

## **CAPÍTULO I**

### **1. GENERALIDADES**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Los recursos hídricos del subsuelo de Tarija fueron explotados a partir de los años 70, el sistema de agua subterránea de la ciudad de Tarija forma parte del abastecimiento de la población, esta es supervisada y distribuida a través de la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija (COSAALT R.L.).

Mediante los estudios realizados por distintas cooperaciones como es la Cooperación Alemana (GIZ) el Programa para Servicios Sostenibles de Agua Potable y Saneamiento en Áreas Periurbanas (GIZ/PERIAGUA) que involucran a las aguas subterráneas, de esta manera nace la necesidad de poder conocer la forma en que como responde el medio geológico, que protege al acuífero en el centro poblado de la ciudad de Tarija y es por ello que se plantea la realización de la determinación del grado de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas.

Una primera metodología que por su acrónimo en inglés se denomina: G (Confinamiento hidráulico de aguas subterráneas) O (litología de los estratos de la zona no saturada) D (profundidad al nivel freático) (GOD), un segundo que también por su acrónimo en inglés se denomina: D (Profundidad al agua) R (Recarga) A (Medios acuíferos) S (Medios del suelo) T (Topografía) I (Impacto de la zona vadosa) C (Conductividad del acuífero) (DRASTIC).

El método GOD se caracteriza por mostrar una primera aproximación a las condiciones de vulnerabilidad en el acuífero de estudio o en zonas de escasa información, debido a que se tienen en cuenta solo tres variables (Confinamiento del acuífero, profundidad del agua subterránea y tipo de litología del acuífero), el método DRASTIC es utilizado para asignar de manera simple y estandarizada la susceptibilidad de ciertas áreas a la contaminación, bajo ciertas condiciones, es una metodología que toma más parámetros en cuenta.

Los métodos de Índice de Vulnerabilidad de los Acuíferos (AVI) y basada en la Profundidad de la superficie freática y la Permeabilidad vertical de la zona subsaturada ( $E_{kv}$ ) son metodologías más recientes que consideran de gran manera las características del suelo.

COSAALT R.L. que trabaja con estos recursos hídricos cuenta con información de los pozos en conjunto a esto se suma proyectos de fin de grado de la U.A.J.M.S, estos aportarán al estudio

para calcular el grado de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la ciudad, determinando zonas de mayor riesgo para la protección de las aguas subterráneas, de esa manera poder ayudar a analizar una gestión sostenible de estos recursos hídricos.

Una manera de solucionar los problemas de la contaminación a las aguas subterráneas que también puede entenderse como una acción de mitigación es proponer perímetros de protección a las fuentes de abastecimientos ya que estos se relacionan de manera directa con la zona saturada (acuífero).

Este recurso que se encuentra en el subsuelo es de gran importancia para numerosos países de Europa (Alemania, Francia, Reino Unido, Holanda, Dinamarca, Estados Unidos y Australia entre otros muchos), los resultados tras delimitar perímetros de protección a las captaciones lo califican de una manera eficaz y adecuada en base al respeto y compromiso de cuidar este recurso.

Las metodologías que se aplicarán son el método de Wyssling y Radio fijo calculado (Función del tiempo de tránsito), relacionados por tener los mismos parámetros caudal de bombeo, tiempo de tránsito, espesor del acuífero, porosidad eficaz y permeabilidad. Consecuentemente poder visualizar las zonas más vulnerables y perímetros con los datos aproximados que se tiene de la zona, podremos analizar las actividades económicas, industriales que puedan llegar a ser amenazantes.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Nace la necesidad de poder analizar en la situación que nos encontramos hoy en día sobre qué tan susceptible es este recurso de aguas subterráneas en la ciudad de Tarija, insistiendo que los acuíferos que son parte de la ciudad son fundamentales para la disponibilidad de agua para dar respuesta a la demanda impuesta por la sociedad que va creciendo de una manera exponencial. Si no tenemos una vista previa de la situación se corre el riesgo de que se convierta en una preocupación más adelante.

La mejor manera de protección del sistema hidrogeológico es la prevención, las zonas donde están las fuentes de abastecimiento (pozos) es donde se corre el riesgo de que el sistema sea más vulnerable porque están en contacto directo con la zona saturada que reflejan el comportamiento del acuífero, así también las zonas de recarga de las aguas subterráneas es una zona de gran

representación donde se puede ver afectada por los asentamientos humanos o siendo utilizadas para la agricultura (mencionado por Foster, S. Hirata, R. et al 2003).

### **1.3. HIPÓTESIS**

El estudio de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas determinara las zonas de mayor riesgo de contaminación de la ciudad de Tarija, como también definir perímetros de protección de los pozos.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar el grado de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la ciudad de Tarija a través de sus propiedades intrínsecas y definir perímetros de protección para los pozos dentro de la concesión de COSAALT R.L.

#### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ❖ Calcular el grado de vulnerabilidad mediante los métodos: GOD y DRASTIC.
- ❖ Probar y analizar las metodologías AVI y Ekv, utilizando datos representativos de estudios realizados en la ciudad de Tarija.
- ❖ Caracterizar una zonificación de la ciudad de Tarija en base al sistema acuífero que presenta mediante las condiciones geológicas e hidrogeológicas presentes en el área de estudio, a través de información primaria y secundaria existente, relacionada con estudios de investigación que realizaron en la ciudad de Tarija.
- ❖ Crear mapas de vulnerabilidad con los métodos mencionados para el área de estudio, elaborados con el programa ArcGis.
- ❖ Calcular perímetros de protección para las captaciones con datos proporcionados por la institución de COSAALT R.L. mediante los métodos de Método de Wyssling y Radio fijo calculado (Función del tiempo de tránsito).

### **1.5. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA**

Actualmente en la ciudad de Tarija se consume alrededor de dieciséis millones de metros cúbicos de agua potable al año, la ciudad cuenta con un sistema de agua mixto conformadas por aguas superficiales y subterráneas donde el 60% se capta del rincón de la Victoria y el 40% de fuentes de abastecimiento (pozos), a medida que las aguas superficiales van disminuyendo su caudal en la época de estiaje aumenta la explotación de aguas subterráneas convirtiéndose en una fuente indispensable en dicha temporada del año para el abastecimiento de la ciudad.

No existe estudios de vulnerabilidad acuífera, por lo cual se desconoce su situación de vulnerabilidad, en este trabajo se busca identificar las zonas donde exista la mayor susceptibilidad a la contaminación de este recurso hídrico, para establecer zonas presentes y potenciales de riesgo en el sistema hidrogeológico.

Los resultados de la investigación darán información útil para tomar medidas preventivas como perímetros de protección en los sitios potenciales de riesgo como los pozos o áreas de recarga donde puede ser afectado por factores naturales o antropogénicos.

## **1.6. LIMITACIÓN DEL ESTUDIO**

Considerando que este trabajo se está realizando con información proporcionada por la entidad de COSAALT R.L. siendo así nuestra área de estudio el centro poblado de la ciudad de Tarija donde se encuentran las fuentes de abastecimiento (pozos) bajo la concesión de la dicha entidad.

También se debe resaltar que una parte de la información será proporcionada por estudios ya realizados los que contribuirán al análisis de la determinación de algunos parámetros para los métodos, con la información actualizada.

Considerando que no se tiene datos hidrogeológicos puntuales para cada pozo, tanto para la determinación del grado de vulnerabilidad y perímetros de protección estos serán representativos para una zona, también se relacionara ciertos parámetros con otros en base a otras tablas.

## **1.7. ALCANCE DEL ESTUDIO**

Para el desarrollo del trabajo en su primera parte se tomará más énfasis en los métodos GOD y DRASTIC para hallar el grado de vulnerabilidad ya que son metodologías más utilizadas.

Los dos métodos restantes AVI y Ekv son nuevas metodologías propuestas que están más relacionadas con la atenuación natural del suelo por lo que se desarrollaran para ver los resultados que arroja en base a la información que se tiene.

Continuando se aplicarán los métodos de Wyssling y Radio fijo calculado los perímetros de protección, se considerarán criterios propuestos por países que son precursores en estas metodologías. Se elaborarán mapas de vulnerabilidad del centro poblado de Tarija a través de un sistema de información geográfico para identificar las áreas más sensibles al peligro de contaminación de la ciudad, los resultados de los perímetros de protección darán la facilidad para obtener vistas satelitales que serán muy útiles para su posterior análisis.

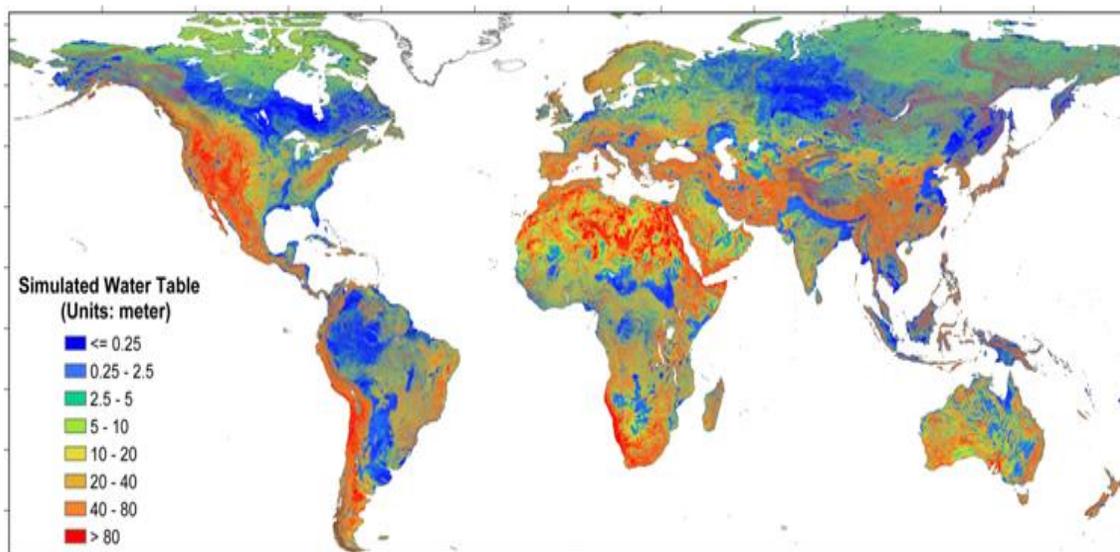
## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES

Los problemas del agua subterránea que subyacen bajo este enfoque son los relacionados con el almacenamiento. Los aspectos relacionados con el suministro de agua siguen siendo importantes y serán tratados con la atención que merecen. Sin embargo, el agua subterránea es más que un recurso.

Es un componente fundamental del medio ambiente y, como tal, está relacionado con problemas ambientales, así como con sus soluciones. El agua subterránea es parte del ciclo hidrológico y la comprensión de su rol es esencial para el estudio integral de cuencas hidrográficas y la evaluación regional de contaminación ambiental (Freez, A. y Cherry, J. 1979<sup>1</sup>)



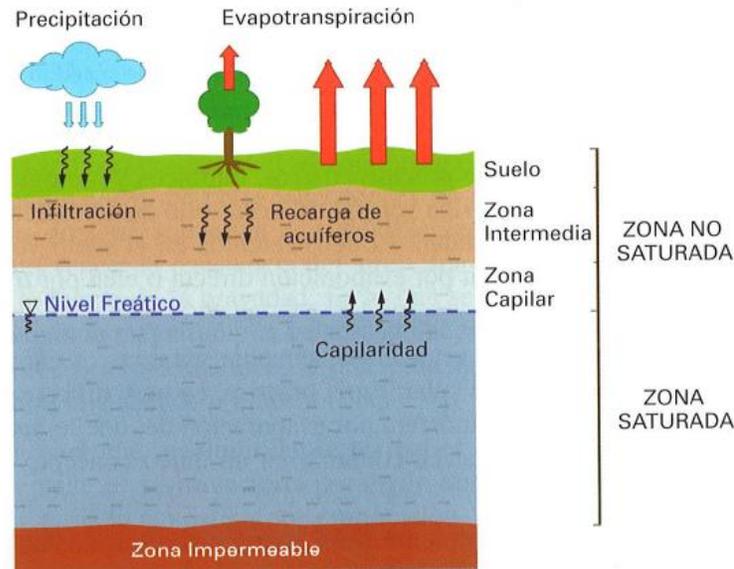
*Figura 2.1. Mapa global de las aguas subterráneas poco profundas.*

*Fuente: Salas Javier. 2013.*

#### 2.2. EL AGUA SUBTERRÁNEA Y PROCESOS GEOLÓGICOS

Hidrología subterránea es aquella parte de la hidrología que corresponde al almacenamiento y circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico, y sus reacciones de la acción del hombre. (Custodio, M. y Llamas, M. R. 1976. pg. 249).

<sup>1</sup> Disponible: <http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-toc/>.



**Figura 2.2. Zonas en el subsuelo según el comportamiento de agua que se infiltra.**  
**Fuente:** Martínez Pedro E.; Martínez Pablo. y Castaño, S. 2006

La mayoría de las necesidades de agua subterránea de las personas se satisfacen con agua obtenida a partir de este rango de profundidad. Sin embargo, además de satisfacer esta necesidad, el agua subterránea impulsada por la gravedad también genera y afecta una amplia variedad de procesos naturales económicamente importantes en o debajo de la superficie terrestre.

Es de importancia tanto económica como ambiental, por lo tanto, comprender las propiedades, factores de control, efectos y manifestaciones de este tipo de flujo, así como desarrollar métodos y técnicas para su estudio y posible modificación (Tóth, J. 2009. pg. 3).

Los problemas del agua subterránea que subyacen bajo este enfoque son los relacionados con el almacenamiento. Los aspectos relacionados con el suministro de agua siguen siendo importantes y serán tratados con la atención que merecen. Sin embargo, el agua subterránea es más que un recurso. Es un componente fundamental del medio ambiente y, como tal, está relacionado con problemas ambientales, así como con sus soluciones.

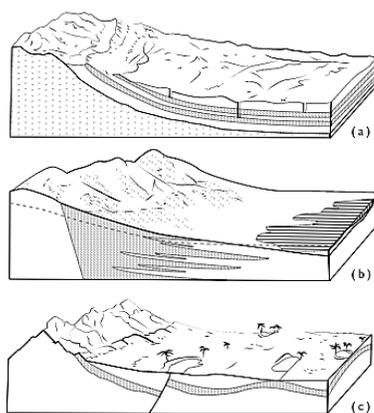
El agua subterránea es parte del ciclo hidrológico y la comprensión de su rol es esencial para el estudio integral de cuencas hidrográficas y la evaluación regional de contaminación ambiental. Desde el punto de vista de la ingeniería, el agua subterránea tiene incidencia en problemas geotécnicos como la estabilización de taludes y la subsidencia. Así mismo, el agua subterránea es clave para la comprensión de una amplia variedad de procesos geológicos, entre los que se

encuentran el origen de sismos, la migración y acumulación de petróleo, y la génesis de ciertos depósitos minerales, tipos de suelos y geoformas. (Freez, A. y Cherry, J. 1979)

### 2.2.1. Litología, estratigrafía y estructura

La naturaleza y distribución de acuíferos y acuitardos en un sistema geológico están controlados por la litología, estratigrafía, y la estructura de los depósitos y formaciones geológicas. La litología es el componente físico, incluyendo la composición mineral, tamaño y distribución de grano de los sedimentos o las rocas que componen los sistemas geológicos.

La estratigrafía describe las relaciones geométricas y la edad entre los lentes, lechos, y formaciones de los sistemas geológicos de origen sedimentario. Las características estructurales, tales como fisuras, fracturas, pliegues y fallas representan las propiedades geométricas de los sistemas geológicos producidos por la deformación después de la deposición o cristalización. En depósitos no consolidados, la litología y estratigrafía constituyen los controles más importantes. En la mayoría de las regiones el conocimiento de la litología, estratigrafía, y estructura conduce directamente a la comprensión de la distribución de acuíferos y acuitardos. (Freez, A. y Cherry, J. 1979)



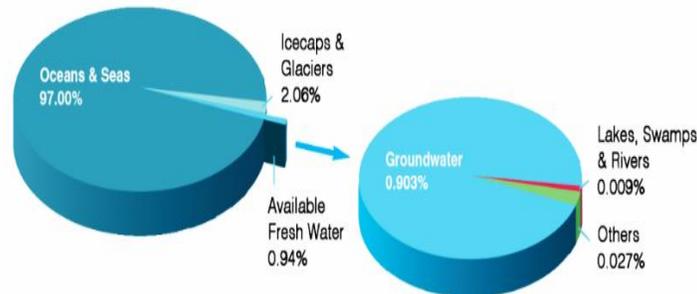
*Figura 2.3. Influencia de la estratigrafía y estructura en la formación de un acuífero regional. (a) Acuíferos de arenisca con buzamiento; (b) interdigitación de los acuíferos de arena y grava; (c) acuífero formado por fallas y plegamientos en una región desértica*

*Fuente: Freez A. y Cherry J. 1979.*

### 2.2.2. Importancia de las aguas subterráneas.

El agua subterránea representa alrededor del 30% del agua dulce del mundo. De los 70% restantes, casi 69% es capturado en las capas de hielo y nieves glaciares en las montañas, y solo un 1% se encuentra en ríos y lagos. El agua subterránea corresponde en promedio

a una tercera parte del agua fresca consumida por la humanidad, pero en algunas partes del mundo este porcentaje llega hasta el 100%. En la figura 2.4 se muestra una visión general de la distribución del agua a nivel mundial.



**Figura 2.4. Distribución del agua a nivel mundial**  
**Fuente: IGRAC. 2015.**

El agua subterránea es un recurso muy importante y tiene un rol significativo en la economía. Es el recurso hídrico más importante para el riego y la industria de alimentos. En general, el agua subterránea es un recurso hídrico confiable para la agricultura, que además se puede ocupar de una manera flexible; por ejemplo, cuando hay una temporada seca y una mayor necesidad de agua, se puede complementar el uso de agua superficial extrayendo más agua subterránea.

Al nivel mundial, el agua para riego constituye el 70% del total de agua extraída (considerando agua superficial y subterránea). Del total de agua que se ocupa para riego, 43% corresponde a agua subterránea.

El agua subterránea juega un rol muy importante para el medio ambiente, manteniendo el flujo y nivel de agua en ríos, lagos y humedales. Especialmente en los meses secos cuando se registran pocas lluvias, el agua subterránea mantiene el flujo en el fondo de estos cuerpos de agua, el cual es esencial para los animales y plantas que viven en estas áreas. El agua subterránea también es muy importante para mantener la navegación en aguas superficiales terrestres en la época seca: la descarga de agua subterránea en los ríos ayuda a mantener los niveles de agua más altos.

El agua subterránea se encuentra en casi todas partes y su calidad es en general muy buena. El hecho de que el agua subterránea está almacenada bajo tierra, y a veces muy profundamente, ayuda a que no se contamine y conserve su calidad. Adicionalmente, el

agua subterránea es un recurso natural que se encuentra muchas veces cerca de los consumidores finales y por lo tanto no se necesitan grandes inversiones en términos de infraestructura, tratamiento y transporte, lo cual no siempre es el caso con el agua superficial. Lo más importante acerca del uso de agua subterránea es encontrar el equilibrio entre extraer agua y dejar que el nivel del acuífero se recupere, para evitar la sobre explotación y la contaminación de este recurso fundamental.

Pese a no ser apenas visibles, las aguas subterráneas son fundamentales en el ciclo hidrológico, en superficie se manifiestan en forma de ríos, lagos y humedales pudiendo existir una transferencia de flujo entre el agua subterránea y superficial (IGRAC, 2015).

Se espera que la población mundial siga creciendo de manera exponencial, pasando de casi 8 mil millones en 2020 a alcanzar los 11 mil millones para 2100. Este es el gran reto al que nos enfrentamos como humanidad, poder producir alimentos sin comprometer el agua disponible. La gestión sostenible de las aguas subterráneas será clave para lograrlo. (Santafé, M. 2021<sup>2</sup>.)

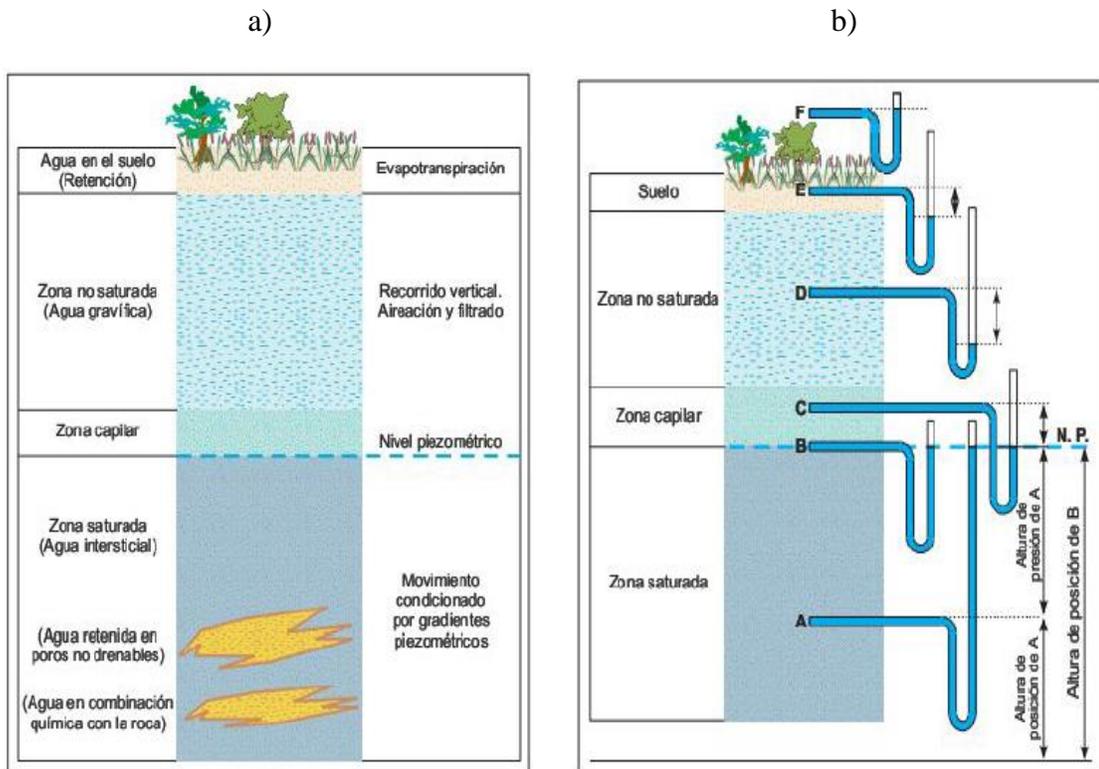
No existen datos completos acerca de la proporción de los abastecimientos de agua municipal y doméstica que proviene del recurso hídrico subterráneo. Tampoco existe información confiable sobre la proporción de todos los abastecimientos de agua, para cualquier propósito, derivados de recurso hídrico subterráneo. Así, para ilustrar el rol clave de la que juegan las aguas subterráneas en el abastecimiento de agua potable en América Latina y el Caribe, se tiene que recurrir a estimaciones cualitativas y ejemplos específicos. (Foster, S. y Hirata, R., 1991 Pg. (v))

### **2.2.3. Dinámica del agua subterránea.**

En el suelo y el subsuelo existen varias zonas donde el movimiento del agua tiene características propias y leyes particulares. Se pueden distinguir cuatro zonas: suelo, zona no saturada, zona capilar y zona saturada.

---

<sup>2</sup> Disponible: <https://www.iagua.es/blogs/marta-santafe/gestion-sostenible-aguas-subterranas-y-papel-agenda-2030>.



**Figura 2.5. a) Perfiles y movimiento del agua en suelo y subsuelo, b) Niveles piezómetros en el suelo subsuelo.**

*Fuente: González L.; Ferrer M.; Ortuño L. y Oteo, C. (2002)*

- **Movimiento del agua en el suelo.**

En la parte más superficial de las formaciones acuíferas, y en contacto con la atmosfera, se encuentran una zona húmeda, según estaciones, caracterizada en general por su alta porosidad y abundancia de materia orgánica. Es comúnmente conocida por suelo y en ella el movimiento del agua está caracterizada por los fenómenos de almacenamiento, evaporación y transpiración. El suelo puede almacenar una cantidad de agua o reserva de agua almacenada por las plantas que depende de capacidad de campo (humedad máxima que puede almacenar), punto de marchitez permanente (humedad mínima necesaria para que las plantas puedan vivir).

