así en términos generales esto se aprecia en la zona baja a la orilla del lago, donde el nivel freático esta entre 0.3 a 1 m en época de estiaje, y en época de lluvias se inunda el terreno natural, en terrenos rellenados oscila 0.5 a 1 m. En la parte central el nivel freático oscila de 2 a 4 m en época de estiaje y de 1.5 a 3 m en época de lluvias. Pero sin embargo en las partes altas del Centro Poblado Jayllihuaya el nivel freático se encuentra a mayor profundidad, donde en época de lluvias oscilan entre 5 a 6 m y en época de estiaje están entre 6 a 8 m en algunos casos tienden a secarse afectando a los pobladores que se abastecen de este recurso vital para la vida.

En ese sentido, los resultados obtenidos deben ser entendidos en este contexto, el control del nivel freático se hizo en época de lluvias al ser esta condición climática determinante en los procesos relacionados con la infiltración de contaminantes hipotéticos con mayor facilidad y en un tiempo menor. Para lo cual se tuvo muy en cuenta las condiciones propias del área de estudio, en la cual durante las épocas de lluvia el nivel freático aumenta y se presenta un evidente intercambio de aguas entre la superficie y el subsuelo, cuando llueve los pozos se rebosan, lo que nos llevó a suponer

una migración de agentes contaminantes desde la superficie hasta hacia el acuífero, premisa que debe ser corroborada mediante la realización de futuras investigaciones sobre el mismo.

Para la evaluación de la vulnerabilidad se utilizó la serie de niveles más altos, con el objetivo de evaluar el parámetro en la condición más crítica del sistema para el acceso del contaminante del acuífero.

**Tabla 6:** Control del nivel freático mensual.

N°	Pozos identificados	Zona	Ubicación	Coordenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)			Nivel freático más bajo
				E	N			Enero	Febrero	Marzo	
1	P-1	Baja	Barrio Panamericana	393759	8245778	3825	0.80	0.54	0.32	0.40	0.32
2	P-2		Barrio Llamajahuira	393906	8245572	3823	0.80	0.52	0.30	0.38	0.30
3	P-3		Urbanización Aziruni I etapa	393968	8245338	3823	1.00	0.76	0.56	0.64	0.56
4	P-4		Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Na	394199	8245472	3829	1.00	0.72	0.52	0.62	0.52
5	P-5		Urbanización Rosario Cofiri	394797	8245720	3819	1.20	0.85	0.68	0.73	0.68
6	P-6			395207	8245890	3818	1.10	0.93	0.77	0.84	0.77
7	P-7	Central	Urbanización Aziruni III etapa Ciudad Jardín	394496	8245411	3819	1.20	0.86	0.72	0.78	0.72
8	P-8			394344	8245111	3821	1.20	0.84	0.70	0.76	0.70
9	P-9		Barrio Central Santiago Apóstol	394361	8244968	3845	6.00	5.10	3.93	4.30	3.93
10	P-10		Barrio Santiago Aziruni	395124	8244570	3848	6.00	5.15	3.85	4.10	3.85
11	P-11		Barrio Salihuani	395442	8244225	3852	4.00	3.23	2.15	2.90	2.15
				395723	8244077	3853	4.50	3.52	2.10	2.87	2.10
13	P-13		Barrio Inkapujhio Sasani	395811	8244034	3850	4.00	3.12	1.95	2.10	1.95
14	P-14		Barrio Turnui Miraflores	395958	8243967	3852	5.50	4.20	2.32	3.73	2.32
				395917	8244058	3857	7.00	4.85	2.86	3.25	2.86
16	P-16		Alta	Barrio Santiago Vizcachani	396215	8244187	3854	6.00	5.30	4.15	4.23
17	P-17	395331			8244013	3895	7.50	5.10	4.26	4.26	4.26
18	P-18	Barrio Ecológico Yauruyo		395640	8243986	3881	6.00	4.95	4.54	4.54	4.54
19	P-19	Urbanización las Lomas Jayllihuaya		395834	8243664	3895	7.00	5.62	5.32	5.35	5.32
20	P-20	Barrio alto Jayllihuaya		396151	8243212	3961	8.00	5.85	5.22	5.54	5.22

**Fuente:** Elaboración propia del investigador.

- **Caracterización litológica del acuífero Centro Poblado de Jayllihuaya**

En el área se diferencian tres (3) unidades geológicas, las cuales agrupan sedimentos no consolidados como depósitos de origen aluvial (depósitos cuaternarios) de alta a moderada permeabilidad, rocas moderada y altamente permeables.

#### **Zona alta**

Mayormente la zona alta está constituida por clastos de forma redondeada a subredondeada rocas de origen sedimentario como las areniscas y conglomerados arcósicos de color rojizo, y rocas ígneas de origen volcánico, conformado por andesitas, dacitas y basaltos de color marrón claro en menor proporción, se observa una marcada combinación e intercalación de suelos con afloramientos rocosos; por lo tanto el color del suelo está dado según el lecho rocoso que está cercano al depósito de suelo como roca madre, en esta zona prevalecen los depósitos de origen coluvial residual, mayormente son suelos gruesos conformados por gravas y arenas arcillosas (GC, SC), grava y arenas limosas (GM, SM), de color gris oscuro a claro, rojo claro a oscuro, son algo cohesivos y friccionantes.

#### **Zona media**

En esta zona según los estudios realizados se observa la existencia de afloramientos rocosos mayormente de origen sedimentario y sobre la cual se puede observar areniscas y conglomerados arcósicos, la formación del suelo en la zona no saturada son depósitos fluviales y empinadas sobre depósitos aluviales, los suelos encontrados son mayormente arenas arcillosas (SC), arenas limosas (SM), limos de alta y baja plasticidad (MH y ML), en menor porcentaje gravas arcillosas (GC), todas estratificadas en forma inclinada. A

medida que disminuye la pendiente del terreno se va incrementando suelos con mayor contenido de finos.

**Zona baja**

Esta zona está constituida por rocas areniscas y conglomerados, los depósitos de suelo son de origen lacustre y origen fluvial bastante reciente que están ubicados en la orilla del lago, la profundidad de deposición de estos suelos es mayores a 4m. Estos suelos presentan estratificación casi horizontal e intercalado, también se observó rellenos artificiales heterogéneos que recientemente se están compactando y en algunas áreas están conformadas en gran parte por suelos areno arcillosos, limos plásticos y orgánicos depositados por el río Jayllihuaya en su tramo final o curso inferior en una especie de delta en la zona. Los grupos principales se presentan en una tabla:

**Tabla 7:** Estratigrafía del Centro Poblado Jayllihuaya.

ZONA	CONSOLIDACION DE LA ZONA NO SATURADA	CARACTERISTICAS LITOLÓGICAS
Baja	No consolidada (sedimentos)	Arcillas lacustres y de estuario
		Suelos residuales
Central	No consolidada (sedimentos)	Arenas aluviales y fluviales
		Arenas arcillosas y arena limosas
Alta	No consolidada (sedimentos)	Gravas coluviales
	Consolidado (rocas porosas)	Areniscas

**Fuente:** Elaboración propia del investigador.

- **Caracterización del tipo de acuífero**

En el Centro Poblado Jayllihuaya es limitado el conocimiento de los sistemas acuíferos presentes, se han realizado pocos estudios de tipo hidrogeológico local como es el caso del área de interés objeto de este trabajo de investigación, la mayoría de ellos son de carácter regional o nacional.

Con las informaciones hidrogeológicas y geológicas reunidas y de acuerdo a sus capacidades para almacenar y transmitir agua subterránea, concluimos que los acuíferos en esta zona se encuentran esencialmente en formaciones sedimentarias de origen fluvial y lacustre que van desde gravas gruesas con intercalaciones de arcillas hasta arcillas lacustres y suelos residuales proporcionando la formación de dos tipos de acuífero, libre que se extiende por el norte de la zona de estudio y libre cubierto que abarca el sur en la parte del barrio alto Jayllihuaya, apareciendo también al sureste y oeste en las laderas de los cerros de la zona, el cual está formado por lutitas rojo ladrillo con capas blandas y depósitos de origen aluvial (depósitos cuaternarios) que son sedimentos no consolidados de alta a moderada permeabilidad; por lo que se le cataloga de acuerdo a la clasificación de este parámetro como un acuífero libre cubierto y basándonos además en el diagrama de indexación GOD para la evaluación de la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos, el índice asignado a este parámetro es de 1.0, 0.8 y 0.6.

Por ser relativamente una zona medianamente pequeña concluimos que en toda ella se presenta dos tipos de acuífero.

- **Sistematización de la información del acuífero en la matriz de indexación del método GOD**

**Tabla 8:** Índice de vulnerabilidad a la contaminación.

UBICACIÓN		Tipo de Acuífero	Características Litológicas	Nivel Piezométrico	Total	Vulnerabilidad
Baja	Características	Libre	Arcilla lacustres y de estuario, Suelos residuales	0.30 – 0.77	0.55	Alta
	Valor	1.0	0.55	1.0		
Central	Características	Libre (cubierto)	Arenas aluviales y fluviales, Arenas arcillosas y arenas limosas	0.70 – 3.92	0.504	Alta-Moderada
	Valor	0.8	0.7	0.9		
Alta	Características	Libre (cubierto)	Gravas coluviales, Areniscas	4.15 – 5.32	0.384	Media
	Valor	0.6	0.8	0.8		

**Fuente:** Elaboración propia del investigador.

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición (Tabla 08). Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores. Se considera vulnerabilidad muy baja si el valor es menor a 0.1, baja si el valor está entre 0.1 y 0.3, moderada si está entre 0.3 y 0.5, alta si está entre 0.5 y 0.7 y extrema si es mayor a 0.7.

**Determinación del nivel de vulnerabilidad**

➤ Zona baja:

<b>ZONA BAJA</b>	
VARIABLES	Factor GOD
Tipo de acuífero	Libre
Sustrato litológico	estuario, Suelos residuales
Nivel Freático (m)	<2
<b>Evaluación del índice de vulnerabilidad</b>	
Tipo de acuífero (G)	1.0
Sustrato litológico (O)	0.55
Nivel Freático (D)	1.0
Nivel Vulnerabilidad	G*O*D

$$NV(zb) = 1.0 \times 0.55 \times 1.0$$

$$NV(zb) = 0.55$$

*Nivel de Vulnerabilidad = Alta*

➤ Zona central:

<b>ZONA CENTRAL</b>	
VARIABLES	Factor GOD
Tipo de acuífero	Libre (cubierto)
Sustrato litológico	Arenas aluviales y fluviales, arenas arcillosas y arenas limosas
Nivel Freático (m)	2 – 5
<b>Evaluación del índice de vulnerabilidad</b>	
Tipo de acuífero (G)	0.8
Sustrato litológico (O)	0.7
Nivel Freático (D)	0.9
Nivel Vulnerabilidad	G*O*D

$$NV(zm) = 0.8 \times 0.7 \times 0.9$$

$$NV(zm) = 0.504 \approx 0.5$$

*Nivel de Vulnerabilidad = Alta – Moderada*

➤ Zona alta:

ZONA ALTA	
VARIABLES	Factor GOD
Tipo de acuífero	Libre (cubierto)
Sustrato litológico	Gravas coluviales, Areniscas
Nivel Freático (m)	5 – 20
Evaluación del índice de vulnerabilidad	
Tipo de acuífero (G)	0.6
Sustrato litológico (O)	0.8
Nivel Freático (D)	0.8
Nivel Vulnerabilidad	G*O*D

$$NV(za) = 0.6 \times 0.8 \times 0.8$$

$$NV(za) = 0.384 \approx 0.4$$

*Nivel de Vulnerabilidad = Moderada*

### 4.3. Caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación.

#### Parámetro “G” (Tipo de acuífero)

Debido a las características litológicas de la zona no saturada y según los estudios revisados; este parámetro se estableció de acuerdo a los lineamientos establecidos por la metodología GOD.

#### Parámetro “O” (Litología de la zona vadosa o no saturada)

La litología de la zona no saturada del acuífero se presenta en forma descriptiva.

### **Parámetro “O” (Profundidad del nivel freático)**

En la zona se tomaron 20 niveles freáticos medidos en los diferentes puntos de captación de pozos someros y profundos; los lugares donde no se pudo tomar, fueron ponderados.