- **Movimiento del agua en la zona no saturada.**

El movimiento del agua en la zona no saturada es gravífico, y por tanto vertical descendente. En realidad, aunque su componente, pero, a grandes rasgos, debe ser asumido el movimiento del agua como vertical descendente. También en esta

zona existe absorción, y debido a presiones negativas el nivel piezómetro es inferior a la altura de posición.

- **Movimiento del agua en la franja capilar.**

Es una zona de transición entre las zonas no saturada y saturada debida a la absorción de la parte de formación acuífera situada inmediatamente encima de la zona saturada. En la parte superior de la franja capilar de las bolsas de aire pueden constituir un freno al movimiento descendente, mientras que en la parte inferior el movimiento del agua es muy similar al del agua en la zona saturada. Debido a la absorción, el nivel piezómetro es inferior a la altura de posición.

- **Movimiento del agua en la zona saturada, isopiezas.**

Es la zona inferior donde el agua saturada totalmente los poros del acuífero: en esta zona, el nivel piezómetro nunca es inferior a la altura de posición. En la parte más alta, junto a la franja capilar, el nivel piezómetro o la altura de posición son coincidencias y nula la altura de presión. A medida que se desciende en la zona saturada, el nivel piezómetro se mantiene, pero las pérdidas de la altura de posición se compensan con el incremento de altura de presión. Estas precisiones son válidas asumiendo la no existencia de flujos verticales en la formación (González, L. et al., 2002. pg. 268 - 270).

### 2.3. ACUÍFERO

En la hidrogeología subterránea, 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 (Custodio, M. y Llamas, M. R. 1976. pg. 259).

Así, cabe indicar que existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir agua; desde el punto de vista hidrogeológico estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales:

*Tabla 2.1. Formaciones geológicas frente al agua.*

	Capacidad de almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transmitir	Formaciones características
ACUIFEROS	ALTA	ALTA	ALTA	Gravas, arenas, calizas.

ACUITARDOS	ALTA	MEDIA/BAJA	BAJA	Limos, arenas limosas y arcillosas
ACUICLUDO	ALTA	MUY BAJA	NULA	Arcillas
ACUIFUGOS	NULA	NULA	NULA	Granitos, gneisis, marmoles.

*Fuente: González L.; Ferrer M.; Ortuño, L. y Oteo, C. (2002)*

- **Acuíferos:** Capaces de almacenar y transmitir al agua (gravas, arenas, materiales calizos, etc.); son formaciones con capacidad de drenaje alta en las que se pueden perforar pozos y sondeos con el fin de satisfacer las necesidades humanas del abastecimiento, agricultura, industria, ganadería, etc.
- **Acuitardos:** Capaces de almacenar el agua cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arena limosa, arena arcillosa, etc.) y su capacidad de drenaje es de media a baja; no son de interés para la obtención de caudales que pueden servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel importante como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.
- **Acuicludos:** Pueden almacenar agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de formación y no pueden ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.); en hidrogeología clásica, se asumen como impermeables, pero en ingeniería geológica este concepto se hace menos preciso, pues drenajes muy limitados pueden presentar problemas en determinadas obras.
- **Acuífugos:** Formaciones incapaces de almacenar el agua; están representados por las rocas compactadas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactadas sin justificar; se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos. (González, L. et al., 2002. pg. 264)

### 2.3.1. Clasificación de los sistemas de acuíferos

Los acuíferos pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios:

#### 2.3.1.1. Según las características litológicas

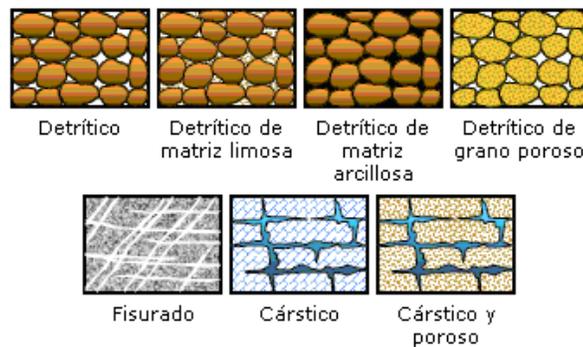
- **Acuíferos detríticos:** Son acuíferos de rocas o sedimentos detríticos. Su permeabilidad se debe a la porosidad intergranular (de tipo primario).

Si las rocas están parcialmente consolidadas o cementadas, la porosidad puede ser además de tipo secundario, por fisuración, disolución. Son todos los materiales con tamaño de grano de arena: arenas, arcosas, areniscas, gravas, conglomerados, etc.

- **Acuíferos fisurados y/o kársticos:** Se corresponden con acuíferos en rocas carbonatadas (calizas/dolomías) o bien otro tipo de rocas que presenten diaclasado, fracturación y/o disolución (rocas ígneas, metamórficas, detríticas bien consolidadas).

Poseen permeabilidad debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución. Se encuentran entre las calizas, dolomías, yesos, granitos, basaltos..., siendo los dos primeros los tipos más importantes.

- **Acuíferos mixtos:** Su porosidad se debe a un conjunto de todas las anteriores causas. Un ejemplo pueden ser las arenas calcáreas o calcarenitas (Hispagua, 2021<sup>3</sup>).



*Figura 2.6. Tipos de acuíferos según las características litológicas.  
Fuente: Hispagua 2021*

### 2.3.1.2. Según las presiones hidrostáticas.

- **Acuíferos libres:** También llamados no confinados o freáticos. Entre ellos existe una superficie libre y real del agua almacenada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada. La superficie hasta donde llega el

<sup>3</sup> Disponible: <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia#2>.

agua, se denomina superficie freática; cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla de nivel freático en ese punto.

- **Acuíferos confinados:** También llamados cautivos, a presión en carga: en ellos el agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Si se extrae agua de él, ningún poro se vacía, sólo disminuye la presión del agua. Al disminuir la presión, pueden llegar a producirse asentamientos y subsidencias del terreno. En ellos no existe zona no saturada.

En el caso de que se perforase este tipo de acuíferos, el nivel de agua ascendería hasta situarse en una determinada posición que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga; a este nivel se le conoce con el nombre de nivel piezométrico. Si unimos todos los niveles piezométricos, obtendremos la superficie piezométrica (superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero).

- **Acuíferos semiconfinados:** Son más frecuentes que los acuíferos confinados, pudiendo afirmar que se trata de acuíferos a presión, pero en algunas de las capas confinantes son semipermeables, acuitados.
- **Acuíferos colgados:** Se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.
- **Acuíferos multicapas:** Son un caso particular (y frecuente) de acuíferos en los que se suceden niveles de distinta permeabilidad (Hispagua, 2021).

## 2.4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS ACUÍFEROS

### ➤ Permeabilidad (K)

La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Dentro de este concepto pueden definirse otros dos:

- Permeabilidad ligada tanto a las características textuales del medio físico como el fluido que transmiten denominada **permeabilidad efectiva** o **conductividad hidráulica** representada por el coeficiente de permeabilidad, (K).
- La denominada **permeabilidad intrínseca (k)**, que solo depende de las características internas del medio permeable.

La permeabilidad efectiva (K) se define con la con el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario. Depende, en consecuencia, tanto de las características del medio físico (acuífero), como de las del fluido que atraviesa (agua).

Por razones de su definición (caudal por unidad de superficie), las dimensiones de la permeabilidad efectiva pueden establecerse:

$$k = \frac{L^3 T^{-1}}{L^2} = LT^{-1}$$

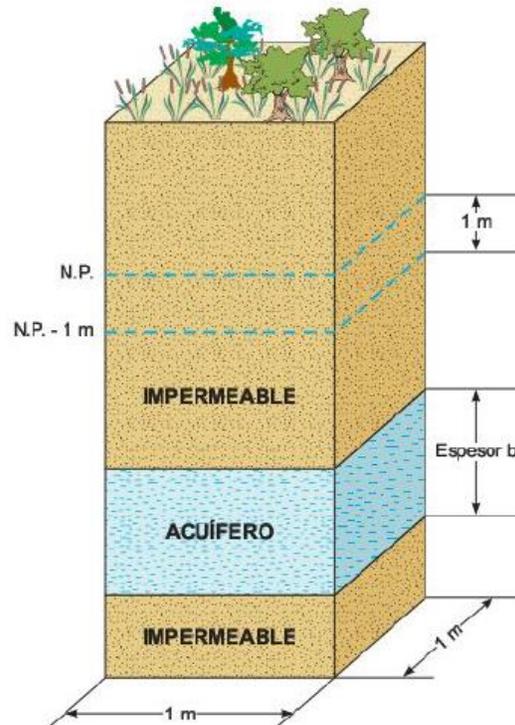
Se usa cm/s y m/d como unidades más habituales m/d suele utilizarse en hidrogeología con carácter prácticamente general), y cm/s en ingeniería. La permeabilidad intrínseca y la permeabilidad efectiva se relacionan únicamente por los parámetros capaces de definir las características del flujo (González, L. et al., 2002. pg. 273-274).

#### ➤ **Coefficiente de almacenamiento (S)**

Este coeficiente representa la capacidad para liberar agua de un acuífero. Se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de base unitaria y de altura del acuífero, cuando desciende un metro de nivel piezométrico. Es, en consecuencia, un parámetro físico referido al volumen cedido por unidad de volumen del acuífero y, al agua que la porosidad, es adimensional.

La forma en que las formaciones geológicas permeables liberan agua es distinta según su situación en la naturaleza y el estado de sus niveles piezométricos.

Así cabe distinguir formaciones o acuíferos en funcionamiento confinado o acuíferos en funcionamiento libre.



**Figura 2.7. Esquema para el cálculo del coeficiente de almacenamiento por liberación elástica**  
*Fuente: González, L. et al., 2002.*

Los acuíferos confinados (figura 2.7) se encuentran estructuralmente situados entre capas impermeables, estando el nivel piezométrico por encima de la cota del techo del material permeable. En el techo del acuífero la presión es superior a la atmosfera, y ello implica que, si un sondeo comunica la superficie con un acuífero, el nivel del agua suba por dicho sondeo hasta el punto de equilibrio, donde quedará situado el nivel piezométrico, suma de las alturas de posición y presión.

Un descenso en el nivel piezométrico del acuífero, sin llegar al techo del mismo, trae como consecuencia una variación del estado de presiones en el medio físico, que se traduce en la liberación elástica del agua.

Al descender el nivel son dos cambios que se producen:

- Al bajar la presión a que está sometida el agua, ésta tiende a expandirse.
- A bajar la presión interna a que está sometido el acuífero por el agua está tiende a descomprimirse.

En los acuíferos confinados, en definitiva, el agua se libera por mecanismos elásticos debidos al efecto conjunto de la expansión del agua y a la descompresión vertical de la estructura granular.

El coeficiente de almacenamiento de un acuífero confinado o coeficiente de almacenamiento por liberación elástica (S), podría deducirse a grandes rasgos considerando los volúmenes del agua liberados en estos dos fenómenos. Según la figura 2.7 (un prisma de base unitaria), al descender 1 m del nivel piezométrico se libera una cantidad de agua equivalente al coeficiente almacenamiento por liberación elástica.

En los acuíferos libres, al descender el nivel se producen los mismos fenómenos de liberación elástica, pero al agua liberada por este concepto hay que añadir el agua vaciada existente en los poros, es decir, el agua desaturada al vaciar una altura de 1 m en un prisma de acuífero de base unitaria. Este último valor es coincidente con la porosidad eficaz. Por tanto, llamamos (S') el coeficiente de almacenamiento de un acuífero funcionando como libre, se tiene:

$$S' = S + n_e$$

Siendo, lógicamente, adimensional.

El coeficiente de almacenamiento por liberación elástica (S) es muy pequeño en relación con el coeficiente de almacenamiento por desaturación o porosidad eficaz, por ello se suele asumir, sin cometer errores significativos, que:

$$S' = n_e$$

En definitiva, el coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres es coincidente con la porosidad eficaz ( $n_e$ ) o coeficiente almacenamiento por desaturación (González, L. et al., 2002. pg. 272-273).

#### ➤ **Transmisividad (T)**

La transmisividad es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, teniendo en cuenta no solo la textura del acuífero y las características del fluido, sino también las características estructurales o geométricas. Se define como el producto:

$$T = Kb$$

Donde:

T= Transmisividad [ $L^2 \cdot T^{-1}$ ].

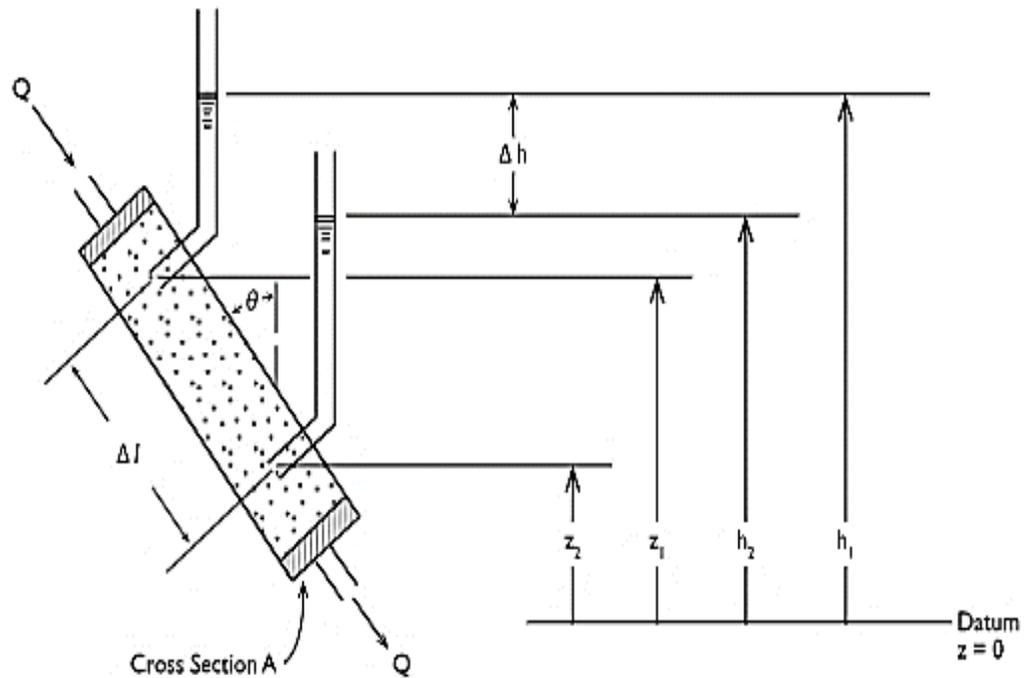
$K$ = Conductividad hidráulica [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$b$ = Espesor del acuífero [ $L$ ].

Acuíferos muy permeables, pero de bajo espesor pueden, a pesar de sus excelentes características texturales, no ser aptos para una eficaz transmisión de agua debido a su bajo espesor y, consecuentemente, baja transmisividad (González, L. et al., 2002. pg. 274).

➤ **Ley de Darcy**

Consideremos un aparato experimental como se muestra en la figura 2.8. Un cilindro circular de sección transversal  $A$ , está lleno con arena, cerrado herméticamente en cada extremo, e equipado con tubos de entrada y salida y un par de manómetros. Se introduce agua dentro del cilindro y se permite que fluya a través de él hasta el momento en que todos los poros están saturados con agua y el flujo de entrada ( $Q$ ) es igual al flujo de salida. Si establecemos un nivel de referencia arbitrario de elevación  $z = 0$ , las elevaciones de las tomas de los manómetros están dadas por  $Z_1$  y  $Z_2$  y las alturas de los niveles del fluido son  $h_1$  y  $h_2$ . La distancia entre los manómetros es  $\Delta l$ .



*Figura 2.8. Aparato experimental ilustrativo de la ley de Darcy.*

*Fuente: Freez A. y Cherry J. 1979.*

Vamos a definir la velocidad, a través del cilindro, como:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q= Caudal específico [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ]

A= Sección transversal [ $L^2$ ].

v= Velocidad [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$\theta$ = Angulo de inclinación [ $^\circ$ ].

Los experimentos llevados a cabo por Darcy demostraron que v es directamente proporcional a  $h_1 - h_2$  cuando ( $\Delta l$ ) se mantiene constante, e inversamente proporcional a  $\Delta l$  cuando a  $h_1 - h_2$  se mantiene constante. Si definimos  $\Delta h = h_2 - h_1$  (una convención de signos arbitrarios que nos ayudará en desarrollos posteriores), tenemos:

$$v = \Delta h ; v = \frac{1}{\Delta l}$$

La ley de Darcy puede escribirse como

$$v = -K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

o, en forma diferencial

$$v = -K \frac{dh}{dl}$$

Donde:

v= Velocidad [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$\Delta h$ = Diferencia de alturas [L].

$\Delta l$ = Distancia longitudinal [L].

K= Conductividad hidráulica [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$dh/dl$ = Gradiente hidráulico [ $L \cdot L^{-1}$ ].

En la última ecuación, h es la carga hidráulica, (K) es una constante de proporcionalidad. Esta debe ser una propiedad del suelo en el cilindro ya que, si mantenemos constante el gradiente hidráulico, el caudal específico seguramente debería ser mayor para algunos suelos que para otros. En otras palabras, si  $dh/dl$  se mantiene constante, v es proporcional a (K). El parámetro (K) es conocido como la conductividad hidráulica.

Este tiene valores altos para gravas y arenas y valores bajos para arcillas y la mayoría de las rocas. Ya que tanto  $\Delta l$  como  $\Delta h$  tienen unidades de longitud [L], un análisis

dimensional rápido de la penúltima formula muestra que (K) tiene dimensiones de velocidad  $[L \cdot T^{-1}]$ .

Una forma alternativa de la ley de Darcy puede obtenerse al sustituir para llegar a

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A$$

Esto a veces se compacta aún más en la forma

$$Q = KiA$$

Donde:

$i$ = Gradiente hidráulico  $[L \cdot L^{-1}]$ .

$Q$ = Caudal específico  $[L^3 \cdot T^{-1}]$

$A$ = Sección transversal  $[L^2]$ .

$K$ = Conductividad hidráulica  $[L \cdot T^{-1}]$ .

La ley de Darcy es válida para flujos de agua subterránea en cualquier dirección en el espacio. Con respecto a la figura 2.8, si el gradiente hidráulico  $dh/dl$  y la conductividad hidráulica ( $K$ ) se mantienen constantes,  $v$  es independiente del ángulo  $\theta$ . Esto es verdadero incluso para valores de  $\theta$  mayores que  $90^\circ$ , cuando el flujo está siendo forzado hacia arriba a través del cilindro en contra de la gravedad.



*Figura 2.9. Conceptos macroscópicos y microscópicos del flujo de agua subterránea.*

*Fuente: Freez A. y Cherry J. 1979.*

La ley de Darcy es una ley empírica y solo se basa en la evidencia experimental. Muchos intentos se han hecho para derivar la ley de Darcy a partir de las leyes fundamentales de la física, y Bear (1972) revisó también en algún detalle estos estudios (Freez, A. y Cherry, J. 1979).

#### ➤ **Porosidad (n)**

La porosidad de la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de una textura característica sin que intervenga la forma geométrica ni la

potencia de la formación a su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza (González, L. et al., 2002. pg. 271).

Si el volumen total  $V_T$ , de un suelo o roca es dividido entre el volumen de la porción sólida  $V_s$ , y el volumen total de vacíos  $V_v$ , la porosidad  $n$  es definida como  $n = V_v/V_T$ . Usualmente se reporta como una fracción decimal o un porcentaje.

La tabla 2.2, en parte basada en datos resumidos por Davis (1969), es una lista de intervalos de porosidad representativos de diferentes materiales geológicos. En general, las rocas tienen más bajas porosidades que los suelos; gravas, arenas y limos, compuestos de partículas angulares y redondeadas, tienen porosidades más bajas que los suelos ricos en minerales arcillosos en forma de láminas; y depósitos pobremente seleccionados (Freez, A. y Cherry, J. 1979).

**Tabla 2.2. Intervalos de valores de porosidad**

Depósitos no consolidados	$n$ (%)
Grava	25–40
Arena	25–50
Limo	35–50
Arcilla	40–70
<b>Rocas</b>	
Basalto fracturado	5–50
Caliza kárstica	5–50
Arenita	5–30
Caliza, dolomita	0–20
Lutita	0–10
Roca cristalina fracturada	0–10
Roca cristalina masiva	0–5

*Fuente: Freez A. y Cherry J. 1979.*

La porosidad  $n$  puede ser una importante influencia controladora sobre la conductividad hidráulica ( $K$ ). En programas de muestreo llevados a cabo en depósitos de arena bien seleccionada o en formaciones de roca fracturada, muestras con alta ( $n$ ) generalmente también tienen alta ( $K$ ). Desafortunadamente, la relación no es aplicable a nivel regional en el espectro de posibles tipos de suelos y rocas. Suelos ricos en arcilla, por ejemplo, usualmente tienen porosidades más altas que suelos gravosos o arenosos, pero tienen conductividades hidráulicas bajas (Freez, A. y Cherry, J. 1979).

En la tabla 2.3 se representan esquemáticamente varios tipos de rocas indicando la relación entre su granulometría y su porosidad.

Todos esos valores deben tomarse como orientativos, en especial los de la porosidad eficaz, ya que las dispersiones pueden ser muy importantes, en función de estado de la roca, meteorización, edad, origen, lugar, etc.

La porosidad total de rocas compactas puede ser afectada notablemente por la meteorización y la fracturación por descompresión y esfuerzos tectónicos, los cuales tienden a elevarla. En las arcillas, el efecto de disminución de porosidad por compactación es muy importante y se acentúa rápidamente con la profundidad, en general de forma exponencial.

**Tabla 2.3. Relación entre el tipo de materiales y su porosidad eficaz más común.**

Material	Porosidad eficaz %		
	máx.	min.	media
Arcilla fina	12	3	7
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	26
Arena gruesa	35	20	27
Arena con grava	35	20	25
Gravas fina	35	21	25
Gravas medias	26	13	23
Gravas gruesas	26	12	22

*Fuente: Custodio, M. y Llamas, M. R. 1976.*

La porosidad eficaz está muy afectada por la distribución de tamaños de grano y por la presencia de arcilla y su estado de hidratación. Los datos que se dan a continuación son una ampliación de parte de la tabla 2.4.

**Tabla 2.4. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales. Datos tomados de Johnson (1967), Davis (1969), Schoeller (1962), Muskat (1937), Meinzer (1923 b), Ward (1967), etc.**

Material		Porosidad total % m					Porosidad eficaz % m <sub>e</sub>			Observaciones
Tipo	Descripción	normal			extraordinaria		media	máx.	min.	
		media	máx.	min	máx.	min.				
Rocas masivas	Granito	0,3	4	0,2	9	0,05	<0,2	0,5	0	A
	Caliza masiva	8	15	0,5	20		<0,5	1	0	B
	Dolomía	5	10	2			<0,5	1	0	B
Rocas metamórficas		0,5	5	0,2			<0,6	2	0	A
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobos	30	50	10	60	5	<5	20	0	C,E
	Escorias	25	80	10			20	50	1	C,E
	Pumites	85	90	50			<5	20	0	D

Rocas sedimentarias consolidadas (ver rocas masivas)	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1			<1	2	0,1	A
	Basaltos vacuolares	12	30	5			5	10	1	C
	Pizarras sedimentarias	5	15	2	30	0,5	<2	5	0	E
	Areniscas	15	25	3	30	0,5	10	20	0	F
	Creta blanda	20	50	10			1	5	0,2	B
Rocas sedimentarias sueltas	Caliza detrítica	10	30	1,5			3	20	0,5	
	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5	E
	Dunas	35	40	30			20	30	10	
	Gravas	30	40	25	40	20	25	35	15	
	Loess	45	55	40			<5	10	0,1	E
	Arenas	35	45	20			25	35	10	
	Depósitos glaciales	25	35	15			15	30	5	
	Limos	40	50	35			10	20	2	E
	Arcilla sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0	E
	Suelos superiores	50	69	30			10	20	1	E

A= Aumenta m y m<sub>e</sub> por meteorización.

B= Aumenta m y m<sub>e</sub> por fenómenos de disolución.