El mapa fue obtenido por medio de técnicas de interpolación utilizando software para Modelos Digitales de Terreno, el insumo fundamental fueron los datos obtenidos a partir de la toma de profundidades del nivel freático. Este mapa de isovalores ha sido posteriormente vinculado al Sistema de Información Geográfica en un Plano de Información de tipo numérico reclassificándose posteriormente de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 6.

#### **- Generación de mapa del nivel de vulnerabilidad a la contaminación del Centro Poblado Jayllihuaya.**

La determinación de la vulnerabilidad a la contaminación representado gráficamente en mapa en el área de estudio, se obtuvo de acuerdo a los criterios establecidos en el método GOD, se realizó superponiendo los mapas correspondientes a los tres parámetros evaluados generados en un paquete de ArcGIS y cuya base cartográfica fue el mapa de Centro Poblado de Jayllihuaya.

Al realizar el álgebra de mapas que arrojara el mapa final de vulnerabilidad a la contaminación, para ello se utilizó la herramienta Spatial Analyst/Raster Calculator, obteniéndose el mapa ilustrado en el anexo.

Este procedimiento permitió generar áreas, las cuales poseían el valor de cada uno de los parámetros. La multiplicación de los valores correspondientes a estos parámetros en cada una de las áreas generadas, entrego un valor final para cada una de ellas, al realizar el álgebra de mapas que arrojara el mapa final de vulnerabilidad a la contaminación, partiendo de la siguiente ecuación:

$$Vulnerabilidad = G * O * D$$

De esta manera, a partir del valor final obtenido por cada una de las áreas, se determinó la vulnerabilidad para cada zona según como está establecido en el anexo, lo cual se representó gráficamente en un mapa de vulnerabilidad del área de estudio.

Como resultado final de la evaluación se presenta el mapa de vulnerabilidad a la contaminación donde el nivel freático y las características litológicas son factores atenuadores, indica que donde la formación geológica presenta afloramientos rocosos areniscas, el factor atenuador, es mucho mayor frente a los agentes contaminantes.

En este mapa se observan dos zonas claramente diferenciadas, una zona asociada a los sedimentos de origen aluvial como son las areniscas con una conductividad hidráulica alta.

La aplicación del método de indexación arrojó dos zonas así:

**Vulnerabilidad Moderada:** Ocupa el área más pequeña de vulnerabilidad con 474.423 Ha; y está representada por los sectores Barrio Panamericana, Barrio Llamajahuira, Urbanización Aziruni I etapa, Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Najjar, Urbanización Rosario Coñiri

caracterizado por sedimentos no consolidados correspondientes a arcillas lacustres y de estuario con suelos residuales de permeabilidad moderada, donde la profundidad del nivel freático varía de 0.30 a 0.77 m.

**Vulnerabilidad Alta:** La mayor zona de vulnerabilidad ocupa un área de 1106.987 Ha; representada por los sectores Urbanización Aziruni III etapa ciudad jardín, Barrio central Santiago Apóstol, Barrio Santiago Aziruni, Barrio Salihuani, Barrio Inkapujhio sasani, Barrio Turnuhui Miraflores, Barrio Santiago Vizcachani, Barrio ecológico Yauruyo, Urbanización las Lomas Jayllihuaya, Barrio alto Jayllihuaya constituida por depósitos no consolidados y consolidados como arenas aluviales y fluviales, arenas arcillosas y arena limosas, gravas coluviales y areniscas, donde su profundidad del nivel freático varía entre 0.70 y 5.32 m.

- **Descripción del nivel de vulnerabilidad del acuífero**

El nivel de vulnerabilidad a la contaminación obtenido, indica cuáles zonas podrán ser afectadas en mayor medida y de manera más rápida por cargas contaminantes generadas en la superficie del terreno, en las cuales deben restringirse o prohibirse ciertas actividades e implementar acciones de seguimiento y de prevención de la contaminación.

**Acuíferos con Vulnerabilidad Moderada** (índices entre 0,3 y 0,5), indica que es un acuífero de pobre rendimiento o en los que el tiempo de tránsito de los contaminantes es prolongado, lo que favorece los mecanismos de dilución, dispersión y retención, que atenúan la concentración de la carga contaminante. Incluye también zonas del territorio en las que el espesor de la zona no saturada es suficiente para garantizar una depuración casi

completa de la contaminación microbiológica y son vulnerables a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.

**Acuíferos con Vulnerabilidad Alta** (índices entre 0,5 y 0,7), son vulnerables a muchos contaminantes (excepto a los absorbibles y/o fácilmente transformables) en muchos escenarios de contaminación, dado que son formaciones acuíferas de elevada permeabilidad y escaso poder depurador del medio, además de que contienen aguas subterráneas en condiciones de potabilidad para usos de la población, por lo que se debe controlar los vertimientos y la disposición de residuos sólidos, provenientes tanto de actividades industriales como domésticas.

En Centro Poblado Jayllihuaya tiene una gran extensión de terreno está cubierta por depósitos fluviales, además de otros depósitos como son los depósitos de origen lacustre, por lo que se dificulta su identificación. Las variaciones en la composición de la matriz de los depósitos antes mencionados, determinan que en algunos casos la vulnerabilidad sea alta.

En estas zonas donde se presentan una vulnerabilidad intrínseca de moderada a alta requieren de un manejo especial, por lo que las actividades que se desarrollen en estas deben ser planificadas y ejecutadas de tal forma que se disminuya la probabilidad de contaminación del recurso hídrico.

#### IV. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos, indican que el acuífero presenta un alto nivel de vulnerabilidad a la contaminación en un 60 % del área de estudio. Este alto nivel de vulnerabilidad disminuye a un nivel moderado hacia la zona alta del Centro Poblado Jayllihuaya.
2. El área de estudio se diferenció en tres zonas claramente definidas por las características geológicas propias de la zona, donde se determinó dos tipos de acuíferos, zona baja tipo de acuífero es libre con un área de 474.423 Ha y la zona central y alta el tipo de acuífero es libre cubierto con un área 1106.987 Ha que se encuentran dentro del área del Centro Poblado Jayllihuaya.
3. En el área de estudio se determinó el tipo de acuífero libre con índice de 1.0 y libre cubierto con índice 0.75, las características litológicas de la zona no saturada son arcillas lacustres, estuarios y suelos residuales con índice 0.55, arenas aluviales y fluviales, arenas arcillosas y arenas limosas 0.7, gravas coluviales y areniscas 0.8. Los rangos de profundidad del nivel freático son de 0.25-0.77 m con un índice de 1.0, profundidad 0.77-3.92 m con un índice 0.9 y las profundidades más altas que fluctúan entre 4.15-5.32 m con valor de 0.8.
4. La zona baja presenta un índice total de 0.55, califica como un acuífero de vulnerabilidad alta, la zona central tuvo un índice de 0.504 que lo califica con un nivel de vulnerabilidad de moderada a alta, por último, la zona alta presenta un índice de 0.384 puntos, calificado como vulnerabilidad media.

## VI. RECOMENDACIONES

- ✓ En función del nivel de vulnerabilidad calculado para el acuífero del Centro Poblado Jayllihuaya se recomienda formular e implementar estrategias de control y manejo adecuado del acuífero para su preservación, en términos de cantidad y calidad, buscando un uso sostenible y aprovechamiento a largo plazo, especialmente como fuente segura y confiable de abastecimiento de agua potable futura.
- ✓ Debido a la compleja interacción entre los diferentes componentes de la vulnerabilidad a la contaminación y los de la posible actividad contaminante al subsuelo, se recomienda evaluar factores que afectan la introducción y propagación de contaminantes en el subsuelo, de forma más detallada y puntual, diferenciando cada actividad contaminante y el contaminante en sí.
- ✓ Se recomienda realizar el análisis de riesgo por contaminación, del acuífero Jayllihuaya, el cual tendrá como base las zonas vulnerables obtenidas en el presente estudio. Este estudio deberá realizar investigaciones de campo para el levantamiento de información real sobre fuentes contaminantes, acompañado de un modelo de transporte de contaminantes en la zona; esta modelación tendrá como objetivo la determinación de las zonas en riesgo y su zonificación.
- ✓ A fin de establecer detalladamente las características y la forma en que funcionan los acuíferos, se recomienda hacer un estudio, con el objetivo de impedir que se asienten o continúen asentándose actividades humanas potencialmente contaminantes en las zonas vulnerables del acuífero, y también evaluar hacia donde pueden migrar o han migrado los contaminantes que ya han ingresado al acuífero.

## VII. REFERENCIAS

- Auge, M. P. (2004). *Vulnerabilidad de acuíferos Conceptos y Métodos*. Buenos Aires, Argentina. p. 23-45.
- Aguilar R., (2010) *Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca de Jayllihuaya con fines de consumo doméstico y agropecuario*. E. P. de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú.
- Auge, M. P. (2006). *Agua subterránea deterioro de calidad y reserva*. Buenos Aires, Argentina. p. 58.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega S.A. 2 vol. p. 63-74
- Cárdenas E. & Solano J., (2010). *Determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos del sector rural de la localidad de Usme, Bogotá D.C, con miras a la formulación de los lineamientos de un plan de gestión ambiental, con énfasis en el recurso hídrico de la zona*. Bogotá-Colombia. p. 12.
- Collazo M., & Montaña J., (2012). *Manual de aguas subterráneas*. Montevideo-Uruguay.
- Chaiña N., (1999) *Zonificación geotécnica de los suelos y afloramientos rocosos de la micro cuenca de Puno*. E. P. de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú.
- División J., (1975). *El agua subterránea y los pozos*. Minnesota.
- Foster, S; Hirata, R. (1988). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes*. Organización Panamericana de la Salud. (OMS). Pág. 74.
- Figueroa G., (2010) *Evaluación del peligro potencial de contaminación de las aguas subterráneas en la provincia de Talagante*. Chile. p. 36-39.
- Hirata, R., & Rebouças, A. (2001). *La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos*. Recuperado el 22 de abril de 2010.

Mena G. & Montes J., (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de mariona, departamento de san salvador*. Universidad de San Salvador: El salvador.

Molfino Y., (2015). *Correlación de las aguas subterráneas con el ámbito urbano de Piura*. Ingeniería Civil, Piura-Perú.

Mejía J., (2012). *Hidrología aplicada*. Perú. Q & P Impresores. p. 19-24.

Mena G., & Montes J., (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de mariona, departamento de san salvador*. Tesis, El salvador.

Palomino S., (2009). *Análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas utilizando mapas de vulnerabilidad y peligro caso acuífero Aguascocha*. Instituto Geológico, Minero, Metalúrgico del Perú, Lima.

Vélez M., (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. 2ª edición. Medellín-Colombia. p. 58.