C= Disminuye el m y m<sub>e</sub> con la edad.

D= disminuye m y puede aumentar m<sub>e</sub> con la edad.

E= m<sub>e</sub> muy variable según circunferencia.

F= variable según el grado de solubilidad.

**Fuente:** Custodio M. y Llamas, M. R. 1976.

importante y en realidad un valor de la porosidad eficaz puede en ocasiones ser poco significativo si no se indica el tiempo que ha durado la medición. Un limo tiene una porosidad eficaz muy baja (<5 %) a drenaje rápido, pero puede dar valores de hasta el 30 % en períodos de un año o más (Custodio, M. y Llamas, M. R. 1976. pg. 467-468).

## 2.5. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

La base de la prevención está en una precisa evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos e términos de exposición de las masas hídricas subterráneas a los contaminantes potencialmente vertidos en el ambiente, y particularmente sobre la superficie del suelo, la evaluación de la vulnerabilidad consiste en calcular la facilidad con que los contaminantes pueden alcanzar el acuífero desde la superficie, atravesando el medio no saturado (o zona vadosa).

Ya que el tiempo necesario para que el contaminante alcance el acuífero, después de atravesar el subsuelo, tiene un efecto directo sobre la cantidad de contaminante de finalmente podrá

incorporarse al agua subterránea <sup>4</sup>. De hecho, en la zona no saturada tiene lugar diversos mecanismos (biodegradación aeróbica, volatilización, absorción en la matriz solido) que permitan reducir de forma efectiva la carga contaminante cuando el tiempo de tránsito es suficientemente largo.

El termino vulnerabilidad aplicado a la contaminación de las aguas subterráneas fue introducido en Francia en la década de los sesenta. Sin embargo, no fue hasta mediados de los ochenta cuando, como consecuencia de una mayor sensibilidad ambiental, se desarrollaron las primeras experiencias para calcular la vulnerabilidad de forma objetiva. Desde entonces, los conceptos de vulnerabilidad a la contaminación han sido progresivamente mejorados.

El concepto de vulnerabilidad de las aguas subterráneas está basado en la suposición que el entorno físico proporciona una protección natural a las aguas subterráneas frete a los impactos humanos, especialmente respecto a contaminantes que se introducen desde la superficie del terreno <sup>5</sup>. El termino vulnerabilidad a contaminación tiene un significado opuesto al termino protección natural contra contaminación y se considera una propiedad relativa, cualitativa y adimensional.

Genéricamente de puede distinguirse entre vulnerabilidad intrínseca (natural) y específica:

- a) **La vulnerabilidad intrínseca** de las aguas subterráneas a la contaminación está condicionada por las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas del medio, in dependiente de la naturaleza del contaminante y del escenario contaminante.
- b) **La vulnerabilidad específica** de las aguas subterráneas representa la vulnerabilidad que ofrecen frente a un contaminante, o grupo de contaminantes, o grupo de contaminante y su relación con los diferentes componentes que inciden en la vulnerabilidad intrínseca y considera todos los procesos que condicionan la migración del contaminate (transporte, almacenamiento, intercambio y transformación). (Montoro, María. J. 2009. pg. 139).

---

<sup>4</sup> Citado por Duijvenbooden y waegeningh, 1987.

<sup>5</sup> Citado por Vrba Zapororec, 1994.

## 2.6. CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

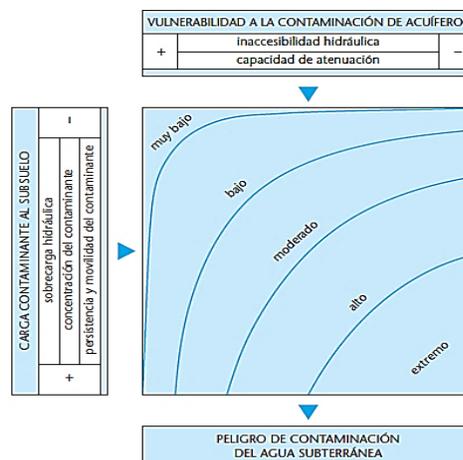
El peligro de contaminación del agua subterránea puede definirse como la probabilidad que un acuífero experimente impactos negativos a partir de una actividad antrópica dada hasta un nivel tal que su agua subterránea se torne inaceptable para el consumo humano, de acuerdo con los valores guía de la OMS para calidad de agua potable.

### a) Evaluación del Peligro de Contaminación de Acuíferos

El peligro de contaminación de acuíferos en cualquier localización dada (figura 2.10) puede ser determinado considerando la interacción entre:

- ◆ La carga contaminante sub-superficial que es, será o podría ser aplicada en el subsuelo como resultado de las actividades humanas.
- ◆ La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, que depende de las características naturales de los estratos que lo separan de la superficie del terreno.

Así, en términos prácticos, la evaluación del peligro involucra la consideración de esta interacción<sup>6</sup> mediante la superposición de los resultados del inventario de cargas contaminantes al subsuelo, con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. La preocupación más grave surgirá donde se presentan o son proyectadas actividades capaces de generar carga contaminante elevado en un área de alta o extrema vulnerabilidad del acuífero (Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003 pg. 87).



**Figura 2.10. Esquema conceptual para la evaluación del peligro de los recursos hídricos subterráneos**

**Fuente:** Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003

<sup>6</sup> Citado por Foster, 1987.

## **b) Estrategias para el Control de la Contaminación del Agua Subterránea**

La vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos debería ser concebida interactivamente con la carga contaminante que es (será o podría ser) aplicada en el ambiente subsuperficial como resultado de una actividad humana, consecuentemente causando un peligro de contaminación al agua subterránea.

Ya que la carga contaminante puede ser controlada, la política de la protección del agua subterránea debería enfocarse a lograr un control tal como sea necesario en relación con la vulnerabilidad del acuífero (o, en otras palabras, con la capacidad natural de atenuación de contaminación de los estratos suprayacentes) (Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003 pg. 91).

## **c) Prevención de la Contaminación Futura**

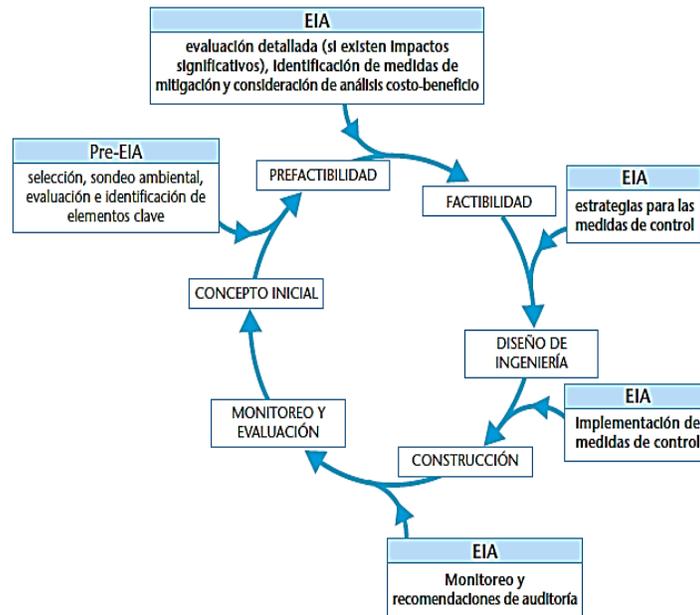
Donde la planificación del uso de territorio sea normalmente emprendida, por ejemplo, en relación con la expansión de un área urbana o con la relocalización de un área industrial, los mapas de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos serán una valiosa herramienta para reducir el riesgo de crear futuros peligros de contaminación del agua subterránea. Ellos identifican las áreas más vulnerables para la contaminación de los acuíferos, de modo que la localización de actividades potencialmente peligrosas puede ser evitada o prohibida.

Si el área de referencia ya tiene importantes fuentes de abastecimiento de agua subterránea, las zonas de protección de estas fuentes (perímetros) deberían ser establecidas como parte de los procesos de planificación, con el uso del mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como guía de los niveles de control requeridos por la actividad potencialmente contaminante (tabla 2.5).

En el caso de nuevas actividades potencialmente contaminantes de gran escala e impacto potencial, el requisito de una Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) como parte del proceso de autorización es actualmente una práctica técnica y/o legal aceptada en muchos países.

La experiencia ha mostrado que este mecanismo asegura mejor agua subterránea en la fase de planificación, facilitando una metodología más efectiva de protección ambiental. Las EIA se enfocan (figura 2.11) a la definición y análisis de problemas, conflictos y

limitaciones referidas a la implementación del proyecto, incluyendo el impacto en actividades vecinas, la población local y el ambiente adyacente (UNEP, 1988) y en ciertas instancias puede conducir a la relocalización del proyecto en una ubicación más aceptable (Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003 pg. 94-95).



**Figura 2.11. Ciclo típico de implementación de proyecto con intervención previa de una Evaluación de Impacto Ambiental**

*Fuente: Foster S.; Hirata R. et al. 2003.*

**Tabla 2.5. Matriz de aceptabilidad de las actividades e instalaciones comunes potencialmente contaminantes de acuerdo a las zonas de la superficie del terreno para protección del agua subterránea**

ACTIVIDAD POTENCIALMENTE CONTAMINANTE QUE REQUIERE MEDIDAS DE CONTROL	(A) SEGÚN LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO		
	alta	media	baja
Tanques Sépticos, Pozos Negros y Letrinas			
propiedades individuales	A	A	A
propiedades comunales, públicas	A	A	A
gasolineras	PA	A	A
Instalaciones de Disposición de Residuos Sólidos			
municipal doméstico	PN	PA	A
construcción/inerte	A	A	A
peligros industriales	N	N	PA
industrial (clase I)	PN	PA	A

industrial (clase II y III)	N	N	PA
cementerio	PA	A	A
incinerador	N	PN	PA
Extracción de Petróleo y Minerales			
material de construcción (inerte)	PA	PA	A
otros, incluyendo petróleo y gas	N	PA	A
tuberías de combustibles	N	PA	A
Predios Industriales			
tipo I	PA	PA	A
tipo II y III	PN/N	PA/N	PA/PN
Instalaciones Militares	PN	PA	PA
Lagunas de Infiltración			
agua municipal/de enfriamiento	A	A	A
efluente industrial	PN	PA	PA
Drenaje por Sumideros			
techo de edificios o casas	A	A	A
camino principal	PN	PA	A
camino menor	PA	A	A
áreas de recreación	A	A	A
estacionamientos de vehículos	PA	A	A
áreas industriales	PN*	PA	A
aeropuertos/estaciones de trenes	PN	PA	A
Aplicación de Efluentes en el Suelo			
industria alimenticia	PA	A	A
todas las otras industrias	PN	PA	A
efluente de agua residual doméstica	PA	A	A
lodo proveniente de agua residual doméstica	PA	A	A
lodo de agua residual de corrales	A	A	A
Cría Intensiva de Ganado			
laguna de efluentes	PA	A	A
drenaje de corrales y áreas de alimentación de animales	PA	A	A
Áreas Agrícolas			
con pesticidas	PN	A	A
sin control del uso de fertilizantes	PN	A	A
almacenamiento de pesticidas	PN	PA	A

N = no aceptable en prácticamente todos los casos; PN = probablemente inaceptable, excepto en algunos casos sujetos a investigación detallada y diseño especial; PA = probablemente aceptable sujeto a diseño e investigación específicos; A = aceptable sujeto a diseño estándar I = zona operacional; II = zona microbiológica; III = zona intermedia; IV = área total de captura.

*Fuente: Foster S.; Hirata R. et al. 2003*

### **2.6.1. Riesgo de contaminación de aguas subterráneas**

La definición más lógica del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es concebirlo como: La interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero determina el riesgo de que la contaminación penetre al acuífero.

El hecho de que ese riesgo pueda convertirse en una seria amenaza la calidad del abastecimiento del agua subterránea que ha desarrollado o por desarrollar dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero mismo a consecuencia en términos de costos de medidas correctivas y la salud humana son temas complejos y se consideran fuera de consideración en este tipo de determinación. (Foster, S. y Hirata, R., 1991. pg.5).

El uso de la expresión, “peligro de contaminación del agua subterránea” en esta publicación tiene exactamente el mismo significado que “riesgo (medido en términos probabilísticos) de contaminación del agua subterránea”<sup>7</sup>.

El cambio de terminología es necesario para adecuarlo con lo que actualmente es utilizado en otras áreas de evaluación del riesgo a la salud humana o animal y a los ecosistemas, donde el riesgo es ahora definido como el resultado “del peligro adaptado a la escala del impacto” (Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003 pg. 88).

## **2.7. MÉTODOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

### **❖ Método de GOD**

El método GOD (por sus iniciales en inglés: Groundwater hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table); (DIOS—según la versión en español de los manuales del CEPIS-OPS) para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos ha sido ampliamente probado en América Latina y el Caribe durante la década de los 90.

Debido a su claridad conceptual y a su simplicidad de aplicación se lo describe preferentemente en esta guía.

Sobre la base de tales consideraciones, el índice de vulnerabilidad GOD, citado por Foster y Hirata en 1988 caracteriza a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

---

<sup>7</sup> Citado por Foster e Hirata 1988.

en función de los siguientes parámetros (generalmente disponibles o fácilmente determinables):

- Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración.
- Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes.
- Distancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados.

Consecuentemente, la estimación del índice de vulnerabilidad GOD involucra una serie de etapas concretas:

- ◆ Primera, identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0,0 a 1,0.
- ◆ Segunda, especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos de:
  - (a) grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras) y
  - (b) 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.
- ◆ Tercera, 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, S.; Hirata, R. et al. 2003 pg. 23)

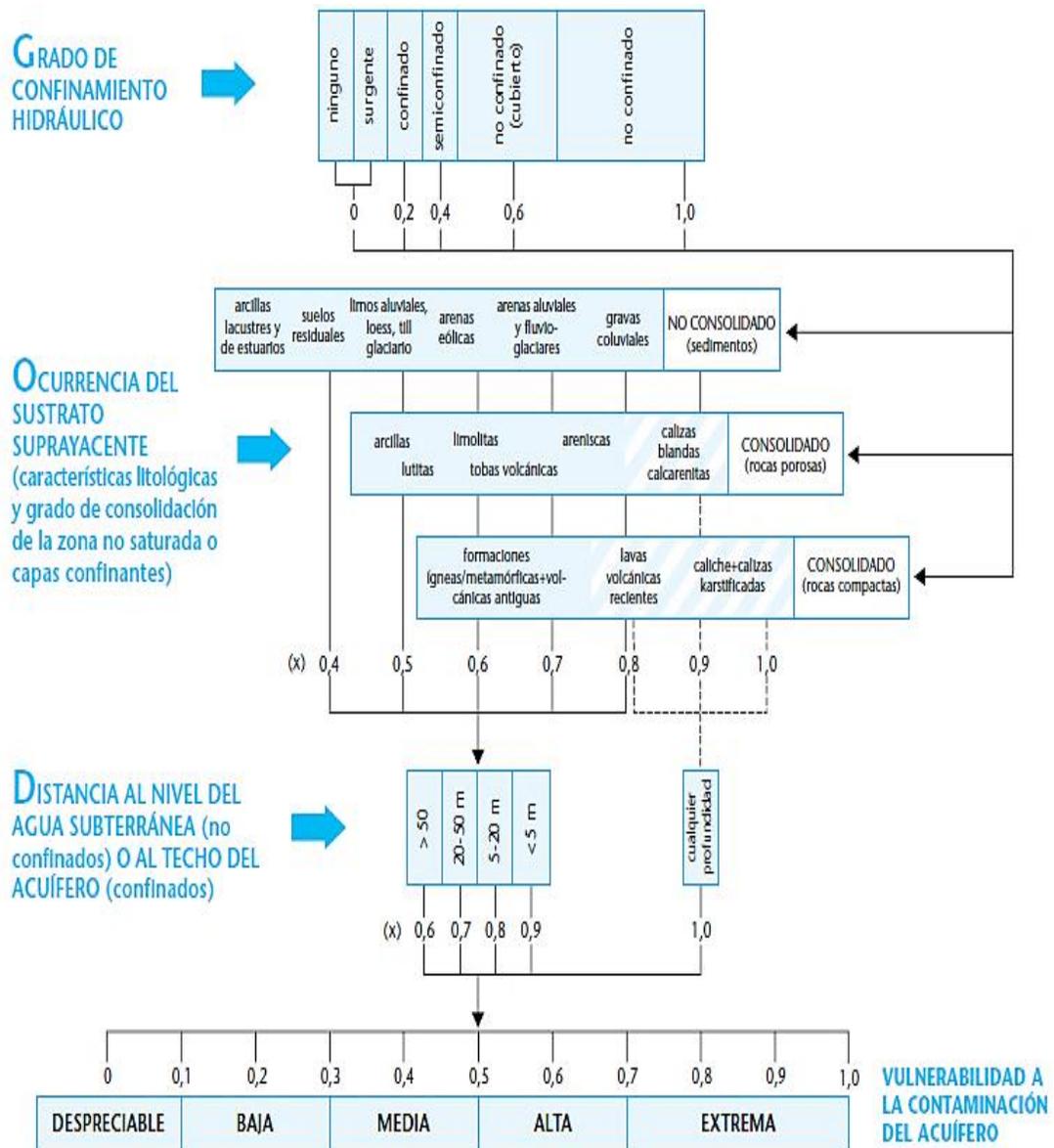


Figura 2.12. Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

Fuente: Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003

### ❖ Método DRASTIC

Fue desarrollado por Aller et al (1987) para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), con el objeto de evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

Es un método de uso muy difundido, tanto para la cualificación (evaluación cualitativa) como para el mapeo y se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, de acuerdo

a las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC (Auge, M. 2007. pg. 3).

➤ **D: Profundidad del agua subterránea**

Indica el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y que pueden traer consigo el contaminante, hasta alcanzar el acuífero.

➤ **R: Recarga neta**

Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero. La recarga resulta primariamente de la fracción de precipitación que no se evapotranspira y de la escorrentía superficial. Es el principal vehículo transportador de los contaminantes.

➤ **A: Litología y estructura del medio acuífero**

Representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes.

➤ **S: Tipo de suelo**

Representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada, que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto, con el parámetro A, determinan la cantidad de agua de percolación que alcanza la superficie freática.

➤ **T: Topografía**

Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y sub-superficial.

➤ **I: Naturaleza de la zona no saturada**

Representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.

➤ **C: Conductividad hidráulica del acuífero**

Determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.

El valor índice se obtiene, entonces, de la sumatoria de la multiplicación de cada parámetro por su respectivo factor de ponderación, así:

$$IV_{DRASTIC} = (D_r D_w) + (R_r R_w) + (A_r A_w) + (S_r S_w) + (T_r T_w) + (I_r I_w) + (C_r C_w)$$

Donde:

$IV_{DRASTIC}$ : Valor del índice DRASTIC (adimensional).

r: Sub índice de factor de clasificación o valoración.

w: Sub índice de factor de ponderación.

D: Profundidad del agua subterránea.

R: Recarga neta.

A: Litología del acuífero

S: Tipo de suelo

T: Topografía.

I: Litología de la zona no saturada.

C: Conductividad hidráulica.

Los sub índices (r) se reflejarán en las tablas 2.13-2.14-2.15-2.16-2.17-2.18 y 2.19, el valor de sub índice (w) se tomará con no pesticida de la tabla 2.6.

**Tabla 2.6. Sub índice de ponderación del factor (w)**

FACTORES DE PONDERACIÓN							
TIPO DE CONTAMINANTE	D <sub>w</sub>	R <sub>w</sub>	A <sub>w</sub>	S <sub>w</sub>	T <sub>w</sub>	I <sub>w</sub>	C <sub>w</sub>
Pesticida	5	4	3	5	3	4	2
No Pesticida	5	4	3	2	1	5	3

*Fuente: Vargas María C. 2010.*

Nota: D<sub>w</sub>: Factor de ponderación de la profundidad del agua, R<sub>w</sub>: Factor de ponderación de la recarga neta, A<sub>w</sub>: Factor de ponderación de litología del acuífero, S<sub>w</sub>: Factor de ponderación del tipo de suelo, T<sub>w</sub>: Factor de ponderación de la topografía, I<sub>w</sub>: Factor de ponderación de la litología del a zona no saturada, C<sub>w</sub>: Factor de ponderación de la conductividad hidráulica.

Los resultados pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), obteniendo los rangos de vulnerabilidad de la tabla 2.7. En la práctica este índice varía entre 50 y 200. Si se considera contaminación por pesticidas (DRASTIC-P) podrá tomar valores comprendidos entre 26 y 260 (Vargas, María C. 2010. pg. 19-22).

**Tabla 2.7. Grados de Vulnerabilidad –Método DRASTIC.**

GRADOS DE VULNERABILIDAD - DRASTIC			
VULNERABILIDAD GENERAL		VULNERABILIDAD PESTICIDAS	
GRADO	VULNERABILIDAD	GRADO	VULNERABILIDAD

Muy bajo	23 - 64		Muy bajo	26 - 73
Bajo	65 - 105		Bajo	74 - 120
Moderado	106 - 146		Moderado	121 - 167
Alto	147 - 187		Alto	168 - 214
Muy alto	188 - 230		Muy alto	215 - 260

*Fuente: Vargas María C. 2010.*

#### ❖ **Método AVI (Índice de Vulnerabilidad de los Acuíferos)**

El método del índice de vulnerabilidad de los acuíferos es una medida de vulnerabilidad de las aguas subterráneas en base a dos parámetros físicos:

- i. Espesor (d) de cada sedimentaria capa por encima de la superior, saturada superficie del acuífero.
- ii. Conductividad hidráulica estimada (K) de cada una de estas capas sedimentarias.

El espesor (d) de sedimentario se obtienen capas (p. ej., arena, labranza, grava) a partir de registros de perforadores de pozos de agua y/o datos de pozos de prueba de geólogos provinciales. Un acuífero se define como cualquier arena acuosa o unidad de grava que tiene un espesor saturado de al menos 0,6 m (2 pies), o menos de 0,6 m, y tiene al menos un pozo de agua instalado. En algunos casos, los pozos domésticos se han completado en unidades dominadas por limo o arcilla, y estos se consideran acuíferos para AVI cartografía. Cualquier unidad de arena o grava más profunda de 5 m por debajo de la superficie del suelo se considera saturado de agua, a menos que haya evidencia directa sobre el recurso del perforador, al contrario.

Dado que las determinaciones de (K) pueden no ser disponible para cada unidad sedimentaria, una mesa de valores estimados es necesario para una determinada región en un área de prueba a lo largo de Saskatchewan-Alberta frontera en el oeste de Canadá, las estimaciones se cree que la tabla 2.8 es razonable.

Las estimaciones de (K) se pueden modificar como la información detallada está disponible (profundidad de fracturas en unidades de labranza o arcilla). Basado en los dos parámetros físicos, (d) y (K), la resistencia hidráulica (c) puede ser calculado:

$$c = \sum \frac{d_i}{K_i}$$

para las capas 1 a i

Donde:

c=Resistencia hidráulica [ T].

d=Espesor de cada capa sedimentaria [L].

K= Conductividad hidráulica [L·T<sup>-1</sup>].

**Tabla 2.8. Estimaciones de conductividad hidráulica (K) para varios sedimentos en las praderas canadienses.**

TIPO DE SEDIMENTO	CÓDIGO ESTÁNDAR	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA [m/d]
Grava	A	1000
Arena	B	10
Arena limosa	C	1
Limo		
fracturado hasta, arcilla o esquisto (5 a 10 m desde la superficie del suelo)	E	10 <sup>-1</sup>
fracturado hasta, arcilla o esquisto (5 a 10 m desde la superficie del suelo)	F	10 <sup>-3</sup>
fracturado hasta, arcilla o esquisto (10 m desde la superficie del suelo, pero degradada según el color: marrón o amarillo)	F	10 <sup>-4</sup>
Masiva o mixta		
Arena-limo-arcilla	G	10 <sup>-5</sup>
Masiva arcilla o esquisto	H	10 <sup>-6</sup>

*Fuente: Stempvoort V. et al, 2013*

Este parámetro (c) es un factor teórico utilizado para describir la resistencia de un acuífero al flujo vertical. Por tanto, la ponderación de los dos factores, espesor y conductividad hidráulica de cada capa de sedimento por encima de la superficie más alta del acuífero saturado, no es arbitrario, sino que se basa en la teoría física.