## VIII ANEXOS

**ANEXO A.** Metodologías más comunes para cálculo de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

**ANEXO B.** Diagrama GOD para el cálculo del índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

**ANEXO C.** Mapa de ubicación de la zona de estudio.

**ANEXO D.** Mapa de puntos de pozos analizados.

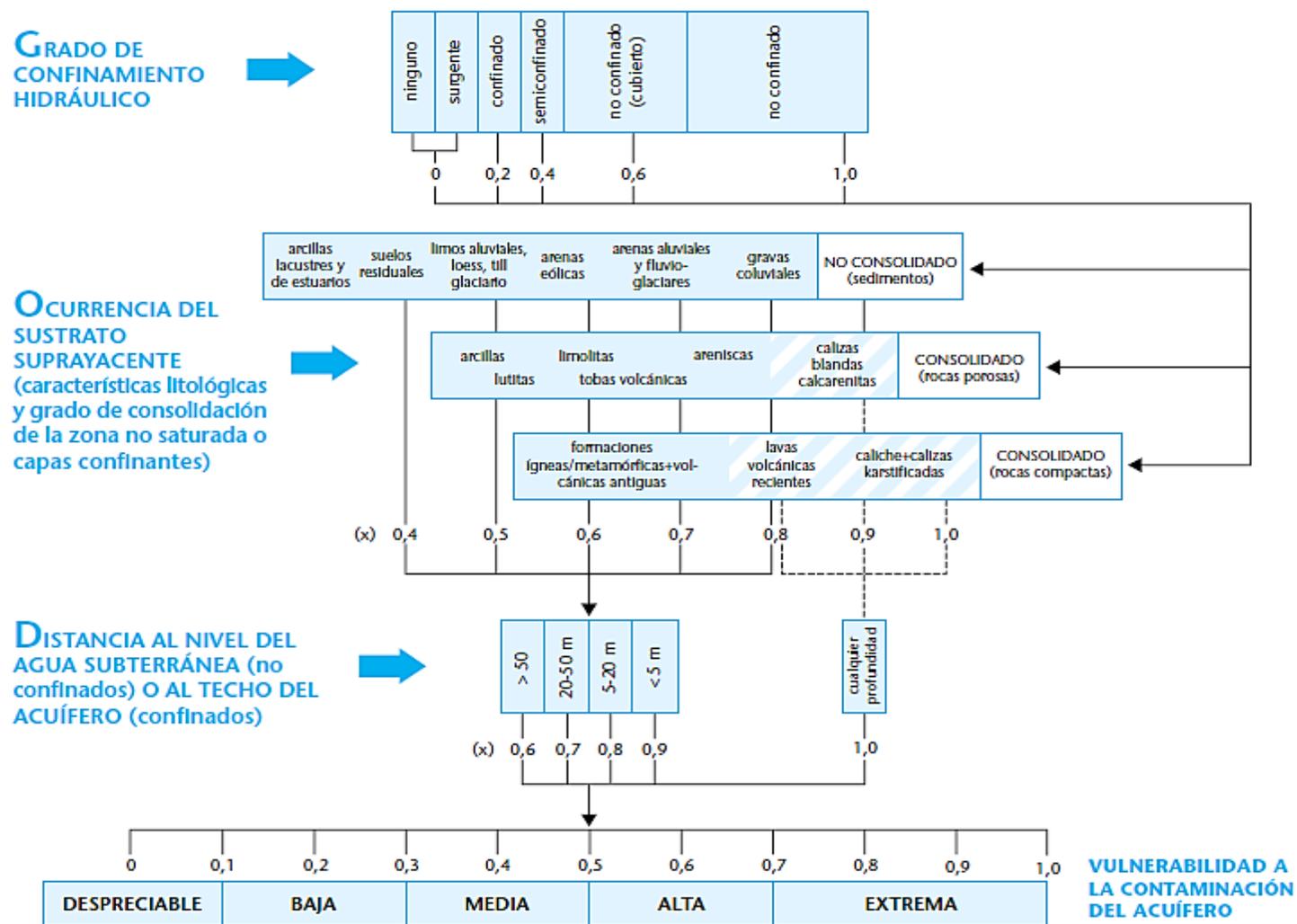
**ANEXO E.** Mapa de vulnerabilidad a la contaminación.

**ANEXO F.** Registros fotográficos.

**ANEXO A. Metodologías más comunes para cálculo de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.**

MÉTODOS	FACTORES	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD
**DRASTIC <sup>(7)</sup>	D: Profundidad del agua subterránea R: Recarga neta A: Litología del acuífero S: Tipo de suelo T: Topografía I: Impacto en el acuífero. Naturaleza de la zona no saturada C: Conductividad hidráulica del acuífero	$iV = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$ r: Factor de clasificación o valoración w: Factor de ponderación
*GOD <sup>(6)</sup>	G: Grado de confinamiento hidráulico. Hace referencia al tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea O: Litología de la zona no saturada. Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada. D: Profundidad del agua subterránea o del techo del acuífero confinado.	$iV = G \times O \times D$ Los parámetros G y O, pueden considerarse estables a lo largo del tiempo, mientras que el parámetro "D" es variable.
**SINTACS <sup>(8)</sup>	S: Profundidad del agua I: Recarga neta N: Zona no saturada T: Topografía A: Medio acuífero C: Conductividad hidráulica S: Suelo	$iV = (S_r \times S_w) + (I_r \times I_w) + (N_r \times N_w) + (T_r \times T_w) + (A_r \times A_w) + (C_r \times C_w) + (S_r \times S_w)$ r: Puntuación (1 – 10) w: Peso (1 – 5)
**EPIK <sup>1 (9)</sup>	E: Zona de intensa karstificación. P: Cobertura de protección I: Condiciones de infiltración K: Red kárstica.	$iV = (a \times E) + (b \times P) + (g \times I) + (d \times K)$ iV: factor de protección o índice de vulnerabilidad. E, P, I, K: puntuaciones de los parámetros a, b, g, d: factores de ponderación
**GALDIT <sup>(2)</sup>	G: Tipo de acuífero A: Conductividad hidráulica del acuífero L: Nivel del agua subterránea sobre el mar D: Distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa I: Impacto existente de la intrusión marina T: Espesor del acuífero	$iV = (W_1 \times G) + (W_2 \times A) + (W_3 \times L) + (W_4 \times D) + (W_5 \times I) + (W_6 \times T)$ W <sub>1</sub> a W <sub>6</sub> son pesos relativos asignados a los 6 factores.
<sup>1</sup> Método para estimar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos <sup>2</sup> Método aplicado para vulnerabilidad a la intrusión marina * Método de puntuación –RS. ** Método de puntuación y ponderación –PSCM..		iV = Índice de Vulnerabilidad

ANEXO B. Diagrama GOD para el cálculo del índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.



**ANEXO C.** Control del nivel freático mensual.

N°	Pozos identificados	Zona	Sectores indentificados	Corrdenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)
				E	N			Enero
1	P-1	Baja	Barrio Panamericana	393759	8245778	3825	0.80	0.54
2	P-2		Barrio Llamajahuira	393906	8245572	3823	0.80	0.52
3	P-3		Urbanización Aziruni I etapa	393968	8245338	3823	1.00	0.76
4	P-4		Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Najar	394199	8245472	3829	1.00	0.72
5	P-5		Urbanización Rosario Coñiri	394797	8245720	3819	1.20	0.85
6	P-6			395207	8245890	3818	1.10	0.93
7	P-7	Central	Urbanización Aziruni III etapa Ciudad Jardín	394496	8245411	3819	1.20	0.86
8	P-8			394344	8245111	3821	1.20	0.84
9	P-9		Barrio Central Santiago Apóstol	394361	8244968	3845	6.00	5.10
10	P-10		Barrio Santiago Aziruni	395124	8244570	3848	6.00	5.15
11	P-11		Barrio Salihuani	395442	8244225	3852	4.00	3.23
12	P-12			395723	8244077	3853	4.50	3.52
13	P-13		Barrio Inkapujhio Sasani	395811	8244034	3850	4.00	3.12
14	P-14		Barrio Turnui Miraflores	395958	8243967	3852	5.50	4.20
15	P-15			395917	8244058	3857	7.00	4.85
16	P-16		Alta	Barrio Santiago Vizcachani	396215	8244187	3854	6.00
17	P-17	395331			8244013	3895	7.50	5.10
18	P-18	Barrio Ecológico Yauruyo		395640	8243986	3881	6.00	4.95
19	P-19	Urbanización las Lomas Jayllihuaya		395834	8243664	3895	7.00	5.62
20	P-20	Barrio alto Jayllihuaya		396151	8243212	3961	8.00	5.85