La resistencia hidráulica (c) tiene la dimensión tiempo, que indica el tiempo de viaje aproximado para que el agua se mueva por advección hacia abajo a través de los varios medios porosos por encima de la superficie del acuífero saturado superior.

Sin embargo, cabe señalar que, en sentido estricto, (c) no es un tiempo de viaje para el agua o los contaminantes. Factores como gradiente hidráulico, la difusión y la sorción no se consideran. Los valores calculados de con log (c) pueden ser utilizado directamente

para generar iso-resistencia mapas de contorno. Sin embargo, en este método, cada perfil está relacionado con un Índice de Vulnerabilidad de Acuíferos (AVI) cualitativo, como se muestra en la tabla 2.9.

Con base en este esquema, y las estimaciones de (K) dadas en la tabla 2.9, un perfil en el área de prueba a lo largo de la frontera Saskatchewan-Alberta requiere al menos 3,7 m de labranza arcillosa fracturada para tener menos que una vulnerabilidad extremadamente alta, al menos 8,2 m de labranza arcillosa fracturada para un moderado vulnerabilidad, una cobertura de al menos 13,2 m de arcilloso hasta tener un índice de vulnerabilidad bajo, y al menos 46 m de labranza para tener un índice de vulnerabilidad extremadamente bajo.

Sobre el otro lado, los no meteorizados (> 10 m profundidad) parte de un perfil continuo de a la arcilla o lutita se le asigna una estimación más baja conductividad hidráulica que la labranza, basada en la tabla 2.9. Bajo este esquema, una arcilla de 10,4 m y/o al perfil de lutita se le podría dar un bajo índice de vulnerabilidad, y una arcilla de 13,6 m y / o el perfil de lutitas podría recibir una calificación de vulnerabilidad extremadamente baja (Stempvoort, V.; Ewert, L. y Wassenaar. 2013. pg. 29-30-31).

**Tabla 2.9. Relación del acuífero Índice de vulnerabilidad a Resistencia Hidráulica.**

<b>Resistencia hidráulica (c)</b>	<b>Log c</b>	<b>Vulnerabilidad (AVI)</b>
0 a 10 años	< 1	Extremadamente alto
10 a 100 años	1 a 2	Alto
100 a 1000 años	2 a 3	Moderado
1000 a 10000 años	3 a 4	Bajo
> 10000 años	>4	Extremadamente bajo

*Fuente: Stempvoort V. et al, 2013*

❖ **Método Ekv. (Profundidad de la Superficie Freática y la Permeabilidad Vertical de la Zona Subsaturada)**

Auge Miguel (2002. pg. 7) considera que la vulnerabilidad “es un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación. Por ello también se la conoce como protección o defensa natural”.

En relación a los acuíferos libres desarrolla una clasificación basada en la profundidad de la superficie freática (E) y en la permeabilidad vertical de la zona subsaturada (Kv), parámetros que también considera el método AVI (Acuifer Vulnerability Index). A ambas les asigna índices que van de 1 (menos vulnerable) a 5 (más vulnerable), finalizando en el diagrama de la tabla 2.11 donde Kv es la permeabilidad vertical y E el espesor de la sección subsaturada. Ambos valores se suman brindando un índice final, con extremos de 2 y 10. Para índices de E + Kv entre 2 y 4 la vulnerabilidad es baja, entre 5 y 7 media y de 8 a 10 alta.

**Tabla 2.10. Índices para del grado de Vulnerabilidad –Método Ekv.**

		<b>Espesor de la Zona Subsaturada (E)</b>				
<b>m</b>		>30	>10 a 30	>5 a 10	>2 a 5	<2
<b>Índice</b>		1	2	3	4	5
		<b>Permeabilidad vertical de la Zona Subsaturada (Kv)</b>				
<b>m/d</b>		<1,10 <sup>-3</sup>	<1,10 <sup>-3</sup> a 0,01	>0,01 a 1	>1 a 50	>50 a 500
<b>Índice</b>		1	2	3	4	5
<b>Vulnerab.</b>		<b>Muy baja</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Muy Alta</b>

*Fuente: Auge, M. 2007.*

**5:** con permeabilidades verticales (Kv) de 50 a 500 m/d, está representado por arena mediana y gruesa, grava arenosa y grava.

**4:** Kv de 1 a 50 m/d, por arena muy fina a limosa, arena fina y arena mediana a gruesa.

**3:** Kv de 0,01 a 1 m/d, por limo y limo arenoso.

**2:** Kv de 0,001 a 0,01 m/d, por limo y limo arcilloso.

**1:** Kv < de 0,001 m/d, por arcilla y arcilla limosa.

(Auge M. 2007. Pg 7)

**Tabla 2.11. Diagrama de vulnerabilidad - acuíferos libres –Método Ekv.**

<b>Kv</b>	<b>1</b>	6	5	4	3	2
	<b>2</b>	7	6	5	4	3
	<b>3</b>	8	7	6	5	4
	<b>4</b>	9	8	7	6	5
	<b>5</b>	10	9	8	7	6
		<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
	<b>E</b>					

*Fuente: Auge, M. 2007.*

## ❖ Índice SINTACS

Desarrollado en Italia por Civita en 1994 a partir de las experiencias realizadas con DRASTIC con el objetivo de corregir la falta de flexibilidad de éste al evaluar la vulnerabilidad para escenarios diversos y para la definición de mapas de vulnerabilidad a escalas más reducidas, en que se presentan sistemas hidrogeológicos muy diversos. Se diferencia del anterior en el peso que se le asigna a cada parámetro y en que toma en consideración el efecto de dilución de la recarga. Es, por tanto, también un Método de Valoración y Ponderación de Parámetros (MVPP), y como en el caso anterior su desarrollo estuvo enfocado a medios diferentes a los kársticos aunque también se ha utilizado en ellos <sup>8</sup>. El acrónimo corresponde a:

- ◆ S, profundidad del agua.
- ◆ I, infiltración efectiva.
- ◆ N, efecto atenuante de la zona no saturada.
- ◆ T, tipo de suelo.
- ◆ A, características hidrogeológicas del acuífero.
- ◆ C, conductividad hidráulica.
- ◆ S, pendiente topográfica media.

El área de estudio se ha de dividir en elementos finitos cuadrangulares, entre 250 y 1000 m de lado. Al igual que en el caso anterior, se le asigna un valor entre 0 y 10 a cada parámetro, y se considera la posibilidad de existencia de zonas karstificadas para la asignación de los valores a los parámetros N (efecto atenuante de la zona no saturada) y A (características hidrogeológicas del acuífero).

A estos parámetros se les asignan valores de 8 a 10 y de 9 a 10 respectivamente en zonas con karst desarrollado. El índice de vulnerabilidad viene dado por el sumatorio de los valores de los parámetros,  $P_j$ , multiplicados por sus respectivos índices de ponderación,  $W_j$ .

$$I_{SINTACS} = \sum_{j=1}^7 P_j W_j$$

Donde:

---

<sup>8</sup> Citado por (Heredia Díaz, 1995) en Martínez C. y García Á. 2003.

$I_{SINTACS}$ : Valor del índice SINTACS (adimensional).

P: Índice de factor de clasificación o valoración.

W: Índice de factor de ponderación.

(Martinez, C. y García, Á. 2003. pg. 160)

### ❖ Método EPIK

El método EPIK es una metodología desarrollada para estimar la vulnerabilidad a contaminación de los acuíferos kársticos, y utiliza cuatro parámetros:

- ◆ E: Zona de intensa karstificación.
- ◆ P: Cobertura de protección.
- ◆ I: Condiciones de infiltración.
- ◆ K: Red kárstica.

En contraposición con las otras metodologías, el método EPIK asigna a cada parámetro valores mayores a medida que los factores de protección del acuífero aumentan, presentados en la tabla 2.12. (Vargas, María C. 2010. pg. 26)

**Tabla 2.12. Descripción y valoración de variables –método EPIK.**

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
<b>VARIABLE</b>	<b>E: ZONA DE INTENSA KARSTIFICACIÓN</b>	
E1	Red kárstica típica (dolinas, depresiones, cavidades, grutas...)	1
E2	Existen superficies de debilidad en la zona matricial que generan alineamientos (valles secos, alineación de dolinas...)	2
E3	Ausencia de morfología epikárstica	3
<b>VARIABLE</b>	<b>P: COBERTURA DE PROTECCIÓN</b>	
P1	Ausencia de capa protectora	1
P2	Cubierta protectora de poco espesor	2
P3	Capa protectora de espesor medio	3
P4	Cubierta protectora de baja permeabilidad	4
<b>VARIABLE</b>	<b>I: CONDICIONES DE INFILTRACIÓN</b>	
I1	Regiones con vías accesibles para la infiltración discreta	1
I2	Zonas con pendientes moderadas	2
I3	Zonas con elevadas pendientes	3
<b>VARIABLE</b>	<b>K: RED KÁRSTICA</b>	
K1	Red kárstica bien desarrollada	1
K2	Zonas pobremente karstificadas	2
K3	Acuíferos kársticos con descarga en medios porosos, o que presentan fisuración, pero subordinada	3

*Fuente: Vargas, María C. 2010.*

## 2.8. MÉTODO GOD

### 2.8.1. Definición de factores

#### ➤ (G) Tipo de ocurrencia del acuífero

Tipo de acuífero que puede ser inexistente, surgente, confinado, semiconfinado cubierto o libre. Este parámetro presenta una valoración entre 0 y 1.

Para la delimitación de las áreas de protección a establecer en una captación en un acuífero confinado es imprescindible conocer el grado de confinamiento a que está sometido el acuífero a fin de establecer la metodología a seguir. Se pueden emplear diferentes estudios para determinar si existe confinamiento siendo más difícil evaluar el grado de éste. Son los siguientes:

#### ◆ Aproximación geológica

Mapas geológicos clásicos: análisis de litología y estructura.

Se realizan mediante estudios de campo en afloramientos, análisis de mapas geológicos y de suelos existentes y columnas de sondeos.

#### ◆ Aproximación hidrogeológica

Nivel de agua en la captación: Cuando el nivel piezométrico del acuífero confinado está por encima del nivel freático del acuífero libre suprayacente, el primero no puede contaminarse puesto que el flujo a través de la formación confinante es ascendente.

Por el contrario, cuando por efecto de los bombeos el nivel piezométrico esté más bajo, sí que existe un flujo descendente que puede transportar contaminantes hasta el acuífero confinado. En este caso en las cercanías de la captación el cono de bombeo puede provocar que el acuífero se comporte como libre, aunque estratigráficamente sea confinado.

#### ◆ Aproximación hidroquímica

Datación de las aguas: El contenido de tritio en las aguas subterráneas puede ser empleado para determinar su edad. El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno cuyo origen natural está en la alta atmósfera, mediante la interacción del nitrógeno con neutrones cósmicos (Martinez, C. y García, Á. 2003. pg 199;201).

La valoración que se le da a este parámetro es la que se muestra en la figura 2.12, es importante notar la ocurrencia del acuífero para dar una calificación.

➤ **Tipo de suelo en la zona no saturada (O)**

Este factor está determinado por las características litológicas que presenta la zona no saturada de estudio, en este caso el índice varía entre 0,4 y 1.

Para la asignación de estos valores tomaremos en cuenta todas las texturas que se muestran en la figura 2.12 donde se presentan los valores que hay que asignar a cada tipo de sustrato suprayacente.

Los rangos del tipo de suelo están definidos por las litologías más comunes para nuestro medio los más comunes no consolidados y consolidados, así como lo describe Foster en la figura 2.12.

- ✓ Arcillas lacustres y de estuarios: lacustre altamente expansivas, que por efecto de la pérdida de humedad en la subrasante (Ávila, Y. et al. 2017. pg:1).
- ✓ Suelos residuales: Los suelos que no han sido transportados, sino que provienen de la roca madre que subyace por debajo de éstos se denominan suelos residuales (Glosbe Diccionario).
- ✓ Limos aluviales, loess, till, glaciario: Por consiguiente, se trata de terrenos de origen aluvial, de tipo arenoso y limo-arcilloso, frescos, profundos y fértiles, con una buena orientación y capacidad de almacenamiento de agua, ricos en nitrógeno y azufre y sin presencia de calcio (Glosbe Diccionario).
- ✓ Arenas eólicas: La granulometría de la arena que forma las dunas, también llamada arena eólica, está muy concentrada en torno a 0,2 mm de diámetro de sus partículas (Glosbe Diccionario).
- ✓ Arenas aluviales y fluvioglaciares: Cono de deyección o abanico aluvial (sedimentación), donde se acumulan los sedimentos (bloques, cantos rodados, grava, arena) arrastrados por las aguas del torrente durante las crecidas, que se acumulan en forma de abanico al llegar a

zonas de menor pendiente, generalmente, en el fondo del valle principal (Glosbe Diccionario).

- ✓ **Gravas coluviales:** Se denomina grava a las rocas sedimentarias detríticas producto de la división natural o artificial de otras rocas y minerales. Los fragmentos de la grava miden entre 2 y 64 milímetros de diámetro y su composición química es variada (Rocas y minerales. 2016).

➤ **Profundidad del Nivel Freático (D)**

El tercer factor de este método significa la profundidad al nivel freático desde la superficie del suelo por lo que se debe contar con esta información, en este caso el índice varía entre 0,6 y 1.

Su valoración depende de las distancias medida en metros, siendo las calificaciones más desfavorables las distancias más cortas, así como se muestra en la figura 2.12. Este parámetro también es considerado para el método DRASTIC ya que es el que representa una conexión directa con el acuífero (Foster, S. Hirata, R. et al 2003).

## 2.9. MÉTODO DRASTIC

### 2.9.1. Definición de factores

➤ **Profundidad del Nivel Freático (D)**

La superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las posiciones de un acuífero referidas a una determinada profundidad (Custodio, M. y Llamas, M. R.1976. pg: 534).

Este factor es muy importante ya que es una entrada directa al acuífero por lo que puede representar la distancia de cualquier contaminante hacia la zona saturada.

*Tabla 2.13. Ponderación profundidad nivel freático (EPA , 1987)*

D (PROFUNDIDAD) (m)	VALORACIÓN (Dr)
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
> 30,5	1

*Fuente: Vargas María C. 2010.*

➤ **Recarga Neta (R)**

La recarga se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo.

Las técnicas empíricas correlacionan la recarga con otras variables hidrológicas que se pueden medir como precipitación, temperatura, elevación, flujo en canales, etc. Esta relación se usa para extrapolar los registros de recarga en el tiempo y transponer los estimativos a otras áreas de recarga de características similares.

Expresiones empíricas y casos de estudio

Algunas expresiones empíricas basadas en correlaciones entre recarga y precipitación son:

- ◆ **Mander y Shiftan (1981)<sup>9</sup>**: Dan una fórmula para estimar la recarga en clima mediterráneo:

$$r = 0,9(p - 360) \quad 450 < p < 650 \text{ mm/año}$$

Donde:

r = recarga (mm/año)

p = precipitación (mm/año)

- ◆ **Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988)**: Propone una fórmula un poco más compleja para estimar la recarga en India que no preserva la dimensionalidad:

$$r = 50,8 \left( \frac{p}{25,4} - 15 \right)^{0,4} \quad p > 380 \text{ mm/año}$$

Donde:

r = recarga (mm/año)

p = precipitación (mm/año)

---

<sup>9</sup> Presentadas por Velez M. 2019.

- ♦ **Turc (1954):** Propuso una expresión en la que incluye, aparte de la precipitación, la temperatura media anual:

$$r = p \left( 1 - \left( 0,9 + \frac{p^2}{L^2} \right)^{-0,5} \right)$$

Donde:

$$L = 300 + 25T + 0,05T^2$$

r = tasa de recarga promedio anual (mm/año)

p = precipitación anual (mm/año)

T = temperatura media anual (°C)

Una manera más de estimar la recarga conociendo ciertos datos de los pozos y de la litología, se puede citar el siguiente método:

- ♦ **Método de fluctuación del nivel freático (WTF)**

El método WTF se basa en la premisa de que los aumentos en los niveles de las aguas subterráneas en los acuíferos no confinados se deben a la recarga del agua que llega a la capa freática. La recarga se calcula como:

$$R = S_y * \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Donde:

R= recarga neta [L].

S<sub>y</sub>= rendimiento específico [Adimensional].

Δh/Δt= Cambio de altitud de la lámina de agua en función al tiempo [L].

Derivación de la ecuación asume que el agua que llega al nivel freático se almacena inmediatamente y que todos los demás componentes de la ecuación son cero durante el período de recarga.

Se produce un lapso de tiempo entre la llegada del agua durante un evento de recarga y la redistribución de esa agua a los otros componentes de la ecuación (Healy, R. y Cook, P. 2002. pg. 2).

El atractivo del método WTF radica en su simplicidad y facilidad de uso. No se hacen suposiciones sobre los mecanismos por los cuales el agua viaja a través de la zona no saturada; por lo tanto, la presencia de camino

de flujo preferenciales dentro de la zona no saturada de ninguna manera restringe su aplicación.

Debido a que el nivel del agua medido en un pozo de observación es representativo de un área de al menos varios metros cuadrados, el método WTF puede verse como un enfoque integrado y menos como una medición puntual que aquellos métodos que se basan en datos en la zona no saturada. El método, sin embargo, tiene sus limitaciones:

- ✓ El método se aplica mejor a las capas freáticas poco profundas que muestran subidas y bajadas bruscas del nivel del agua.
- ✓ El método no puede dar cuenta de una tasa constante de recarga.
- ✓ Otras dificultades se relacionan con la identificación de la causa de las fluctuaciones del nivel del agua y el cálculo de un valor para el rendimiento específico (Healy, R. y Cook, P. 2002. pg. 3).

La valoración que se asigna es la siguiente:

**Tabla 2.14. Ponderación recarga neta (EPA, 1987)**

R (RECARGAS) (mm/año)	VALORACIÓN N (Rr)
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

*Fuente: Vargas, María C. 2010.*

➤ **Medio Acuífero (A)**

Este parámetro hace referencia a la roca consolidada y no consolidada en la cual se encuentra el recurso hídrico, sirviendo de acuífero, por lo que en esta medida se hace consideración a la porosidad y cantidad de fracturamiento de la roca, por lo que cada categoría tiene un rango de calificación determinado por estos dos factores. El sistema de flujo dentro del acuífero se ve afectado por el medio, la ruta y la longitud del trayecto que debe seguir el contaminante.

Por otro lado, la ruta que pueda tomar el acuífero está influenciado por la fracturación y las series interconectadas generando un flujo y acceso con mayor facilidad, de esta manera en general se tiene que mientras mayor sea el tamaño

de grano y la cantidad de fracturas, mayor será la permeabilidad y menor la capacidad de atenuación de los medios con respecto al contaminante. Los rangos del tipo de suelo están definidos por las litologías más comunes con valores de ponderación de 2 a 10, como se muestra en la tabla 2.15 (Betancourt, N. 2017. pg. 25-26).

**Tabla 2.15. Ponderación litología del suelo (EPA, 1987)**

A (LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO)	VALORACIÓN (Ar)	VALOR TÍPICO (Ar)
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Arenas y gravas de origen glaciario	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 – 10	10

*Fuente: Vargas, María C. 2010.*

De acuerdo al método DRASTIC, cada una de las categorías para la calificación de la variable de litología del acuífero se define de la siguiente forma, estableciendo las características de la roca para pertenecer a esa calificación.

- ◆ **Lutita Masiva:** Capas gruesas de Lutitas y rocas arcillosas que contienen pequeñas cantidades de agua, por lo general de sus fracturas, el nivel de contaminación está influenciado por el grado de fracturación.
- ◆ **Roca metamórfica/ígnea:** Lechos de rocas metamórficas consolidadas o rocas de origen ígneo que tienen poca porosidad primaria y bajos rendimientos de agua, por lo cual la contaminación es función del grado de fracturación.
- ◆ **Roca metamórfica/ígnea meteorizada:** Material no consolidado, denominado regolito o saprolito que tienen porosidad primaria, con lo que la contaminación potencial está influenciada por el porcentaje de arcilla presenta, durante mayor sea el contenido de esta, menor el potencial de contaminación.

- ◆ **Arenas y gravas de origen glacial:** Lechos no consolidados o semiconsolidados de mezcla de partículas de tamaño arcillas, arenas y limos, con baja permeabilidad, generando poco rendimiento de los pozos, aunque las formaciones de origen glacial tienen poca profundidad generando que sean más susceptibles a la contaminación.
- ◆ **Secuencias de arenisca, caliza y lutitas:** Por lo general son capas delgadas de secuencias de rocas sedimentarias con porosidad primaria por lo que el factor determinante es el nivel de fracturación.
- ◆ **Arenisca masiva:** Lechos de roca formados por roca arenisca consolidada, que posee porosidad primaria y secundaria, además de poseer depósitos más gruesos en secuencias de piedra arenisca, piedra caliza y pizarras.
- ◆ **Caliza masiva:** Compuesto por piedra caliza o formaciones de dolomita consolidada, caracterizada por depósitos de mayor potencia que los de piedra arenisca o caliza.
- ◆ **Arena o grava:** Mezcla de material no consolidado de tamaño de partícula de arena a grava que contienen pequeñas cantidades de materiales más finos, durante menor sea la cantidad de material fino mayor el potencial de contaminación.
- ◆ **Basaltos:** Se hace referencia a las formaciones de roca ígnea extrusiva con fracturación y porosidad vesicular y no únicamente al tipo de roca basalto, el potencial de contaminación está influenciado por la cantidad de aberturas interconectadas.
- ◆ **Caliza kárstica:** Representa el mayor potencial debido a las cavidades resultantes de la disolución de la piedra caliza, es un caso especial y aparte a las consideraciones de piedra caliza masiva (Betancourt, N. 2017. pg. 26-27).

➤ **Tipo de suelo (S)**

El tipo de suelo hace referencia a la porción de la zona vadosa que tiene una representativa actividad biológica, teniendo un gran impacto en la recarga del

acuífero, contando con variedad desde texturas finas como limos y arcillas hasta texturas más gruesas como la arena o grava.

El rango de tipo de suelo hace referencia a las diferencias de granulometría que se pueden encontrar desde grano grueso a muy fino, siendo la arcilla la de menor ponderación. (Betancourt, N. 2017. pg. 28-29)

**Tabla 2.16. Ponderación litología del suelo (EPA, 1987)**

S (TIPO DE SUELO)	VALORACIÓN (Sr)
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

*Fuente: Vargas, María C. 2010.*

En la calificación solo se hace referencia a las siguientes posibles capas disponibles, las cuales se definen de la siguiente manera:

- ◆ **Arcilla no compactada y no agregada:** Formado por Illitas o arcilla de Caolinita el cual no se expande ni se contrae con la adición de agua, evitando la formación de permeabilidad secundaria.
- ◆ **Franco arcilloso:** Establecido por la clasificación textural de entre 15 y 55 % de limos, de 27 a 40 % de arcilla y entre 20 y 45% de arenas, generando una baja permeabilidad y un bajo potencial de contaminación.
- ◆ **Estiércol, cieno /material orgánico:** Es un suelo fino de color oscuro proveniente de materia orgánica que generalmente tiene alta carga mineral y de cenizas, contiene bajas cantidades de fibras vegetales, el contenido de materia orgánica representa un factor significativo para reducir el potencial de contaminación.
- ◆ **Franco limoso:** Suelo con clasificación textural de 50 a 85 % limo, de 12 a 27 % arcilla y de 0 a 50 % arena.
- ◆ **Franco:** Suelo con clasificación textural de 25 a 50 % limo, de 7 a 27 % arcilla y de 0 a 50 % arena.

- ◆ **Franco arenoso:** Suelo con clasificación textural de 0 a 50 % limo, 0 a 20 % arcilla y de 15 a 50% arena tiene mayor contaminación potencial debido al alto porcentaje de arena.
- ◆ **Agregado arcilloso o compactado:** Caracterizado por arcilla de monmotillonita, o suelos afines que al hidratarse se expanden generando agrietamiento en el momento de secado, significando un alto potencial de contaminación por el agrietamiento, a pesar de la baja permeabilidad del material.
- ◆ **Turba:** Suelo conformado por partes sin descomponer de material vegetal como turba orgánica, que puede representar un medio de atenuación importantes, aunque al ser relativamente permeables aumentan el potencial de contaminación.
- ◆ **Arena:** Suelo conformado por partículas con tamaño entre 1/16 mm y 2 mm por lo general suelo libre de sedimentos y arcillas.
- ◆ **Grava:** Suelo con clasificación de partículas de tamaño superior a 2mm, incluyendo una mezcla de partículas de distintos tamaños de grano, generando una permeabilidad alta.
- ◆ **Delgado o ausente:** Se determina ausente cuando el perfil del suelo tiene un grosor menor a 10 pulgadas, es decir 25,4 centímetros, debido a su ineficacia para la atenuación del contaminante (Betancourt, N. 2017. pg. 30).

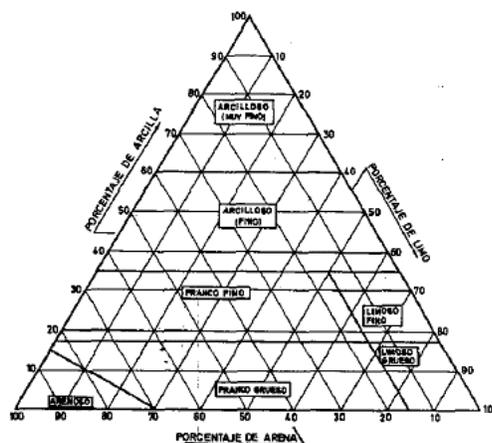


Figura 2.13. Clasificación de suelos por texturas según U.S.D.A.

Fuente: Custodio M. y Llamas, M. R. 1976.

➤ **Topografía (T)**

La topografía de la zona de estudio tiene incidencia en el arrastre del contaminante por la escorrentía superficial o infiltración y en el desarrollo del suelo.

En ocasiones se puede inferir el nivel del agua a partir de la topografía. Como regla general, cuanto mayor sea la pendiente de la zona la vulnerabilidad será menor (Martinez, C. y García, Á. 2003. pg: 159).

Un factor sencillo de entender se trata de la pendiente que se encuentra en la superficie del suelo tomando como valoración la siguiente:

**Tabla 2.17. Ponderación topografía (EPA, 1987)**

T (PENDIENTE) (%)	VALORACIÓN (Tr)
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

*Fuente: Vargas María C. 2010.*

➤ **Impacto en la zona vadosa (I)**

El impacto en la zona vadosa, determina las diferentes litologías en las cuales se puede contener el recurso hídrico, brindando los valores que establece la tabla 2.18.

**Tabla 2.18. Ponderación litología del acuífero (EPA, 1987)**

I (NATURALEZA DE LA ZONA NO SATURADA)	VALORACIÓN (Ir)	VALOR TÍPICO (Ir)
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ígnea	2 – 8	4
Grava y arena	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 – 10	10

*Fuente: Vargas María C. 2010.*

Dado a que la evaluación de este parámetro consta de un rango, para definir un valor o una capa en específico, se establecen las siguientes definiciones para cada uno de las variables.

- ◆ **Capa confinante:** Rango establecido para acuíferos confinados, al representar una capa impermeable que restringe el flujo en el acuífero.
- ◆ **Cieno/arcilla:** Referente a un depósito con contenido de limos y arcillas, que representa una barrera para retardar el libre flujo de líquidos, además de presentar una baja permeabilidad de acuerdo a la cantidad de arcilla presente disminuyendo el potencial de contaminación a mayor cantidad de arcilla.
- ◆ **Metamórficas /ígneas:** Consolidados de roca de origen metamórfico o ígneo que no contienen porosidad primaria, permitiendo la movilidad por fracturación siendo la contaminación una función del grado de fracturación.
- ◆ **Lutita:** Lechos de roca de arcilla consolidada con posibilidad de fracturarse.
- ◆ **Caliza:** Consolidados de caliza o dolomita.
- ◆ **Arenisca:** Rocas de arena consolidada que contiene porosidad primaria y secundaria.
- ◆ **Secuencias de arenisca, caliza y lutita:** Hace referencia a capas delgadas de rocas sedimentarias que contiene porosidad primaria pero, aun así, prima el nivel de fracturación para la evaluación.
- ◆ **Arena o Grava con contenido de cieno y arcilla significativo:** Mezclas no consolidadas de arena y grava con contenidos de materia orgánica, por lo general con alto contenido de arcilla que reducen la permeabilidad de estos depósitos.
- ◆ **Grava y arena:** Mezclas no consolidadas de partículas de tamaño arena y grava con pequeñas cantidades de granos más finos, los depósitos bien clasificados tienen un potencial de contaminación más alta.
- ◆ **Basaltos:** Lecho de roca ígnea extrusiva consolidada, con planos de estratificación y porosidad vesicular, la polución está influenciada por el

número y cantidad de aberturas interconectadas, presentando pocas posibilidades de atenuación una vez que el contaminante entra en el sistema de fracturas.

- ◆ **Caliza kárstica:** Caso especial de piedra caliza, donde esta se ha disuelto hasta el punto de formar grandes cavidades y fracturas abiertas interconectadas generando un nivel alto de contaminación durante mayor sea el área abierta (Betancourt, N. 2017. pg. 32-33).

➤ **Conductividad hidráulica (C)**

Condiciona la velocidad del agua y por tanto la del contaminante, así como la renovación del agua en el interior del acuífero, siendo la vulnerabilidad más elevada cuanto mayor es la conductividad hidráulica. (Martinez, C. y García, Á. 2003. pg. 159)

La última calificación se realiza sobre la conductividad hidráulica del acuífero con los valores presentes en la tabla 2.19.

**Tabla 2.19. Ponderación conductividad hidráulica (EPA, 1987)**

<b>C (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA) (m/día)</b>	<b>VALORACIÓN N (Cr)</b>
0,04 – 4,08	1
4,08 – 12,22	2
12,22 – 28,55	3
28,55 – 40,75	6
40,75 – 81,49	8
> 81,49	10

*Fuente: Vargas, María C. 2010.*

Debido a la dificultad para obtener este tipo de datos se recomienda la utilización de tablas de relación de conductividad de acuerdo al tipo de material, en el caso de que no exista la suficiente información por parte de pruebas de bombeo en el área (Betancourt, N. 2017. pg. 35).

## **2.10. MÉTODO AVI**

### **2.10.1. Definición de factores**

➤ **Espesor de cada capa sedimentaria (d)**

El espesor del estrato (o potencia del estrato) es la distancia entre las superficies de estratificación que lo limitan, medida perpendicularmente a las mismas.

Para que sea considerado como estrato debe tener un espesor mayor o igual a 1 cm, hasta más de 1 metro (Arellano, J.).

➤ **Conductividad hidráulica (K)**

La determinación de la conductividad hidráulica de cada una de las capas que sobreyacen al acuífero es un parámetro de difícil determinación, lo que dificulta la aplicación de este método. En cortes intergranulares la resistencia hidráulica es función del contenido de arcilla (a mayor arcillosidad mayor resistencia hidráulica) y esta influye decisivamente en la resistividad eléctrica de los sedimentos granulares (a mayor arcillosidad menor resistencia eléctrica), por lo que Kalinski y demás colaboradores (1993) proponen como alternativa sustituir la resistencia hidráulica por la resistencia eléctrica, la que puede determinarse de forma relativamente fácil aplicando métodos de prospección geoelectrica (Valcarce, Rosa. M. 2020. pg. 5).

Los valores para este factor citado por el autor pueden ver en la tabla 2.9.

## **2.11. MÉTODO EKV**

### **2.11.1. Definición de factores**

➤ **Espesor de la Zona Subsaturada (b)**

Situada entre la superficie freática y la superficie del terreno. Tiene alguna pequeña porción (parte baja de la zona capilar que después se define) saturada de agua permanentemente, y otras en las que ocasionalmente también puede producirse saturación, pero transcurrido un tiempo estas últimas dejan de estar saturadas al perder el agua gravífica. Por esta razón se conoce también esta zona con el nombre de zona no saturada (Custodio, M. y Llamas, M. R. 1976. pg: 312-313).

➤ **Permeabilidad vertical (kv)**

Se asigna el rango de valores de conductividad hidráulica (K) correspondiente a cada material en metros por día (m/d). Con estos rangos se calculan los valores máximos y mínimos, correspondientes al peor y el mejor escenario. La simulación permitirá obtener datos para estimar probabilidades o tendencias de la resistencia hidráulica (C) respecto a las categorías de vulnerabilidad baja, media y alta para el escenario planteado (Contreras, J. 2018. pg 84).

Si el flujo es perpendicular a las capas (los dos sondeos, que suponemos abiertos en sus extremos, indican el gradiente que provoca el flujo), la permeabilidad equivalente ( $K_v$ ) es igual a:

$$K_v = \frac{B}{\sum \frac{b_i}{K_i}}$$

siendo:

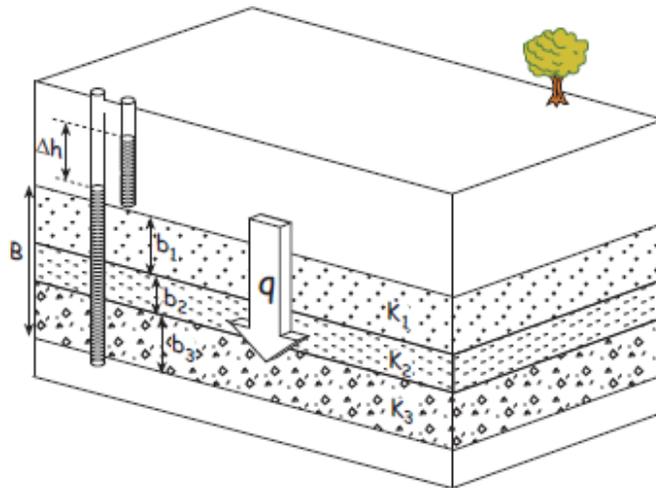
$k_v$  = Conductividad hidráulica vertical equivalente [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$k_i$  = Conductividad hidráulica de cada una de las capas [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$b_i$  = Espesor de cada una de las capas [L].

$B$  = Espesor total, suma de todos los espesores [L].

(Sánchez, J. pg. 5)



*Figura 2.14. Ejemplo de los espesores y permeabilidades*

*Fuente: Sánchez J.*

## 2.12. CRITERIOS PARA LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS

Los criterios que se propone emplear son los siguientes:

### ❖ Vulnerabilidad intrínseca

La aplicación de este criterio conlleva que los puntos de abastecimiento que capten acuíferos cuyas características los hagan más vulnerables deben disponer de un perímetro de protección antes que otros que capten acuíferos con una protección natural superior.

Para determinar cuál es la protección natural de los acuíferos captados por los puntos de abastecimiento es necesario en primer lugar realizar un análisis de sus características

hidrogeológicas. Es fundamental identificar el tipo de acuífero detallando su naturaleza (libre, semiconfinado y confinado, al ser los primeros los más vulnerables y los acuíferos confinados los que poseen menor vulnerabilidad).

El tipo de material que constituye el acuífero (carbonatado, detrítico...) tiene una gran influencia en el poder auto depurador del terreno y en el tiempo de tránsito condicionando además la metodología a aplicar en la elaboración del perímetro de protección. Para analizar la vulnerabilidad de los acuíferos captados frente a actividades potencialmente contaminantes debe conocerse además la geometría del acuífero, el funcionamiento hidrogeológico (balances, piezometría, hidroquímica) y cuáles son las características hidrodinámicas del mismo.

#### ❖ **Focos potenciales de contaminación**

La utilización del inventario de focos potenciales de contaminación como criterio se basa en considerar que es necesario garantizar la calidad de las aguas prioritariamente en aquellas poblaciones en las que dichos focos puedan suponer un riesgo potencialmente elevado de degradación de la calidad de las aguas, frente a aquellos otros municipios que al carecer casi completamente de focos contaminantes no presenten ningún riesgo a corto plazo (aunque en el futuro podrían producirse nuevos focos que sería necesario considerar).

#### ❖ **Población fija y estacional**

La aplicación de este criterio, frecuentemente empleado en la Planificación Hidrológica conlleva considerar como prioritario salvaguardar la calidad del agua de aquellas poblaciones con cierto número de habitantes, dejando para etapas posteriores el aplicar los perímetros de protección a las poblaciones más pequeñas del resto del territorio considerado.

#### ❖ **Situación actual del abastecimiento**

El emplear la información relativa a la situación actual del abastecimiento es un criterio de selección que se basa en considerar que aquellas poblaciones en las que su suministro depende de una única captación carecerán de alternativas para suministrar agua con la calidad necesaria ante una posible contaminación que sí tienen aquellas otras que

puedan, aunque sea temporalmente o con restricciones al consumo, emplear otra captación u otras fuentes de suministro.

❖ **Coste del estudio e implantación de cada perímetro de protección**

Es este un criterio básico para realizar una planificación realista que contemple prioridades al desarrollar un programa de implantación de perímetros de protección en una región.

Su conocimiento es fundamental para repartir racionalmente los recursos disponibles, evaluando si es conveniente emplear tiempo y dinero en aquellos que por tener una repercusión socioeconómica de gran importancia su implantación real en el terreno, cuando no tenga carácter técnico de urgencia que lo haga prioritario ineludiblemente, se verá dilatada, cuando no definitivamente pospuesta (Martinez, C. y García, Á. 2003. pg. 31-33).

**2.13. MÉTODOS PARA CREAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN**

❖ **Radio fijo calculado (R.F.C.) “Función del tiempo de tránsito”**

La ecuación empleada (Ec. volumétrica) calcula el volumen de agua que llegará a la captación en un tiempo determinado, que será el considerado necesario para eliminar o disminuir la contaminación hasta un nivel admisible.

La ecuación volumétrica es la siguiente:

$$Q * t = m_e H \pi R^2$$

Donde:

$H \pi R^2$  = Volumen total del cilindro [L<sup>3</sup>].

$m_e H \pi R^2$  = Volumen de agua contenido [L<sup>3</sup>].

Por lo tanto:

$$R = \sqrt{\frac{Q * t}{m_e * H * \pi}}$$

Siendo:

R = Radio del perímetro de protección, en m.

Q = Caudal bombeado, en m<sup>3</sup>/año.

t = Tiempo de tránsito hasta la captación, en años.

$m_e$  = Porosidad eficaz del acuífero, adimensional.

H = Espesor saturado en la captación, en m.

(Moreno, L. y Martinez, C. 1991. pg. 100)

#### ❖ **Método de Wyssling.**

Wyssling ha diseñado un método para el dimensionamiento de perímetro de protección consistente en el cálculo de la zona de llamada de una captación y búsqueda posterior del tiempo de tránsito deseado.

El método es simple, aplicable en acuíferos porosos homogéneos, pero presenta el inconveniente de no tener en cuenta las heterogeneidades del acuífero. Para su aplicación se necesita de un ensayo de bombeo previo.

La resolución del método precisa conocer las siguientes variables:

$i$  = Gradiente hidráulico, en m/m.

$Q$  = Caudal bombeado, en  $m^3/s$ .

$K$  = Permeabilidad, en m/s.

$m_e$  = Porosidad eficaz del acuífero, adimensional.

$b$  = Espesor del acuífero, en m.

Se calcula en primer lugar la “zona de llamada”. En un acuífero libre si  $B$  es la anchura del “frente de llamada”:

$$Q = KBbi \rightarrow B = \frac{Q}{Kbi}$$

Donde:

$B$  = Ancho de la zona de llamada [L].

El radio de llamada puede obtenerse de la expresión:

$$X_o = \frac{Q}{2\pi Kbi}$$

y el ancho del frente de llamada a la altura de la captación:

$$B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2Kbi}$$

Donde:

$B'$  = Ancho de frente [L].

La velocidad eficaz  $v_e$  se define como:  $v_e = Ki/m$  una vez determinada la zona de llamada ha de busca y se en la dirección del flujo la distancia correspondiente al tiempo de tránsito deseado (isócronas). se emplean las ecuaciones:

$$S_o = \frac{l + \sqrt{l(l + 8X_o)}}{2}$$

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l + 8X_o)}}{2}$$

$$l = v_e * t$$

Donde:

$S_o$  = Distancia en el sentido del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito  $t$  [ L ].

$S_u$  = Distancia en el sentido contrario al flujo correspondiente a un tiempo de tránsito, [L].

$t$  = Tiempo de tránsito [ T ].

$v_e$  = Velocidad eficaz [  $L \cdot T^{-1}$  ].

(Moreno, L. y Martinez, C. 1991. pg. 104;106)

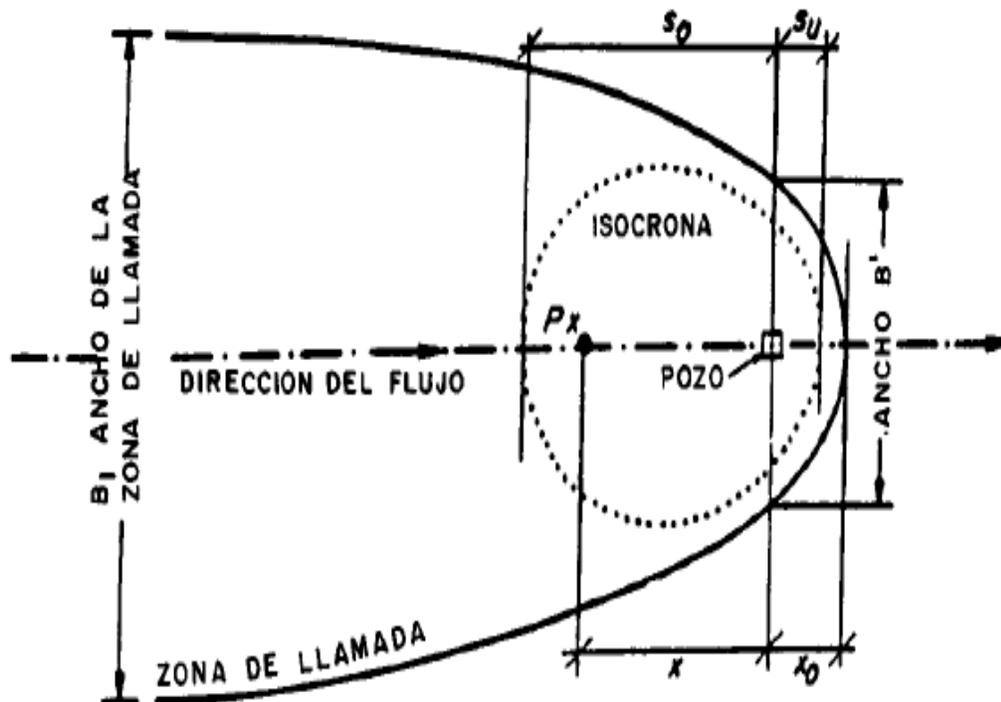


Figura 2.15. Determinación de Isocronas (Método de Wyssling)

Fuente: Moreno, L. y Martinez, C. 1991

### ❖ Método de Hoffman y Lillich

Se trata de un método iterativo desarrollado inicialmente por Lillich y Liting y posteriormente modificado por Hoffman y Lillich.

Es un método simple que necesita pocas variables para su resolución, aplicable en medios homogéneos, cuando el descenso provocado por bombeo sea pequeño en relación al espesor del acuífero.

El descenso en las proximidades de un pozo, en un acuífero cautivo, puede describirse por la siguiente ecuación (Todd, 1964).

$$h - h_w = (h_o - h_w) \frac{\ln(1/r)}{\ln(R/r)}$$

Donde:

$h$  = Nivel piezométrico en relación a un nivel de referencia en un punto dado [L].

$l$  = Distancia de ese punto al pozo [L].

$h_w$  = Nivel dinámico en el pozo respecto al nivel de referencia [L].

$h_o$  = Nivel piezométrico en reposo respecto al nivel de referencia [L].

$R$  = Radio de influencia (distancia donde el descenso es nulo) [L].

$r$  = Radio del pozo [L].

En el caso de un acuífero libre se emplea la expresión:

$$(h - h_w)^2 = (h_o - h_w)^2 (\ln(1/r))/(\ln(R/r))$$

Para aplicar el método (ver figura 2.16) se sigue el procedimiento:

a) El gradiente

$$i = \frac{(h - h_w)}{l}$$

b) A partir de la ecuación de Darcy la velocidad eficaz es:

$$V_e = \frac{Ki}{m}$$

Siendo:

$K$  = coeficiente de permeabilidad [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$m$  = porosidad cinemática, asimilable a la porosidad eficaz [adimensional].

c) La distancia correspondiente a un tiempo de tránsito  $t$  es:

$$E = v t$$

Se trata ahora de encontrar la distancia  $l$  para la cual el gradiente  $(i)$  posee un valor tal que, si se calcula la velocidad  $(v)$  y la distancia  $(E)$  correspondiente, se encuentran los mismos valores para  $(E)$  y para  $(i)$  (Moreno, L. y Martinez, C. 1991. pg. 102-103).

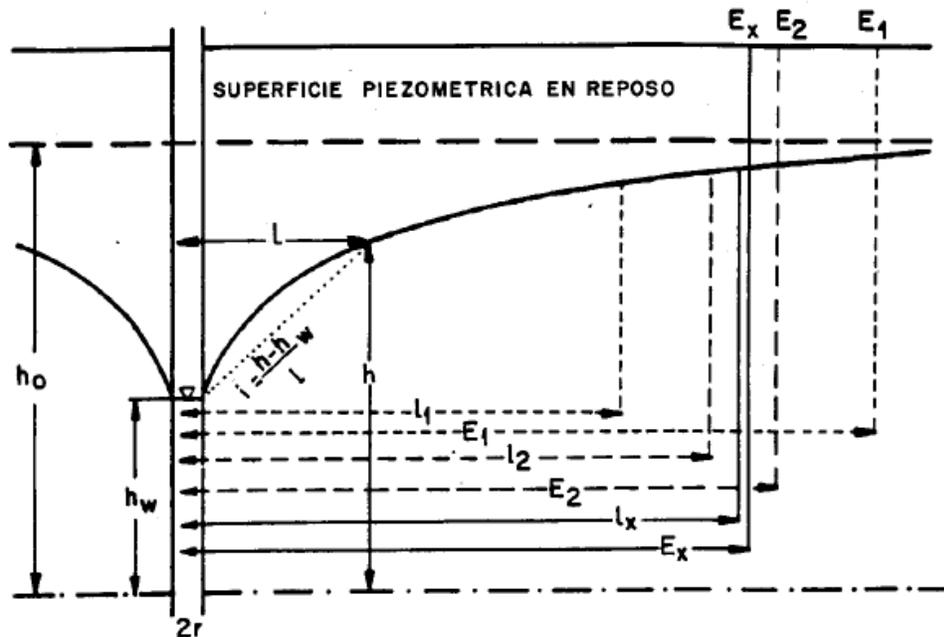


Figura 2.16. Determinación de las isocronas por iteración.

Fuente: Moreno, L. y Martinez, C. 1991

❖ **Radio fijo calculado (R.F.C.) “Función del descenso”**

Al usar este método se pretende definir el área en la cual se produce un descenso determinado del nivel piezométrico.

Para ello hay que emplear la ecuación de Theis para el estado transitorio, que es la siguiente:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

en la cual  $u$  es una función auxiliar cuyo valor es:

$$u = \frac{R^2 S}{4Tt}$$

Donde:

$d$  = Descenso en un punto situado a la distancia  $R$  de la captación [L].

$Q$  = Caudal de bombeo constante [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ].

T = Transmisividad [ $L^2 \cdot T^{-1}$ ].

R = Distancia a la captación [L].

S = Coeficiente de almacenamiento [adimensional].

t = Tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo [T].

Se define una función de pozo W (u) que corresponde a la integral:

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

Esta integral no tiene solución analítica y se ha resuelto por métodos aproximados. Se muestran en la tabla 2.20 los valores de W(u) y u.