N°	Pozos identificados	Zona	Sectores indentificados	Corrdenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)
				E	N			Febrero
1	P-1	Baja	Barrio Panamericana	393759	8245778	3825	0.80	0.32
2	P-2		Barrio Llamajahuira	393906	8245572	3823	0.80	0.30
3	P-3		Urbanización Aziruni I etapa	393968	8245338	3823	1.00	0.56
4	P-4		Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Najar	394199	8245472	3829	1.00	0.52
5	P-5		Urbanización Rosario Coñiri	394797	8245720	3819	1.20	0.68
6	P-6			395207	8245890	3818	1.10	0.77
7	P-7	Central	Urbanización Aziruni III etapa Ciudad Jardín	394496	8245411	3819	1.20	0.72
8	P-8			394344	8245111	3821	1.20	0.70
9	P-9		Barrio Central Santiago Apóstol	394361	8244968	3845	6.00	3.93
10	P-10		Barrio Santiago Aziruni	395124	8244570	3848	6.00	3.85
11	P-11		Barrio Salihuani	395442	8244225	3852	4.00	2.15
				395723	8244077	3853	4.50	2.10
13	P-13		Barrio Inkapujhio Sasani	395811	8244034	3850	4.00	1.95
14	P-14		Barrio Turnui Miraflores	395958	8243967	3852	5.50	2.32
				395917	8244058	3857	7.00	2.86
16	P-16		Alta	Barrio Santiago Vizcachani	396215	8244187	3854	6.00
17	P-17	395331			8244013	3895	7.50	4.26
18	P-18	Barrio Ecológico Yauruyo		395640	8243986	3881	6.00	4.54
19	P-19	Urbanización las Lomas Jayllihuaya		395834	8243664	3895	7.00	5.32
20	P-20	Barrio alto Jayllihuaya		396151	8243212	3961	8.00	5.22