**Tabla 2.20. Función del pozo W (u) (resumida).**

	K x 10 <sup>-14</sup>	K x 10 <sup>-12</sup>	K x 10 <sup>-10</sup>	K x 10 <sup>-8</sup>	K x 10 <sup>-6</sup>	K x 10 <sup>-4</sup>	K x 10 <sup>-2</sup>	K
1	31,6590	27,0538	22,4486	17,8435	13,2383	8,6332	4,0379	0,2194
1,5	31,2535	26,6483	22,0432	17,438	12,8328	8,2278	3,6374	0,1
2	30,7427	26,3607	21,7555	17,1503	12,5451	7,9402	3,3547	0,0489
2,5	30,5604	26,1375	21,5323	16,9272	12,322	7,7172	3,1365	0,02491
3	30,4062	25,9552	21,35	16,7449	12,1397	7,5348	2,9591	0,1305
3,5	30,2727	25,801	21,1959	16,5907	11,9855	7,3807	2,8099	0,00697
4	30,1549	25,6675	21,0623	16,4572	11,852	7,2472	2,6813	0,003779
4,5	30,0495	25,5497	20,9446	16,3394	11,7342	7,1295	2,5684	0,002073
5	30,8672	25,4444	20,8392	16,234	11,6289	7,0242	2,4679	0,001148
5,5	29,9542	25,3491	20,7439	16,1387	11,5336	6,9289	2,3775	0,0006409
6	29,8672	25,262	20,6569	16,0517	11,4465	6,842	2,2953	0,0003601
6,5	29,7872	25,182	20,5768	15,9717	11,3665	6,762	2,2201	0,0002034
7	29,7131	25,1079	20,5047	15,8976	11,2924	6,6879	2,1508	0,0001155
7,5	29,6441	25,0389	20,4337	15,8286	11,2234	6,619	2,0867	0,00006583
8	29,5795	24,9744	20,3692	15,764	11,1589	6,5545	2,0269	0,00003767

8,5	29,5189	24,9137	20,3086	15,7034	11,0982	6,4939	1,9711	0,00002162
9	29,4618	24,8566	20,2514	15,6462	11,0411	6,4368	1,9187	0,00001245
9,5	29,4077	24,8025	20,1973	15,5922	11,987	6,3828	1,8695	0,000007185

*Fuente: Moreno, L. y Martinez, C. 1991*

Para la gama de valores de  $u$  que interesen, elíjase el correspondiente  $u = k \times$  potencia de 10, y en la misma fila de los valores de  $k$  (que aparecen en la primera columna) se encontrarán, en la misma columna elegida, los valores correspondientes de la función de pozo  $W = (u)$  (Moreno, L. y Martinez, C. 1991. pg. 100-101)

## 2.14. MÉTODO DE RADIO FIJO CALCULADO (R.F.C.) “FUNCIÓN DEL TIEMPO DE TRÁNSITO”

### 2.14.1. Definición de factores

#### ➤ Caudal de bombeo ( $Q_b$ )

Un ensayo de bombeo es, en esencia, un método de análisis de los pozos de captación de aguas subterráneas y del acuífero en que se encuentran.

La metodología que se usa es simple consiste en bombear los pozos y sondeos, bien a caudal constante o bien a caudal variable, siendo la evolución del nivel del agua, debida al bombero, tanto en el mismo pozo de bombeo como en otros pozos cercanos cuando lo hubiese.

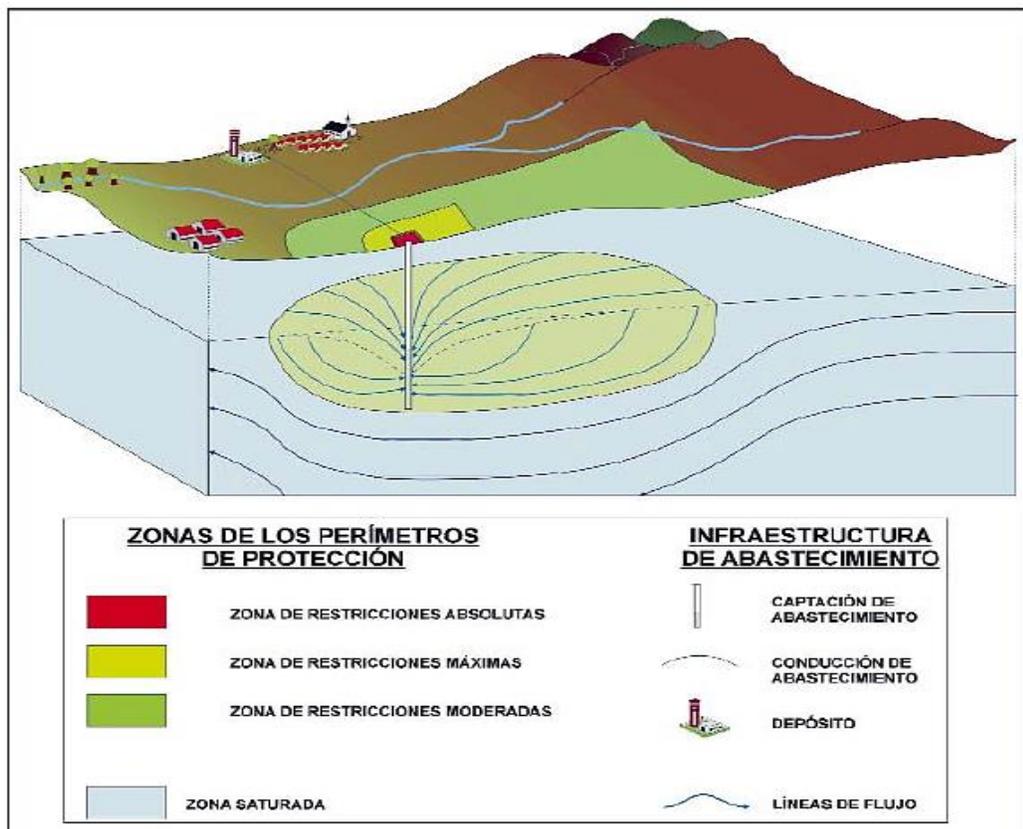
El estudio de las variaciones de los niveles es precisamente en lo que consiste el ensayo de bombeo y lo que permite obtener información, tanto sobre el pozo en sí como sobre las características y circunstancias del acuífero. Estas pruebas, respecto al pozo, pueden suministrar información sobre la calidad de construcción, pérdidas de carga por rozamiento de agua en las inmediaciones del mismo, e incluso sobre el caudal de bombeo más aconsejable y lugar dónde debe colocarse la bomba para un caudal determinado de explotación (Villanueva, M. y Iglesias, A. 1984. pg 17).

#### ➤ Tiempo de tránsito hasta la captación ( $t$ )

El criterio más empleado para la definición de perímetros de protección es el tiempo de tránsito que, como ya se analizó, fundamenta su mecanismo de acción en asegurar que antes de llegar el contaminante a la captación pasará un tiempo

suficiente para su degradación o inactivación. (Martinez, C. y García, Á. 2003. pg. 259).

En definitiva, el objetivo que se pretende con su aplicación es definir zonas alrededor de las captaciones con la suficiente amplitud para que el resultado de una actividad contaminante tarde en llegar a la misma un tiempo determinado que permita su degradación, o proporcione una capacidad de reacción que haga posible un cambio temporal en la fuente de suministro a la población, hasta que la degradación de la calidad de las aguas extraídas disminuya a límites aceptables (Martinez, C. y García, Á. 2003. pg. 48).



*Figura 2.17. Zonas a establecer en los perímetros de protección de la calidad para captaciones de abastecimiento urbano.*

*Fuente: Martinez, C. y García, Á. 2003.*

♦ **Zona inmediata o de restricciones absolutas:**

El criterio de delimitación suele ser un tiempo de tránsito de 1 día o un área fijada de forma arbitraria de pequeña extensión (100 a 400 m<sup>2</sup>). Estará vallada para impedir el acceso de personal no autorizado a las captaciones.

◆ **Zona próxima o de restricciones máximas:**

Se dimensiona generalmente en función de un tiempo de tránsito de 50 días, que permite proteger contra la contaminación microbiológica, utilizando también criterios hidrogeológicos. En algunos estudios no obstante se ha delimitado también empleando un criterio de descenso o de poder auto depurador del terreno.

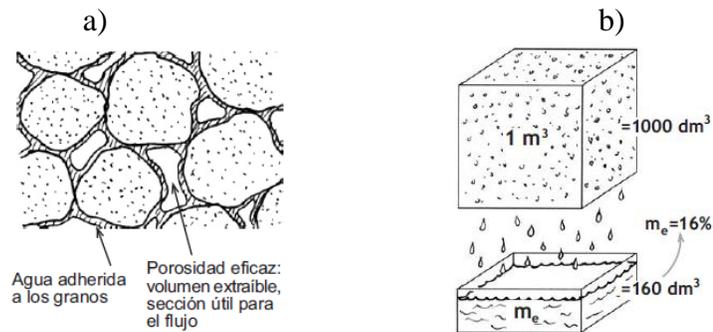
◆ **Zona alejada o de restricciones moderadas:**

El criterio más utilizado para su dimensionado es un tiempo de tránsito de varios años, criterios de tipo hidrogeológico o una combinación de ambos. Su objetivo es proteger la captación frente a contaminantes de larga persistencia.

El tiempo de tránsito empleado en esta zona de restricciones moderadas se ha definido frecuentemente en función de los focos potenciales de contaminación existentes en el entorno de la captación, y de las características hidrogeológicas del acuífero captado, empleándose valores muy dispares en el estudio. (Martinez, C. y García, Á. 2003. pg. 49-50)

➤ **Porosidad eficaz del acuífero ( $m_e$ )**

Se define la porosidad eficaz como el volumen de huecos disponible para el flujo respecto del volumen total. Aproximadamente son cantidades equivalentes: el agua que queda adherida a los granos y que no puede extraerse tampoco permite el flujo: En la figura 2.18 representamos en rayado el agua adherida a los granos (Sánchez, J. pg. 2).

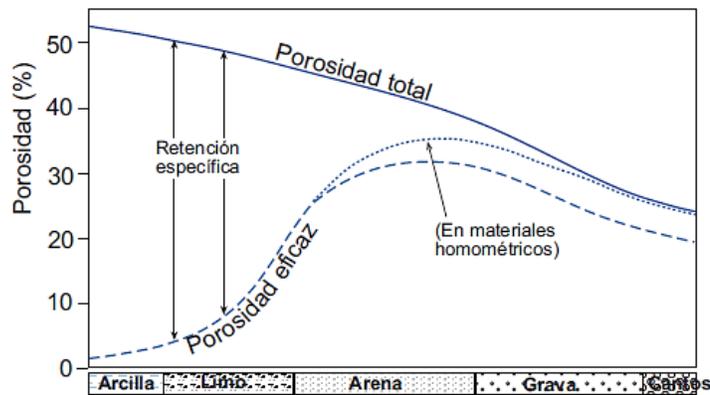


**Figura 2.18. a) El agua adherida a los granos no puede ser extraída y tampoco forma parte de la sección disponible para el flujo, b) Ejemplo de porosidad eficaz por drenaje.**

*Fuente: Sánchez J.*

En el caso de la porosidad intergranular, la porosidad total no depende del tamaño de grano (piénsese que el porcentaje de huecos en el dibujo anterior sería el mismo si lo reprodujéramos ampliado o reducido). En cambio, la porosidad eficaz sí se ve muy afectada por el tamaño de grano: si es más fino, la retención específica aumenta. En la figura 2.19 se muestra la variación de la porosidad total y eficaz en función de la granulometría para materiales no consolidados.

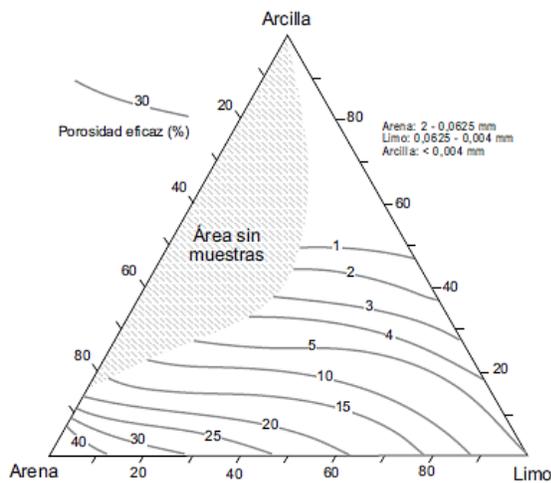
La porosidad total es máxima para las arcillas, pero la eficaz es casi nula. La “porosidad eficaz” aquí se refiere a specific yield (porosidad eficaz para drenaje).



**Figura 2.19. Variación de la porosidad con la granulometría en materiales detríticos no consolidados**

*Fuente: Sánchez J.*

También puede estimarse la porosidad eficaz en el triángulo arenas-limos-arcillas de la figura 2.20. En ambos gráficos, la “porosidad eficaz” se refiere a specific yield (porosidad eficaz para drenaje).



**Figura 2.20. Relación granulometría-porosidad eficaz**

*Fuente: Sánchez, J.*

La porosidad también puede estimarse mediante la expresión:

$$m = 0,255 (1 + 0,83u )$$

$$u = d_{60} / d_{10}$$

$d_{60}$ ,  $d_{10}$  = tamaños de grano por debajo de los cuales se encuentran el 60% y el 10% del peso del material. (Sánchez, J. pg: 4)

➤ **Espesor saturado en la captación (e)**

Todo el espesor del acuífero está saturado de agua y la presión de agua en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica.

Cuando se perfora un pozo en ellos, es decir, cuando el acuífero se pone en contacto con la atmósfera, el agua sube, por la perforación o pozo, quedando el nivel del agua por encima del punto en que el pozo alcanzó al acuífero (IGME. 2002. pg. 30).

## 2.15. MÉTODO DE WYSSLING

### 2.15.1. Definición de factores

➤ **Gradiente hidráulico (i)**

Gradiente es el incremento de una variable entre dos puntos del espacio, en relación con la distancia entre esos dos puntos. Si la variable considerada fuera la altitud de cada punto, el gradiente sería la pendiente entre los dos puntos considerados (Sánchez, J. Pg. 1<sup>10</sup>).

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Donde:

$\Delta h$  = Diferencia de Potencial entre A y B

$\Delta l$  = Distancia entre A y B

Basándose en mapas piezométricos puede determinarse la dirección del movimiento del agua subterránea y su pendiente (gradiente). El agua se mueve siempre en el sentido del gradiente, desde las zonas con mayor nivel piezométrico a las de menor nivel (IGME. 2002. pg .27).

---

<sup>10</sup> Artículo: Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Disponible: <http://hidrologia.usal.es>.

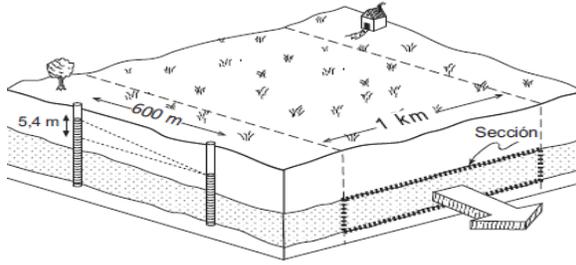


Figura 2.21. Ejemplo para evaluar el gradiente hidráulico

Fuente: Sánchez, J.

➤ **Caudal bombeado ( $Q_b$ )**

Se trata del mismo parámetro del anterior método dándonos a entender que este factor interviene y es importante al momento de calcular perímetros de protección.

No debe olvidarse el control del caudal de bombeo; es preciso medirlo con frecuencia, por ejemplo, cada media hora, efectuando las correcciones que sean necesarias para mantenerlo constante; durante la primera hora conviene controlarlo con mayor frecuencia (Custodio, M. y Llamas, M. R. 1976. Pg. 913).

➤ **Tiempo de tránsito ( $t$ )**

Se trata del mismo parámetro de anterior método, es un factor muy analizado y estudiado por los países europeos, en base a estos tiempos se crean limitaciones para proteger nuevas captaciones o zonas de recarga creando leyes que hagan cumplir las normativas para la protección de los pozos.

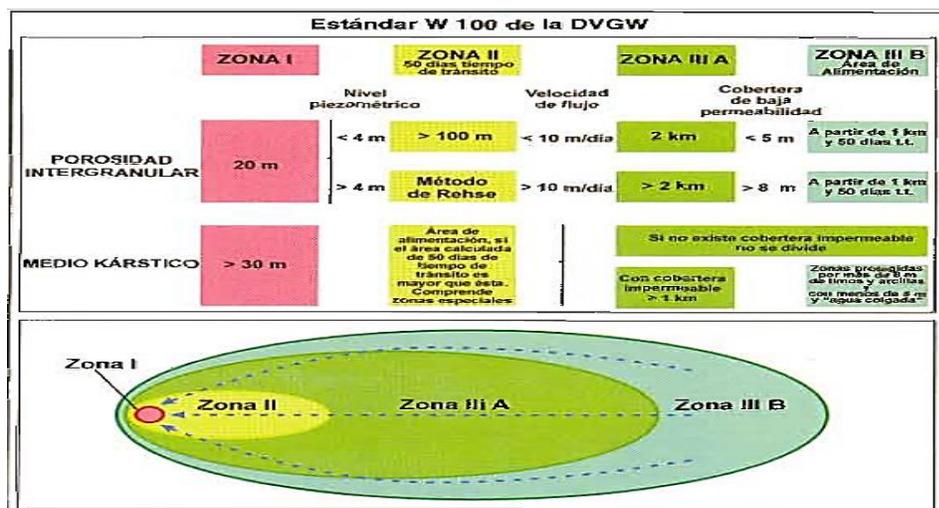


Figura 2.22. Desarrollo del estándar w 101 para la delimitación de perímetros de protección en Alemania.

Fuente: Martínez, C. y García, Á. 2003.

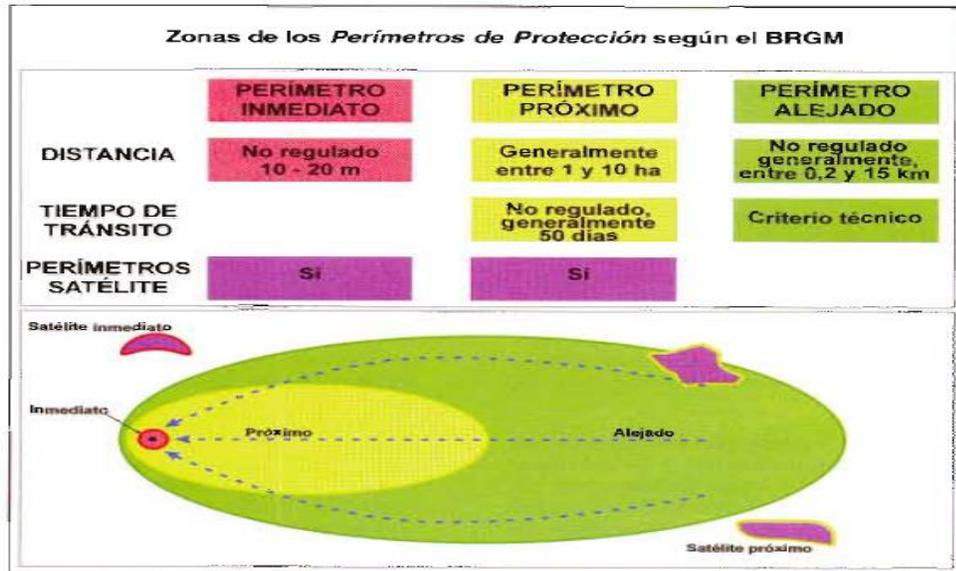


Figura 2.23. Recomendaciones del BRGM para delimitación de perímetros de protección en Francia.

Fuente: Martínez, C. y García, Á. 2003.

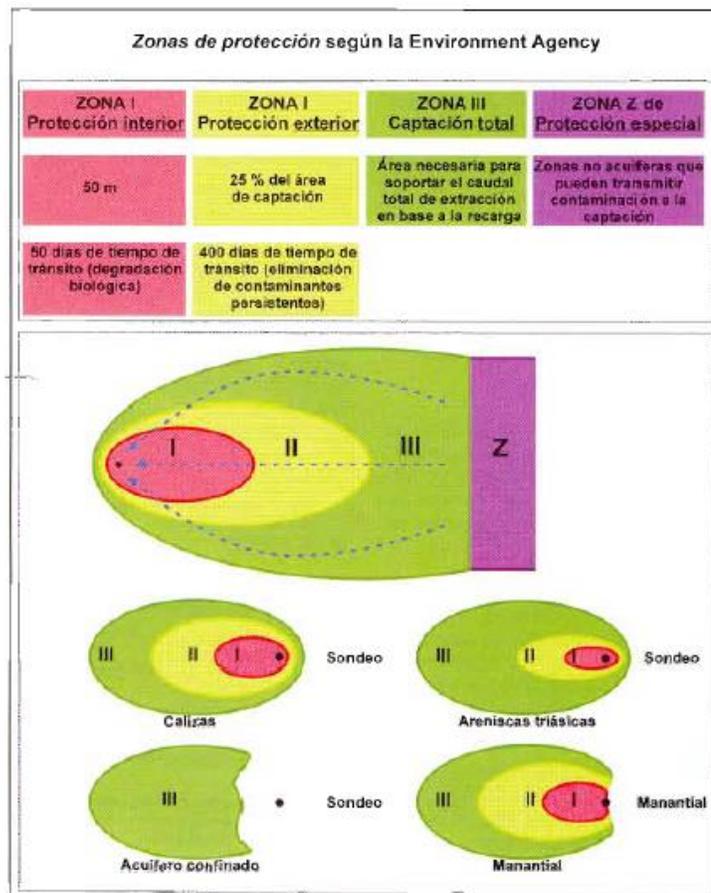


Figura 2.24. Recomendaciones del BRGM para delimitación de perímetros de protección en Reino Unido.

Fuente: Martínez, C. y García, Á. 2003.

➤ **Permeabilidad (K)**

En un medio estratificado, con frecuencia se produce el flujo a través de varias capas, y deseamos aplicar la ley de Darcy globalmente al conjunto de capas. Los dos casos más sencillos son cuando consideramos el flujo paralelo a los contactos entre las capas o el flujo perpendicular a las capas.

Suponemos que cada una de las capas es homogénea e isótropa. Permeabilidad (o conductividad hidráulica) equivalente es un valor global que podemos asignar al conjunto de capas considerado como una unidad. Y hablaremos de K equivalente horizontal ( $K_h$ ) o K equivalente vertical ( $K_v$ ) refiriéndonos respectivamente a los dos casos citados (suponiendo las capas horizontales, el flujo paralelo a las capas es horizontal, y el flujo perpendicular a las capas es vertical) (Sánchez, J. pg: 5<sup>11</sup>).

El espesor del acuífero y la porosidad eficaz son los mismos del anterior método.

## **2.16. CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS**

Los diferentes grados de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de una región determinada pueden expresarse en forma de mapas que permiten una representación sencilla e intuitiva de su variabilidad espacial, siendo especialmente útiles en los procesos de planificación de territorio. Los mapas de vulnerabilidad, por tanto, son un medio para mostrar de forma integrada y comprensible la distribución espacial de propiedades hidrogeológicas complejas.

En el proceso de planificación territorial, los mapas de vulnerabilidad permiten programar medidas de protección sobre las áreas definidas como más vulnerables y reglamentar para estas zonas los usos que comporten un menor riesgo. En definitiva, los mapas de vulnerabilidad son un instrumento fundamental para conseguir un desarrollo humano y medioambiental sostenible. Los mapas de vulnerabilidad se representan generalmente por medio de áreas de diferente color, o escalas grises, que simbolizan diferentes grados de vulnerabilidad (o protección natural respectivamente).

Sin embargo, existen también limitaciones, ya que algunos métodos son algo subjetivos y proporcionan solamente una aproximación cualitativa. A lo largo de estos últimos años, la

---

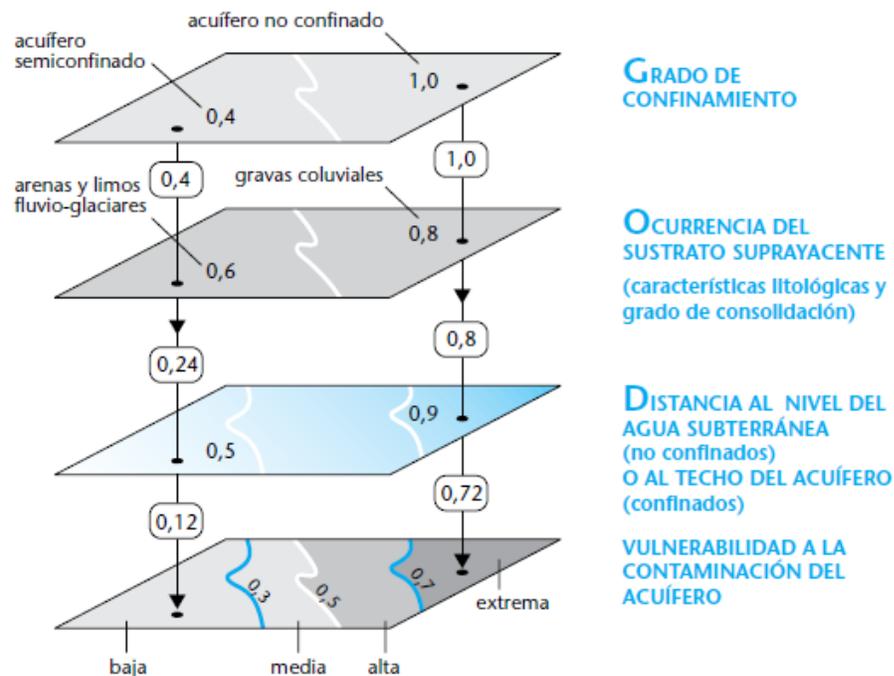
<sup>11</sup> Artículo: Ley de Darcy. Conductividad hidráulica. Disponible: <http://hidrologia.usal.es>.

necesidad de mejorar la ordenación y gestión territorial ha propiciado el desarrollo de diferentes métodos para evaluar la vulnerabilidad<sup>12</sup> (Montoro, María. J. 2009. pg 140).