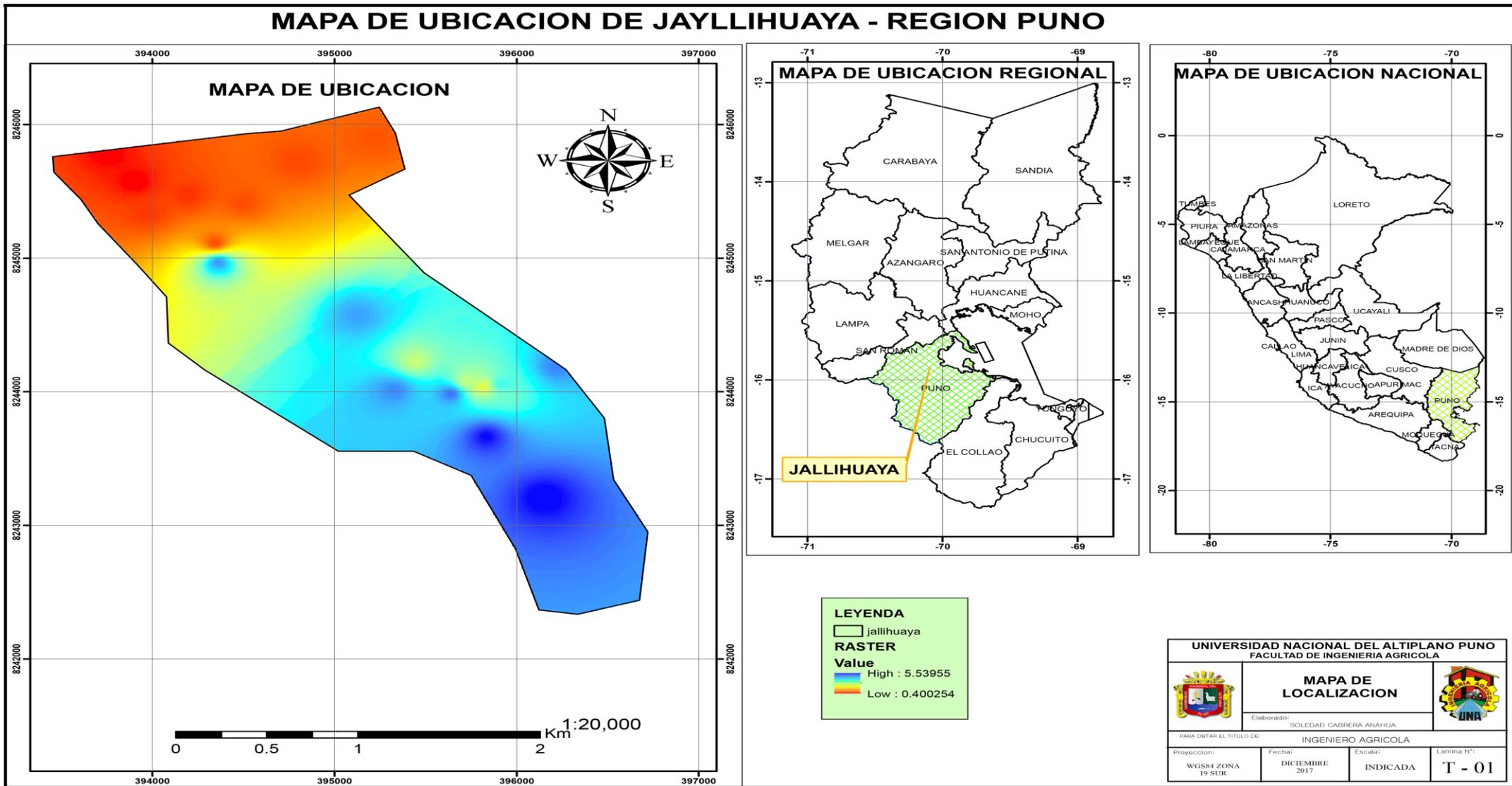


N°	Pozos identificados	Zona	Sectores indentificados	Corrdenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)
				E	N			Marzo
1	P-1	Baja	Barrio Panamericana	393759	8245778	3825	0.80	0.40
2	P-2		Barrio Llamajahuirra	393906	8245572	3823	0.80	0.38
3	P-3		Urbanización Aziruni I etapa	393968	8245338	3823	1.00	0.64
4	P-4		Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Najar	394199	8245472	3829	1.00	0.62
5	P-5		Urbanización Rosario Coñiri	394797	8245720	3819	1.20	0.73
6	P-6			395207	8245890	3818	1.10	0.84
7	P-7	Central	Urbanización Aziruni III etapa Ciudad Jardín	394496	8245411	3819	1.20	0.78
8	P-8			394344	8245111	3821	1.20	0.76
9	P-9		Barrio Central Santiago Apóstol	394361	8244968	3845	6.00	4.30
10	P-10		Barrio Santiago Aziruni	395124	8244570	3848	6.00	4.10
11	P-11		Barrio Salihuani	395442	8244225	3852	4.00	2.90
12	P-12			395723	8244077	3853	4.50	2.87
13	P-13		Barrio Inkapujhio Sasani	395811	8244034	3850	4.00	2.10
14	P-14		Barrio Turnui Miraflores	395958	8243967	3852	5.50	3.73
15	P-15			395917	8244058	3857	7.00	3.25
16	P-16		Alta	Barrio Santiago Vizcachani	396215	8244187	3854	6.00
17	P-17	395331			8244013	3895	7.50	4.26
18	P-18	Barrio Ecológico Yauruyo		395640	8243986	3881	6.00	4.54
19	P-19	Urbanización las Lomas Jayllihuaya		395834	8243664	3895	7.00	5.35
20	P-20	Barrio alto Jayllihuaya		396151	8243212	3961	8.00	5.54