### 2.16.1. Aplicación de un sistema de información geográfica

La generación del mapa del índice de vulnerabilidad de acuíferos GOD sigue el procedimiento indicado en la figura 2.25. Tal proceso puede ser desarrollado manualmente pero cada vez más se utiliza la tecnología de SIG (Sistemas de Información Geográfica).

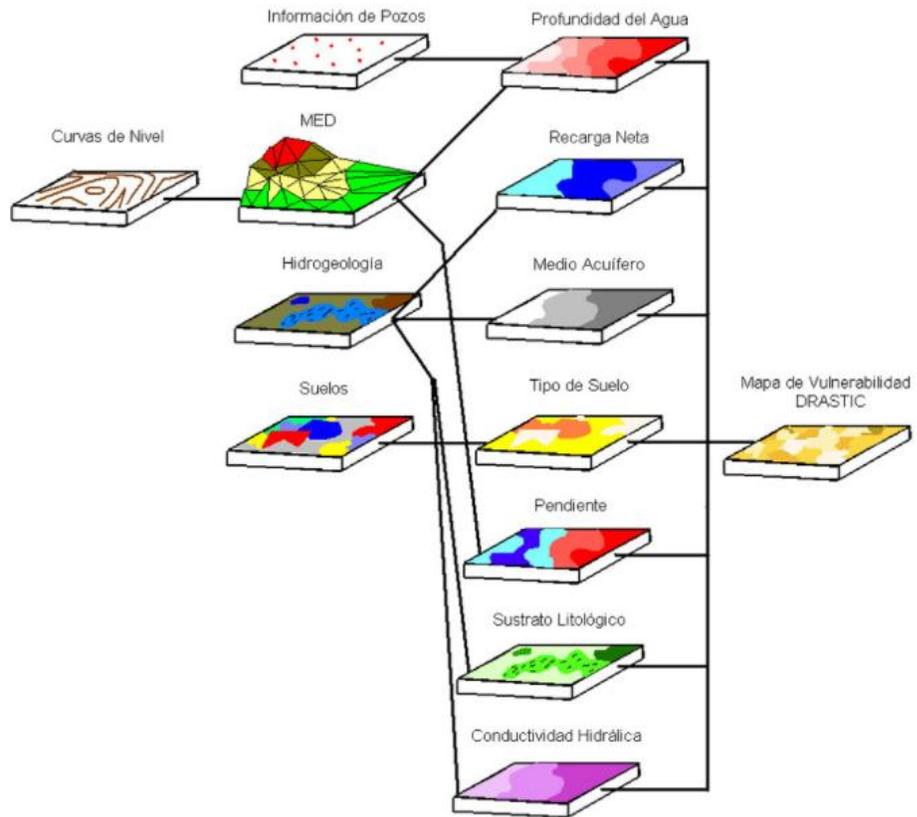
Para realizar la evaluación de la vulnerabilidad con la metodología propuesta, se podrá contar, en la mayoría de los casos, con mapas hidrogeológicos y/o informes sobre los recursos hídricos subterráneos, los cuales generalmente contienen adecuada información básica. Sin embargo, frecuentemente es necesario complementar esta información con el estudio directo de mapas geológicos y registros de perfiles de perforaciones y en algunas ocasiones con inspecciones limitadas de campo. (Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003 pg: 32).



**Figura 2.25. Generación del mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos utilizando el método GOD**

*Fuente: Foster, S.; Hirata, R. et al. 2003*

<sup>12</sup> Citado por Voigt et al 2004



**Figura 2.26. Descripción esquemática del método DRASTIC**  
**Fuente: Agüero, J. y Pujol, R**

# **CAPÍTULO**

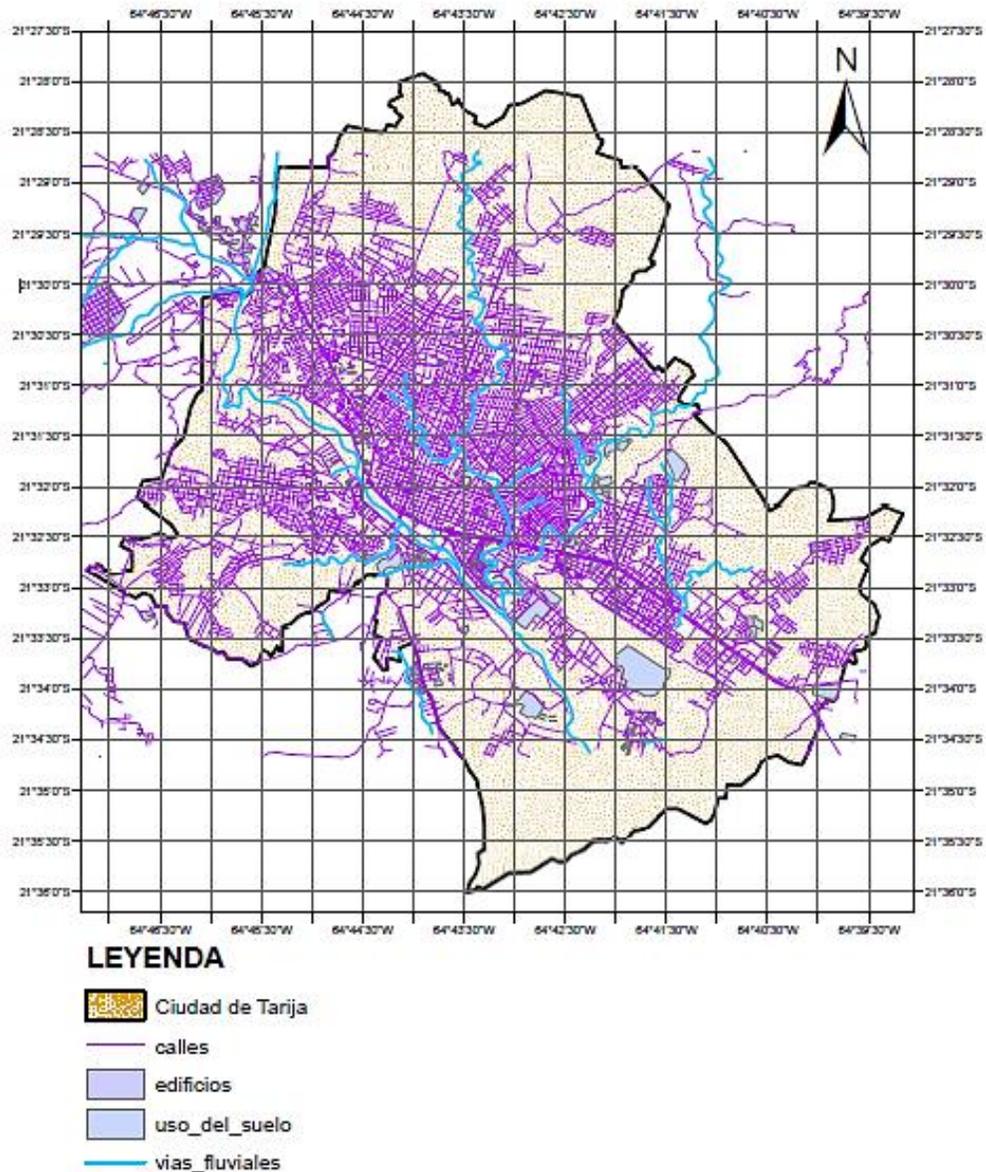
## **III**

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca gran parte de la ciudad de Tarija y los lugares donde exista pozos en concesión de COSAALT. R.L., la provincia Cercado está específicamente en las coordenadas geográficas latitud Sur: 21° 31' 17" longitud Oeste: 64° 43' 41" con una altitud aproximada a 1876 m.s.n.m. municipio de Tarija.



*Figura 3.1. Identificación del área de estudio*

*Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por GeoBolivia.*

### **3.1.1. Características principales del área de estudio**

#### **➤ Geología**

En las serranías que circunda el área de estudio, se diferencian dos unidades morfoestructurales; la Cordillera de los Andes y la faja Sub andina.

La cordillera de los Andes está representada principalmente por la serranía de Sama y sus estribaciones más orientales más orientales de rumbo general N-S, compuestas principalmente por rocas de la base del paleozoico.

La faja sub andina se encuentra en el sector más oriental del área estudiada y se caracteriza por sus serranías de variedad altitud y estratigráficamente heterogéneas de orientación general N-S.

El área de rocas aflorante son principalmente sedimentarias; así el paleozoico se inicia con una secuencia de areniscas cuarticias bien fracturadas del cámbrico y de la formación Iscayachi (base de ordovícico) bien representada en la cordillera de Sama.

Siguiendo una secuencia política y posteriormente presenta conglomerados de la base del carbónico, para pasar areniscas duras bien fracturadas y niveles de diamictitas.

La potencia de paleozoico en el área es aproximadamente 7000 m. de espesor (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg.15).

#### **➤ Hidrología**

El sistema hidrográfico del departamento de Tarija, está definido por redes de drenaje y un régimen de escurrimiento, que son claramente diferenciados e íntimamente relacionados con la fisiografía de la Cordillera Oriental, el Sub andino y la Llanura Chaqueña.

El drenaje principal, está constituido por los cursos de los ríos San Juan del Oro, Camblaya, Pilaya, Pilcomayo, Grande de Tarija y Bermejo, cuyos afluentes dentro del departamento, son generalmente de corto recorrido y de reducidos caudales (Vacaflores, A. 2008. pg. 4).

➤ **Climatología**

El tiempo promedio que se registra para la ciudad de Tarija según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la gestión actual 2022 y 2021, se conservaron registrando una temperatura máxima promedio de 26° C y una mínima de 16°C, con una concentración de lluvias empezando desde el mes de diciembre de 2021 a marzo de la gestión actual.

➤ **Precipitación**

Una particularidad de la cuenca es el aumento de precipitación que se tiene en la serranía de Sama, aumentando hacia el sur y disminuyendo hacia el norte, coincidiendo con la disminución de la altura de la serranía.

En el resto de la cuenca y hacia el centro de la misma donde la pendiente ya no es tan pronunciada, la precipitación tiende a igualarse oscilando entre 600 y 700 mm/año (Rivera, I. 1997 pg. 5-6).

➤ **Evapotranspiración.**

Un factor muy importante en la estimación de los recursos hídricos, es la evapotranspiración, pues este constituye en algunos casos hasta el 90 % de la precipitación.

Para poder estimarla cantidad de agua que se pierde por ese factor, primero se calculó la evapotranspiración potencial con la fórmula de Thorthwaite. Que utiliza como variable principal la temperatura media mensual y la latitud a la que se encuentra la zona de estudio.

En base a estas estimaciones se concluyó que en las partes bajas de la cuenca y hacia el centro y este de la misma la evapotranspiración casi no varía. En cambio, tanto en la sub cuencas de los ríos Tolomosa y Victoria, la cantidad de agua evapotranspiración disminuye con el aumento d la altura.

Para la parte central de la cuenca se estimó una  $ET_p$  de 580 mm/año en los sectores bajos (Vacaflores, A. 2008. pg. 6-7).

### 3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que se presenta en este trabajo es de tipo descriptiva, donde recopilaremos y describiremos el comportamiento de las variables, puntualizando el análisis en cada uno de ellos.

La recopilación de los datos se centrará principalmente en valores encontrados en estudios actuales y los valores determinados años anteriores, utilizándolas como herramientas de observación de las variables.

### 3.3. DETERMINACIÓN DE VARIABLES

En la tabla 3.1, se describen las variables dependientes.

*Tabla 3.1. Determinación de las variables.*

VARIABLE DEPENDIENTE	Herramienta	Tamaño de la Dimensión	Orientación
<b>Grado de Vulnerabilidad de las Aguas Subterráneas</b>	GOD	Ocurrencia del acuífero (G)	Características litológicas, niveles piezómetros, hidrogeología.
		Litología de la zona vadosa (O)	Tipo de textura de los materiales más predominantes.
		Nivel de la profundidad del agua (D)	Profundidad del agua
	DRASTRIC	Nivel de la profundidad del agua (D)	Profundidad del agua
		Recarga que recibe el acuífero (R)	Aportaciones que recibe el acuífero de manera directa a la fuentes.
		Estructura de medio del acuífero (A)	Características del material, espesores permeables o impermeables en zonas cercanas a la distancia de perforación.
		Tipo de suelo en la superficie (S)	Características del material cerca de la superficie.
		Topografía del terreno (T)	Orientación paralela al suelo, dirección que pueden tomar las aguas.
		Naturaleza de la zona no saturada (I)	Material característico, espesores predominantes con un tipo de textura.
		Conductividad hidráulica (C)	Capacidad de transmisión de las aguas en función al tipo de material.
	AVI	Esesor de cada capa sedimentaria (d)	

	E <sub>kv</sub>	Conductividad hidráulica (C)	
		Esesor de la zona sub saturada (d)	
Perímetros de Protección de los Pozos	Radio Fijo "en función de tiempo de tránsito"	Permeabilidad vertical (K <sub>v</sub> )	
		Caudal bombeado (Q)	
		Tiempo de tránsito (t)	
		Porosidad eficaz del acuífero (m <sub>e</sub> )	
	Wyssling	Esesor saturado en la captación (H)	
		Gradiente hidráulico (i)	
		Caudal bombeado (Q)	
		Permeabilidad (K)	
		Porosidad eficaz (m <sub>e</sub> )	
		Esesor del acuífero (b)	
Tiempo de tránsito (t)			
Velocidad eficaz (V <sub>e</sub> )			

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### ▪ Población

Todo el sistema acuífero que se encuentra en las formaciones geológicas de la zona urbana ciudad de Tarija.

#### ▪ Muestra

Para este trabajo se consideraron como muestra todos los pozos que están en concesión de COSAALT R.L. ubicados en la ciudad de Tarija consecuentemente toda la información disponible, datos recopilados de anteriores investigaciones relacionados con el tema.

### 3.5. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Para la parte de visualización se utilizará del software ArcGis, para el análisis de datos de geometría el programa Civil 3D, para referencia la ayuda del Google Earth.

### 3.6. LIMITACIONES

Los resultados obtenidos serán producto del análisis de los datos más cercanos a los lugares puntuales, por lo que la situación que pase entre distancia entre pozo a pozo se asumirá una correlatividad de la información disponible.

## CAPÍTULO IV

### 4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN ACTUAL Y ANTECEDENTES REGIONALES.

##### ❖ Investigación de aguas subterráneas del valle central de Tarija (1979-1980).

Se estableció una red de observación seleccionando pozos excavados y perforados representativos. En particular se seleccionaron los pozos ya controlados por CODETAR antes del proyecto, lo que permitió la recolección de datos de un largo periodo. A esta lista se sumaron progresivamente los pozos perforados por el proyecto. Se observó periódicamente el nivel estático en los pozos de excavación. Se indica a continuación el número de puntos controlados (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg.7):

Pozos excavados 78

Pozos perforados no surgentes 22

Pozos surgentes 27

*Tabla 4.1. Pozos del proyecto resultados de prueba de bombeo y de flujo.*

Nº	N.E (m)	TRANSMISIVIDAD (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL (l/s)	ABATIMIENTO (1) (m)	CAPACIDAD ESPÉCIFICA (1) (l/s/m)	ESPESOR ACUÍFERO (m)	PERMEABILIDAD (m/d)	OBS
T-1	12,75	18	1,47	6,56	0,22	13	1,4	B
T-2	9,4	1,5	0,52	20	0,02	16	0,07	
T-3	26,35	20	1,8	8,8	0,2	46	0,4	B
T-4	1,78	180	2,24	1,28	1,75	21,5	8,6	B
T-5	30,5	497	11,1	3,6	3,08	33	15	
T-6	21,9	117	6,25	11	0,57	18	6,5	
T-8	4,36	110	10,7	16	0,7	22	5	B
T-10	20,46	300	9,1	6	1,52	43	7	
T-11	12,81	54	2,3	6,5	0,36	77	0,7	
T-12	9	53	3,9	21,6	0,18	9	5,9	
T-13	7,22	68	6,7	23,28	0,29	74	0,9	
T-14	1,5	163	19,6	17,4	1,13	36	4,5	
T-15	7,8	120	10	13,75	0,73	71	1,7	
T-16	12	51	1,66	12	0,14	17	3	
T-17	14,8	10,5	2,2	24	0,093	75	0,1	
T-18	24,67	192	7,3	7,3	1	32	6	B
T-19	14,71	105	15,4	10,4	1,48	41	2,6	B
T-20	39,59	195	6,8	8,5	0,8	43	4,5	
T-22	29,5	136	11,8	11,08	1,06	39	3,5	
T-23	7,86	2,5	1,55	30,7	0,05	54	0,05	
T-24	23	18	3,4	28	0,12	19	1	
T-25	41,53	6	0,61	7,35	0,08	16	0,4	
T-27	5,25	50	4,3	16	0,27	39	1,2	

T-28	28,63	153	6,3	6	1,05	51	3	
------	-------	-----	-----	---	------	----	---	--

Fuente: CODETAR – Naciones Unidas. 1980.

**Tabla 4.2. Prueba de bombeo en pozos de CODETAR y otros organismos**  
(Pozos no ejecutado por el proyecto).

N°	N.E (m)	TRANSMISIVIDAD (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL (l/s)	ABATIMIENTO (1) (m)	CAPACIDAD ESPECÍFICA (1) (l/s/m)	ESPESOR ACUÍFERO (m)	PERMEABILIDAD (m/d)	OBS
PC-49		225	6,2	5,62	1,1	12	28	
PC-16		28	0,5	5	0,1	12	2,3	
PC-55	9,2	223	2,87	2,19	1,3	20	11	
PC-38	8,46	9	1,82	19,54	0,09	3	3	
PC-57	6	186	18,2	34,73	0,52	50	3,7	
PC-58	9	218	26,2	28,8	1	51	4,3	
PC-32	17	128	13,9	17,37	0,8	41	3,1	
PC-1	40	5,5	0,8	11,2	0,06	45	0,1	
PC-60	25,35	202	8,5	14,4	0,59	61	3,3	

Fuente: CODETAR – Naciones Unidas. 1980.

(\*) = Valor estimado.

(1) = Valor determinado por 24 hrs. de bombeo.

B = Pozo perforado hasta el basamento paleozoico.

La superficie de la cuenca es de 3256 km<sup>2</sup> en los que 1005 km<sup>2</sup> están cubiertos por depósitos cuaternarios de origen fluvio-lacustre, que representan formando llanuras, terrazas fluvio-lacustres y conos aluviales.

El curso principal es el Guadalquivir que nace a 3400 m. de altura en la serranía de Sama, siguiendo una dirección NO-SE con una longitud de 70 km.

La historia geológica reciente ha ocasionado la fuerte pendiente del cauce actual (2,5%) la misma que disminuye aguas arriba de la zona donde aflora el basamento paleozoico, factor que permite dividir la cuenca en tres partes:

- ✓ Alta o norte, hasta el angosto de Tomatitas.
- ✓ Central, hasta el angosto de San Luis.
- ✓ Baja o sur, hasta la angostura (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg.13).

#### ➤ Hidrología

##### ◆ Clima

En general se puede indicar que el clima es benigno, con temperaturas medias en el invierno de 13°C y 21°C durante el verano.

Las precipitaciones alcanzan una media de 711 mm/año para la cuenca y 608 para la estación de Tarija y se concentran en el periodo de noviembre – marzo. Los índices de aridez, humedad e hídrico global, que han permitido definir un clima “sub húmedo seco” para el valle central de Tarija (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg.18).

◆ **Precipitación**

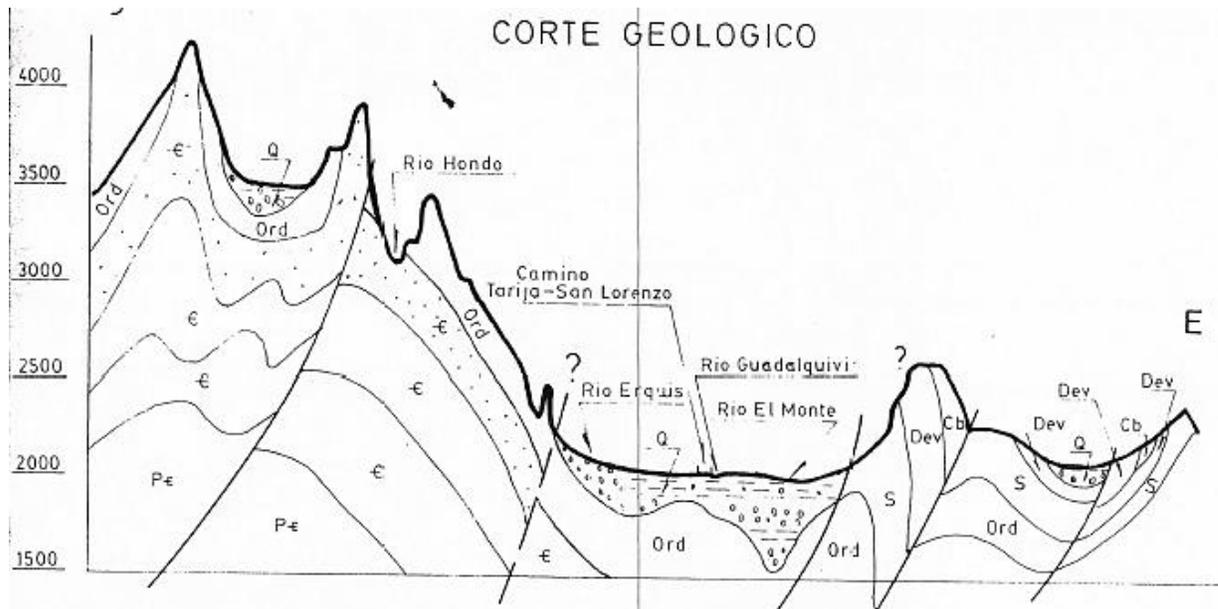
La precipitación media de toda la cuenca es de 711 mm. y hasta la estación hidrométrica la Angostura considerada prácticamente como el límite de la cuenca es de 720 mm.

Se puede apreciar que la isoyeta sigue aproximadamente la orientación del río Guadalquivir, y que divide la cuenca en dos zonas pluviométricas, la primera coincidente con el margen derecho del Guadalquivir, de altas precipitaciones que permita apreciar un aumento de la lluvia con la altura hasta alcanzar los máximos de 1250 mm. coincidentes con Tucumillas - Calderas y la segunda, que gran parte cubre la margen izquierda con precipitaciones que bajan hasta 350 mm. (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg:18).

➤ **Hidrogeología**

◆ **Propiedades hidrogeológicas de las formaciones paleozoica**

De acuerdo a la descripción efectuada en el anterior capítulo, las formaciones paleozoicas se orientan en estructuras anticlinales y sinclinales conformando serranías que constituyen el límite de la cuenca Guadalquivir (figura 4.1). De estas formaciones solamente el cámbrico y la base del ordovícico son de interés hidrogeológico por estar constituidas en gran mayoría por areniscas cuarcíticas y cuarcitas, alcanzan un espesor de más de 600 m. Estas formaciones cambro-ordovícicas funcionan como acuíferos de permeabilidad secundaria debido al grado de fisuración (fallas y diaciasas) y de alteración, tal como se puede apreciar en la serranía de Sama de donde procede gran parte del flujo base de los ríos (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg.49).