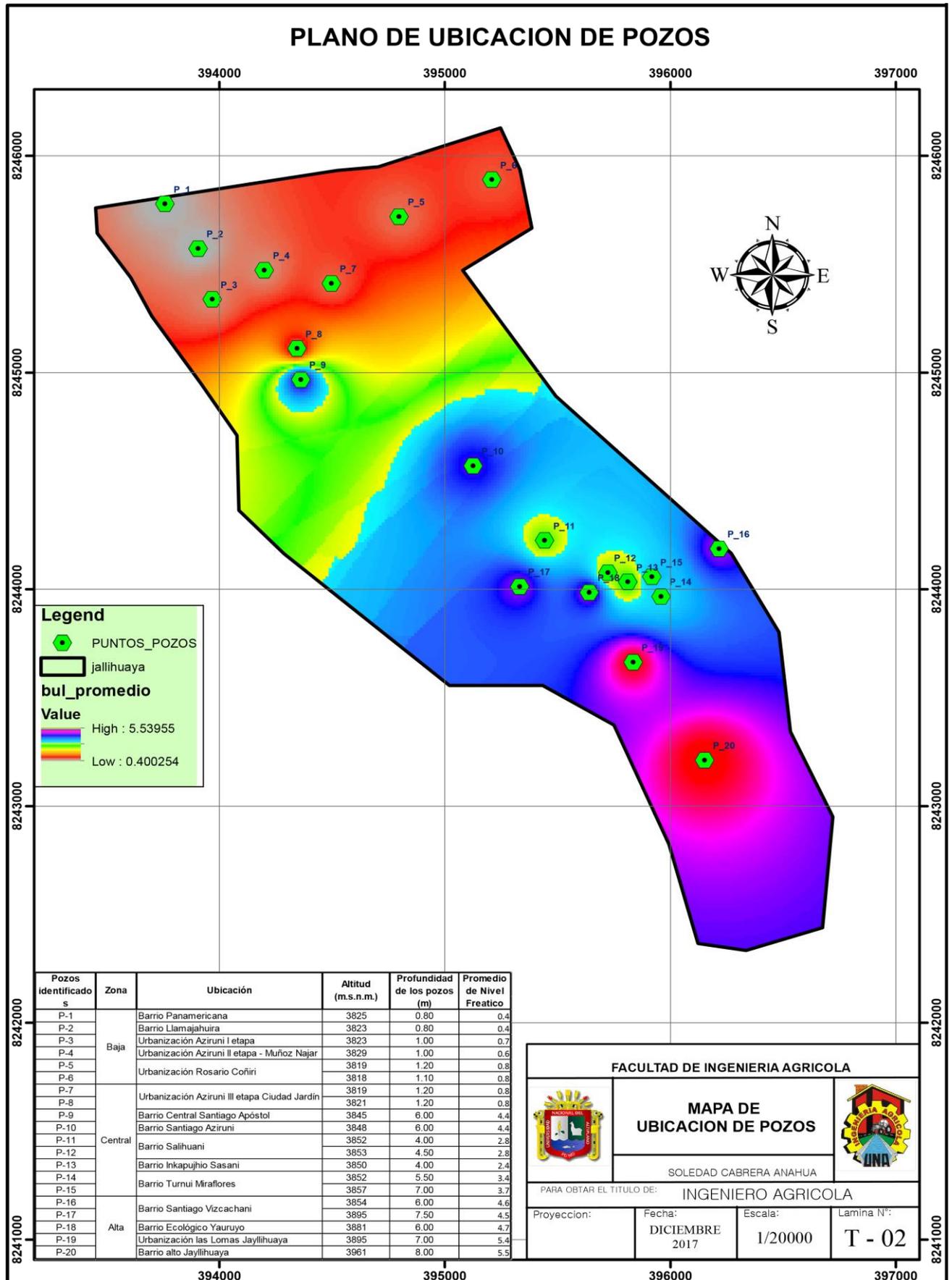


N°	Pozos identificados	Zona	Ubicación	Coordenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)			Nivel freático más bajo
				E	N			Enero	Febrero	Marzo	
1	P-1	Baja	Barrio Panamericana	393759	8245778	3825	0.80	0.54	0.32	0.40	0.32
2	P-2		Barrio Llamajhuira	393906	8245572	3823	0.80	0.52	0.30	0.38	0.30
3	P-3		Urbanización Aziruni I etapa	393968	8245338	3823	1.00	0.76	0.56	0.64	0.56
4	P-4		Urbanización Aziruni II etapa - Muñoz Na	394199	8245472	3829	1.00	0.72	0.52	0.62	0.52
5	P-5		Urbanización Rosario Coñiri	394797	8245720	3819	1.20	0.85	0.68	0.73	0.68
6	P-6			395207	8245890	3818	1.10	0.93	0.77	0.84	0.77
7	P-7	Central	Urbanización Aziruni III etapa Ciudad Jardín	394496	8245411	3819	1.20	0.86	0.72	0.78	0.72
8	P-8			394344	8245111	3821	1.20	0.84	0.70	0.76	0.70
9	P-9		Barrio Central Santiago Apóstol	394361	8244968	3845	6.00	5.10	3.93	4.30	3.93
10	P-10		Barrio Santiago Aziruni	395124	8244570	3848	6.00	5.15	3.85	4.10	3.85
11	P-11		Barrio Salihuani	395442	8244225	3852	4.00	3.23	2.15	2.90	2.15
				395723	8244077	3853	4.50	3.52	2.10	2.87	2.10
13	P-13		Barrio Inkapujhio Sasani	395811	8244034	3850	4.00	3.12	1.95	2.10	1.95
14	P-14		Barrio Turnui Miraflores	395958	8243967	3852	5.50	4.20	2.32	3.73	2.32
				395917	8244058	3857	7.00	4.85	2.86	3.25	2.86
16	P-16		Alta	Barrio Santiago Vizcachani	396215	8244187	3854	6.00	5.30	4.15	4.23
17	P-17	395331			8244013	3895	7.50	5.10	4.26	4.26	4.26
18	P-18	Barrio Ecológico Yauruyo		395640	8243986	3881	6.00	4.95	4.54	4.54	4.54
19	P-19	Urbanización las Lomas Jayllihuaya		395834	8243664	3895	7.00	5.62	5.32	5.35	5.32
20	P-20	Barrio alto Jayllihuaya		396151	8243212	3961	8.00	5.85	5.22	5.54	5.22

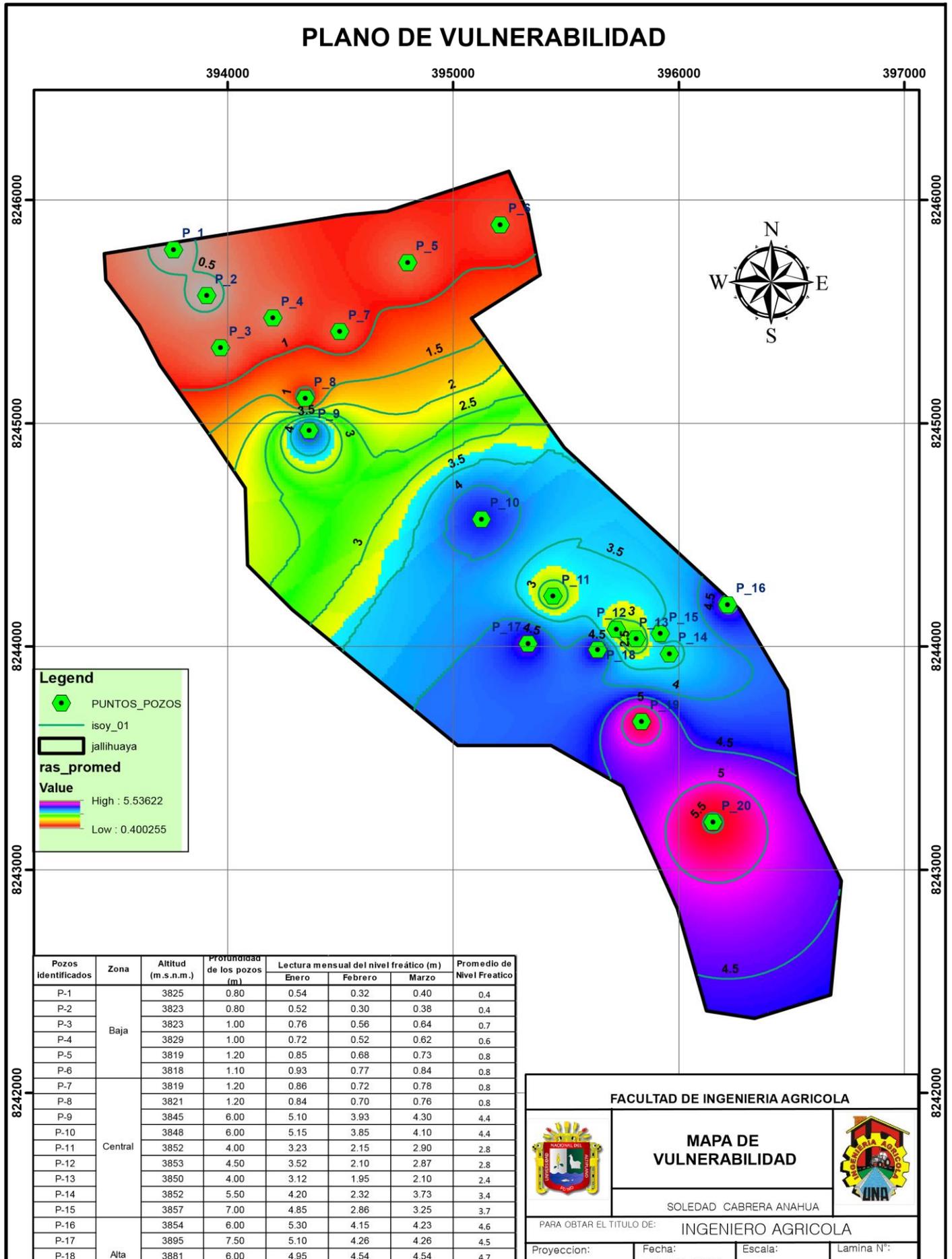
ANEXO C. Mapa de ubicación de la zona de estudio.



ANEXO D. Mapa de puntos de pozos analizados.



ANEXO E. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación.



**ANEXO I. Registros fotográficos.**



**Figura 1:** Inventariado de puntos de control.



**Figura 2:** Pozo abandonado.



**Figura 3:** Control del nivel freatico.



**Figura 4:** Control del nivel freatico zona central.



**Figura 5:** Control del nivel freatico zona central.



**Figura 6:** Control del nivel freatico zona alta.