Referencias:

Q = Cuaternario.      Cb = Carbónico.      Esc H = 250.000: V = 25.000  
 Dev = Devónico.      S = Siluro.  
 Ord = Ordovícico.      € = Cámbrico.  
 P€ = Precámbrico.      ⤵ Falla

**Figura 4.1. Formaciones paleozoicas de valle central de Tarija.**  
 Fuente: CODETAR – Naciones Unidas. 1980.

#### ♦ Los acuíferos cuaternarios

Los depósitos cuaternarios (anexo 1) que rellenan la cuenca del Guadalquivir, de las cuales los depósitos aluviales (terrazas abanicos y cauces del río), depósitos coluviales y algunos depósitos fluviolacustres, son de interés hidrogeológico por su comportamiento como zonas de recarga y como formaciones acuíferas.

Estas formaciones acuíferas constituyen:

- ✓ Una zona de acuífero libre común en las zonas de recarga.
- ✓ Un acuífero confinado, en toda la parte central de la cuenca.
- ✓ Acuíferos freáticos, a lo largo de los ríos principales.

El acuífero confinado y los acuíferos freáticos están en conexión hidráulica directa con la zona del acuífero libre común. El acuífero libre

común y el confinado conforman el acuífero principal del Valle Central de Tarija.

Cabe también hace referencia a las pequeñas capas acuíferas lenticulares intercaladas a poca profundidad en los depósitos lacustres que actúan posiblemente como acuíferos semiconfinado (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg:49-50).

◆ **Extensión**

El acuífero libre común se extienden las zonas altas de la sub cuenca de Tolomosa, la Victoria, Calama, Guadalquivir, Sella, Santa Ana y Camacho, es decir en la parte oeste, norte y sur de la cuenca.

Hacia el este y sur de esta zona el acuífero libre se transforma en confinado al estar las formaciones permeables cubiertas por sedimentos lacustres impermeables que se extienden en toda la parte central de la cuenca.

La profundidad de los horizontes acuíferos principales aumenta al incrementar distancia de las zonas de recarga, por ejemplo: 56 m en el pozo T-16 ubicado en la ciudad de Tarija, 70 m. en el pozo T-12 de San Luis.

En la parte central del valle, la profundidad es aún mucho mayor, alcanzando los 122 y 164 m. en los pozos de T-18 de la Tablada y T-8 de Morros Blancos. El valor es similar en la parte baja de la del Valle del río Camacho con 150 m en el pozo T-27 de Concepción (anexos 1), y se puede ser mayor de 182 m en Santa Ana de existir una capa acuífera sobre el basamento lo que no se pudo probar con la geofísica (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg.50-51).

◆ **Espesor.**

En la parte central del Valle de Guadalquivir el espesor del acuífero confinado parece muy variable generalmente entre los 30 y 70 metros según el estudio geofísico. (CODETAR – Naciones Unidas. 1980. pg.51).

❖ **Evaluación del Grado de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Ciudad de Tarija y Zonas Aledañas “Convenio Alemán Boliviano de Aguas Subterráneas” (CABAS).**

La metodología de este trabajo fue en dar una clasificación según la geología y geomorfología creando unidades que muestren una misma uniformidad para después dividir al valle central de Tarija por según las características que presentan, para después aplicar el método de DRASTIC.

Las características para las diferentes unidades son las siguientes:

- **B1:** En los bordes del relleno cuaternario se formaron al pie de las quebradas y ríos que bajan de las serranías que rodean a la cuenca algunos conos de deyección. Las uniones de algunos de estos dieron como resultado la formación de una llanura aluvial de pie de monte.

Ejemplos típicos de estas llanuras se pueden observar en la sub cuenca del río Tolomosa en los alrededores de las comunidades de San Andrés y Tablada Chica.

Estas acumulaciones se caracterizan por presentar relieve moderadamente bajo de forma ondulada con pendiente inclinada y de longitud corta. El grado de dirección es bajo. Su característica principal es su alta permeabilidad que permite una buena infiltración.

- **B2:** Al pie de las serranías que rodean el valle de Tarija se encuentran depósitos de material heterogéneo acumulados por acción fluvial combinada con la acción de la gravedad.

Estos se caracterizan por su mayor permeabilidad y mayor resistencia a la erosión. Estos depósitos pueden observarse alrededor de toda la cuenca y constituyen los conos de deyección.

El relieve de esta unidad es moderadamente alto de aspecto masivo y con pendientes moderadamente escarpadas de formas rectas y longitudes corta. La densidad de drenaje en esta unidad es media.

- **B3:** El relieve que predomina en esta unidad es moderadamente bajo de forma casi plana, la pendiente es moderadamente inclinada de forma recta y longitud larga en dirección norte-sur. El diseño de drenaje dendrítico con una densidad

muy alta y textura ultrafina. El escurrimiento superficial es difuso por las características del material de los sedimentos la pleistocenos. La infiltración a lo largo de los diferentes causes de agua es baja debido también a la predominancia de materiales finos.

Esta unidad puede ser apreciada en casi todos los lugares de la cuenca, desde San Mateo al norte hasta las cercanías del estrecho de San Luis en su caracterizadas por cárcavas y formaciones en algunos lugares de “bad lands” producto de la erosión diferencial.

- **B4:** Caracterizada por tener un relieve bajo de forma plana, con una poca pendiente, el escurrimiento superficial tiene una forma dendrítica y una densidad media.

Los procesos modeladores de esta unidad se deben a la acción fluvial agradacional y degradacional combinado, que forma terrazas aluviales a lo largo de los causes de los ríos principalmente en el río Guadalquivir. La abundancia de riego y humedad que se tiene en las zonas aledañas de los ríos es aprovechada para una intensa actividad agrícola que tiene detiene el avance de la erosión en estas áreas.

Las localidades donde se puede observar este tipo de paisaje se extiende tiene en los bordes de los ríos; zonas como San Lorenzo, San Luis, Tomatitas son ejemplos típicos de esta unidad

- **B5:** En la cuenca alta del río Guadalquivir existen planicies que sostienen a lo largo de los bordes del río Guadalquivir. Estas extensas planicies fueron formadas por la acción de degradacional de los ríos y quedaron como terrazas fluviales.

El relieve de esta unidad y bajo de forma recta con pendiente casi plana, el escurrimiento superficial tiene una forma dendrítica y su densidad media, el escurrimiento superficial es difuso en dirección al río Guadalquivir. La infiltración en esta zona es de baja a media debido a la predominancia de sedimento fino alterándose con gravas ocasionalmente.

Las localidades de este tipo de unidad se encuentran en las zonas de Tablada y lo que constituye la laguna artificial de San Jacinto. La otra terraza existente es la que se encuentra frente a San Lorenzo y que es cruzada por el camino hacia Sella (Ramírez, I. 1997. pg.11-12).

En el año 1997 en base a la información existente se determinó lo siguiente:

**Tabla 4.3. Resultados de la aplicación del método DRASTIC en el proyecto CABAS.**

Zona	Extensión	Unidad	Permeabilidad	Vulnerabilidad a la Contaminación
Llanura aluvial de Pie de monte y conos deyección	Pie de serranías que rodean la cuenca	B1, B2	Alta	Moderado
Llanura de acumulación de material pelítico	Parte del relleno cuaternario	B3	Baja	Bajo
Terrazas extensas y de mayor desarrollo	Terraza 1, se extiende por barrio tablada, tablada Grande y San Jacinto. Terraza 2, San Lorenzo y camino a Sella.	B5	Buena	Bajo
Terrazas de menor extensión de menor desarrollo	Bordes del río Guadalquivir (San Blas, San Luis y Tomatitas)	B4	Buena	Bajo

*Fuente: Elaboración propia, con ayuda del documento del proyecto CABAS.*

#### ❖ **Determinación de las principales áreas de recarga de agua subterránea en el Valle Central de Tarija.**

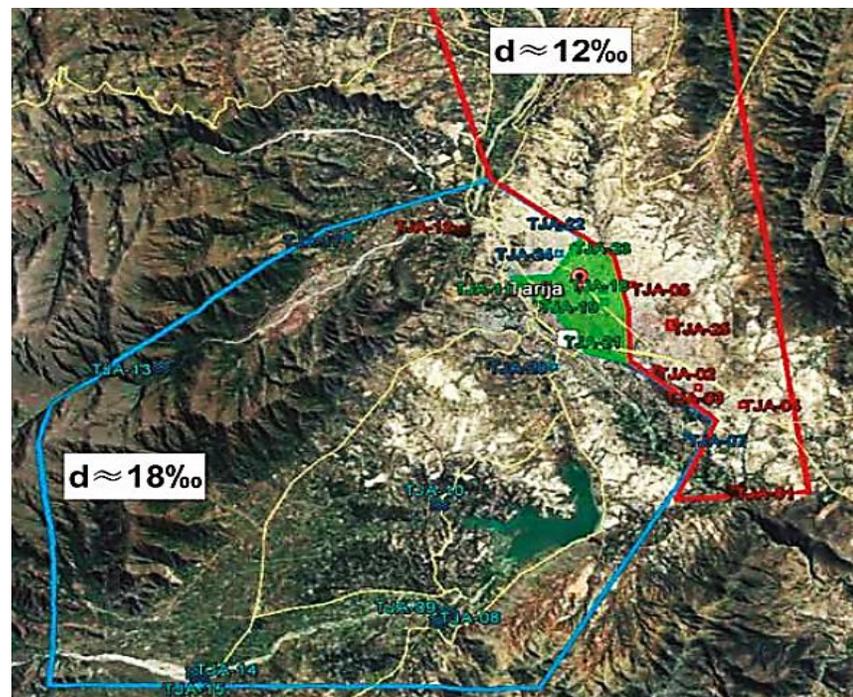
El espesor del acuífero en el Valle Central de Tarija es de 220 m., pero su espesor se disminuye en el sector de piedemonte. La porosidad eficaz estimada es de 7%, la transmisividad hidráulica es de 200 m<sup>2</sup>/d y el valor de permeabilidad es de 10-5 m/s El río Guadalquivir actúa como nivel base del agua subterránea.

##### ➤ **Investigaciones mediante dataciones isotópicas.**

Para entender el origen y la dinámica del agua subterránea en el valle de Tarija, el Programa PERIAGUA ha efectuado, entre los años 2014 y 2018, mediciones isotópicas. Para ello, las y los asesores técnicos de Programa tomaron muestras para análisis de isótopos estables ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ), tanto de pozos de producción de agua, como de cauces superficiales. También fueron realizadas las dataciones de muestras para  $^{14}\text{C}$  con determinaciones de  $^{13}\text{C}$ , esto ayudó al entendimiento de la hidrodinámica del sistema de agua subterránea, sobre todo en los acuíferos más profundos. Finalmente se realizaron determinaciones de Tritio ( $^3\text{H}$ ) para aguas

recientes y que se han recargado después del año 1950 (Torrez, J. et al. 2020. pg: 36).

- ◆ **Lluvia tropical del norte (valores  $d \approx 18$  por mil)**, estas precipitaciones llegan de nubes que se originan de la evaporación de agua, provenientes de grandes cuerpos del recurso, es decir, probablemente del sector amazónico y que luego originan lluvias muy abundantes (1.000-1.200 mm/año) en la época de verano y en especial en el sector de piedemonte del valle de Tarija. Estos valores se producen en los pozos TJA-18, TJA-19, TJA-20 y TJA-21.
- ◆ **Lluvia del sur (valores  $d \approx 12$  por mil )**, proveniente desde el sector sur y que origina lluvias de mucha menor cantidad, mayormente en la época de invierno, lo que genera una cierta recarga de agua subterránea en la parte baja de la cuenca de Tarija. Estos valores se han encontrado en los pozos TJA-02, TJA-03, TJA-04, TJA-05 y TJA-25, como también en las muestras obtenidas del río Guadalquivir (TJA-01, TJA-16) (Torrez, J. et al. 2020. pg. 37).



*Figura 4.2. Potenciales áreas de recarga de agua subterránea según el exceso de deuterio Tarija. Fuente: Torrez J. et al. 2020.*

También existe un área central (en verde), donde los pozos de extracción (TJA-11, TJA- 18, TJA-19 y TJA-21) bombean agua subterránea, cuya extracción proviene de ambas áreas de recarga (piedemonte de Sama y Rincón de La Victoria). Es decir, es un producto de mezcla de agua entre ambas áreas (Torrez, J. et al. 2020. pg. 38).

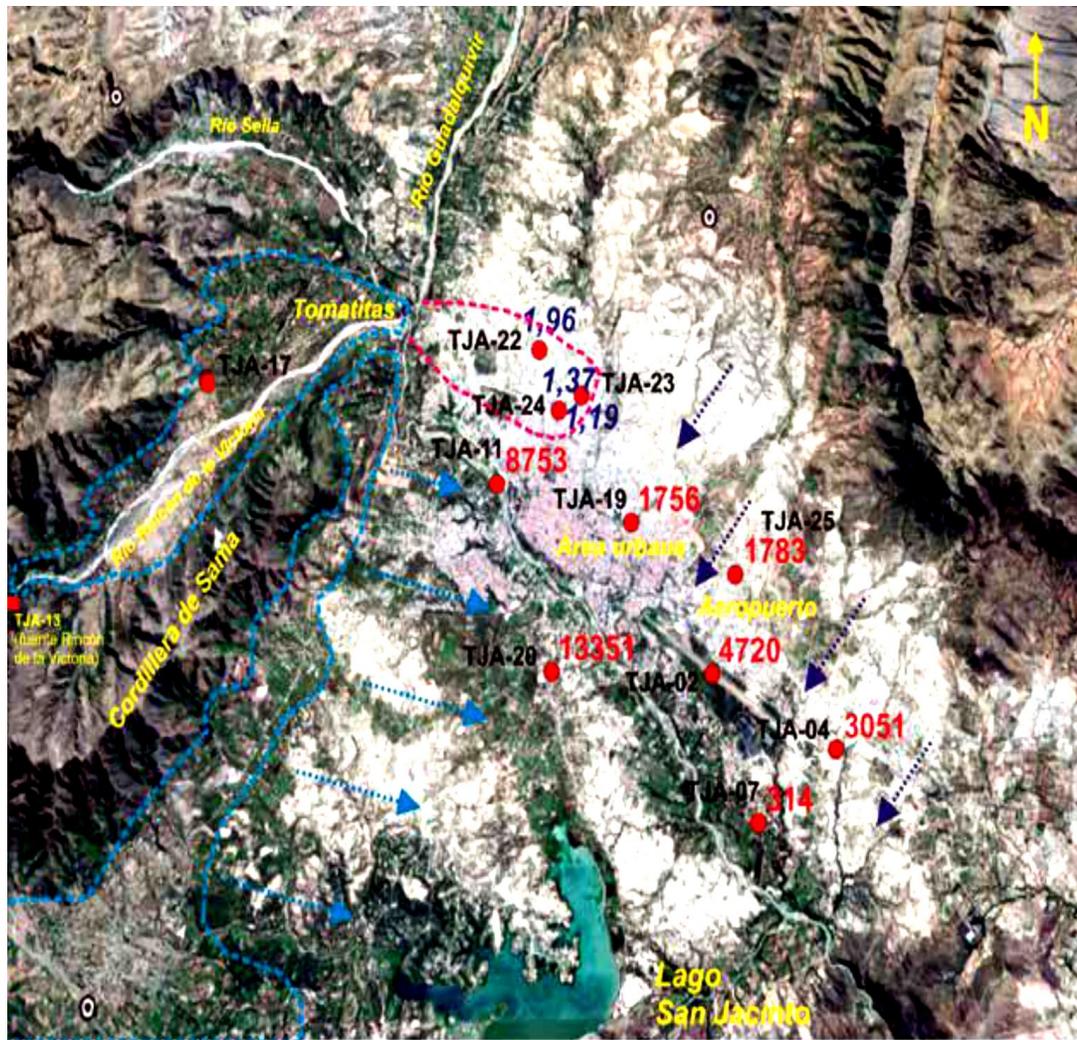
➤ **Recarga de agua subterránea - interpretación de los valores de Tritio ( $^3\text{H}$ ), Carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ) y  $^{13}\text{C}$ .**

En la figura 4.3 se muestra la distribución de estos valores, como también la dirección de flujo preferencial del agua subterránea. Existen algunos pozos, ubicados en el sector norte del área urbana de Tarija, que han mostrado la presencia de agua relativamente joven y contenidos de tritio importantes (pozos TJA-22, TJA-23 y TJA-24).

En el pozo TJA-22 (135 metros de profundidad) se han obtenido valores de tritio de 2 TU (Unidades Tritio), como también valores de 14C de 100 pMC (porcentaje de carbono moderno). El valor de 13C se ubica en -16,20 (por mil) y la conductividad eléctrica es de 62  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos valores plasman el claro indicio de aguas jóvenes y un tiempo medio de renovación del agua subterránea de unos 50 años, con una tasa de recarga media de unos 190 mm por año.

En el pozo TJA-24 (122 metros de profundidad), el valor de tritio se ubica en las 1,4 TU, el valor de 14C es de 83,5 pMC y los valores de 13C se encuentran en los -15,20 (por mil). En el caso del pozo TJA-23 (122 metros de profundidad), la muestra da un contenido de tritio de 1,1 TU, un contenido de 14C de 82,3 pMC y un 13C de 14,70(por mil). Esto demuestra que el tiempo medio de renovación del agua subterránea sea de unos 40 años y una tasa de recarga de unos 220 mm por año.

También se ha podido constatar que en el sector central del área urbana de Tarija existe una recarga de unos 200 mm/año de agua subterránea, lo que corresponde a, aproximadamente, 1/3 de las precipitaciones. Con estos valores se podría estimar que, en estas áreas, es decir en una superficie de unos 20  $\text{km}^2$  (5km x 4km), se produce una recarga aproximada de  $4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  de agua subterránea.



**Figura 4.3.** Distribución espacial de las edades 14C del agua subterránea, como también los valores de tritio (TU). Direcciones de circulación del agua subterránea del sector norte y oeste, como también áreas de recarga preferencial del área de piedemonte – Tarija, 2018.

*Fuente: Torrez J. et al. 2020.*

Hacia el centro y sudeste de la ciudad, los pozos (TJA-19, TJA-25, TJA-02 y TJA-04) tienen edades 14C del agua subterránea muy elevadas (entre 1.700 y 4.700 años).

Esto hace suponer que la recarga se produce en el sector norte del valle de Tarija (ver dirección de las flechas azules en la figura 4.3) y circula desde este lugar en dirección sur, con velocidades de circulación de 0,4 a 0,6 metros por año (muy bajas). También se ha podido constatar que las capas sedimentarias que actúan como acuíferos presentan porosidades de 7% (considerablemente menores al resto de los acuíferos de mayor potencial).

Con toda esta información, y considerando que el frente de recarga es de unos 8.000 metros y la potencia de los acuíferos de 200 metros, la recarga a estos acuíferos es de unos 45.000 m<sup>3</sup> de agua por año. Este es un volumen de agua

Por el contrario, en el sector de piedemonte de la serranía de Sama, al oeste del río Guadalquivir, probablemente existe un potencial de recarga de agua subterránea importante (delimitado con líneas punteadas azules en la figura 4.3).

Esta área tiene una superficie de infiltración estimada de unos 20 km<sup>2</sup>, lo que podría representar una recarga adicional de unos 4×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de agua subterránea por año (considerando una recarga anual de 200 mm, y que es equivalente a la cantidad de agua producida en la cuenca del rincón de La Victoria).

El pozo TJA-20 tiene una edad 14C superior a los 13.000 años, lo que supone que esta agua proviene de áreas alejadas, que se ubican en el sector de piedemonte de la serranía de Sama. El pozo TJA-11, ubicado en inmediaciones del río Guadalquivir, también presenta edades 14C muy elevadas (8.753 años), lo que indican que el recurso es proveniente igualmente de áreas alejadas.

Sin embargo, es muy probable que este pozo contenga agua de mezcla y que se recargue de aguas subterráneas provenientes del sector noroeste (en cierta época del año) y del sector suroeste (en otra época). Tampoco se descarta la posibilidad de que exista recarga del río Guadalquivir, especialmente en aquellos momentos donde es bombeado con intensidad. (Torrez, J. et al. 2020. pg: 39-40-41).

#### ➤ **Balance hídrico**

En el área urbana de la ciudad de Tarija, se ha calculado que los pozos de producción extraen un caudal anual de unos 6×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de agua subterránea (correspondiente al 40% de la producción total de agua y que es de 15×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año).

Mediante dataciones isotópicas, se ha podido determinar que la recarga natural de la lluvia en el área norte y central de Tarija es de 4×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año. Con este valor de recarga, el balance hídrico se encuentra actualmente equilibrado, lo que asegura la disponibilidad de agua subterránea para el abastecimiento sostenible a la ciudad de Tarija.

Existe un área muy importante de recarga, que se encuentra ubicado en el sector de piedemonte de la Cordillera de Sama, al oeste del río Guadalquivir (marcado con líneas punteadas azules en la figura 4.3. En este lugar se recargan anualmente  $4 \times 10^6 \text{ m}^3$  de agua.

Se puede afirmar que, incluso bajo condiciones de cambio climático adversas en el futuro (por ejemplo, disminución de las precipitaciones), la provisión de agua subterránea, a través de pozos, es sostenible para la ciudad de Tarija.

Sin embargo, es importante tener en cuenta la ubicación de los futuros pozos, como también la producción de agua que estos deben bombear (Torrez, J. et al. 2020. pg. 41).

❖ **Determinación de parámetros hidrogeológicos de los pozos “Stadium, Morros Blancos y Villa Fátima”**

El trabajo se realizó para estimar los parámetros a través de pruebas de bombeo de los pozos que tenían adicionalmente un pozo de observación, donde los resultados son los siguientes:

*Tabla 4.4. Parámetros hidrogeológicos “Stadium, Morros Blancos y Villa Fátima”*

PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS E HIDRAULICOS	POZO DE STADIUM	POZO DE MORROS BLANCOS	POZO DE VILLA FÁTIMA
TRANSMISIVIDAD ( $\text{m}^2/\text{d}$ )	268,55	205,03	120,78
COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO	$2,31 \times 10^{-3}$	$5,77 \times 10^{-5}$	$11,76 \times 10^{-3}$
RADIO HIDRAULICO (m)	117,56	119,94	67,59
PERMEABILIDAD HIDRAULICA (m/d)	4,008	5,86	2,42

*Fuente: Tacacho G. 2019.*

Otras características:

◆ **Pozo Stadium**

El espesor saturado del acuífero = 67 m.

Tipo de acuífero = Semiconfinado.

◆ **Pozo de Morros Blancos.**

El espesor saturado del acuífero = 35 m.

Tipo de acuífero = Confinado.

◆ **Pozo de Villa Fatima.**

El espesor saturado del acuífero = 50 m.

Tipo de acuífero = Semiconfinado.

(Tacacho G. 2019. pg. 42;48;55)

#### **4.2. ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA OCURRENCIA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CIUDAD DE TARIJA**

Se quiere demostrar por zonificación y caracterización de los acuíferos la división del área de estudio en sub áreas caracterizadas por presentar similares características hidrogeológicas, basado en la litología, niveles freáticos, parámetros hidrogeológicos.

El rio Guadalquivir como la quebrada el Monte conforman parte del área de estudio por lo que servirán de referencia para los pozos más cercanos a estos.

La bibliografía, datos e información recolectada se describieron en el anterior punto. En principio se adoptaron los siguientes criterios:

- **Litología:** Tiene más redundancia la zona no saturada, caracterizada por considerar que a mayor presencia de material permeable nos encontramos con acuíferos libres o semiconfinados analizando los distintos espesores de los materiales, por lo que, si nos encontramos con suelos más finos arcillas, limos estos son característicos de acuíferos confinados.

Los materiales más finos ejercen presión sobre la zona saturada lo que causan que a gran profundidad de excavación el nivel del agua suba hacia la superficie por lo que se convierten en pozos confinados emergentes.

- **Profundidad del nivel de agua:** Al crear el nivel piezómetro con las distancias de profundidad de los pozos desde la superficie del terreno, en dirección en la que fluye las aguas del subsuelo, esto nos permite ver la relación entre la profundidad de los pozos con una zona caracterizada por ser la de descarga.

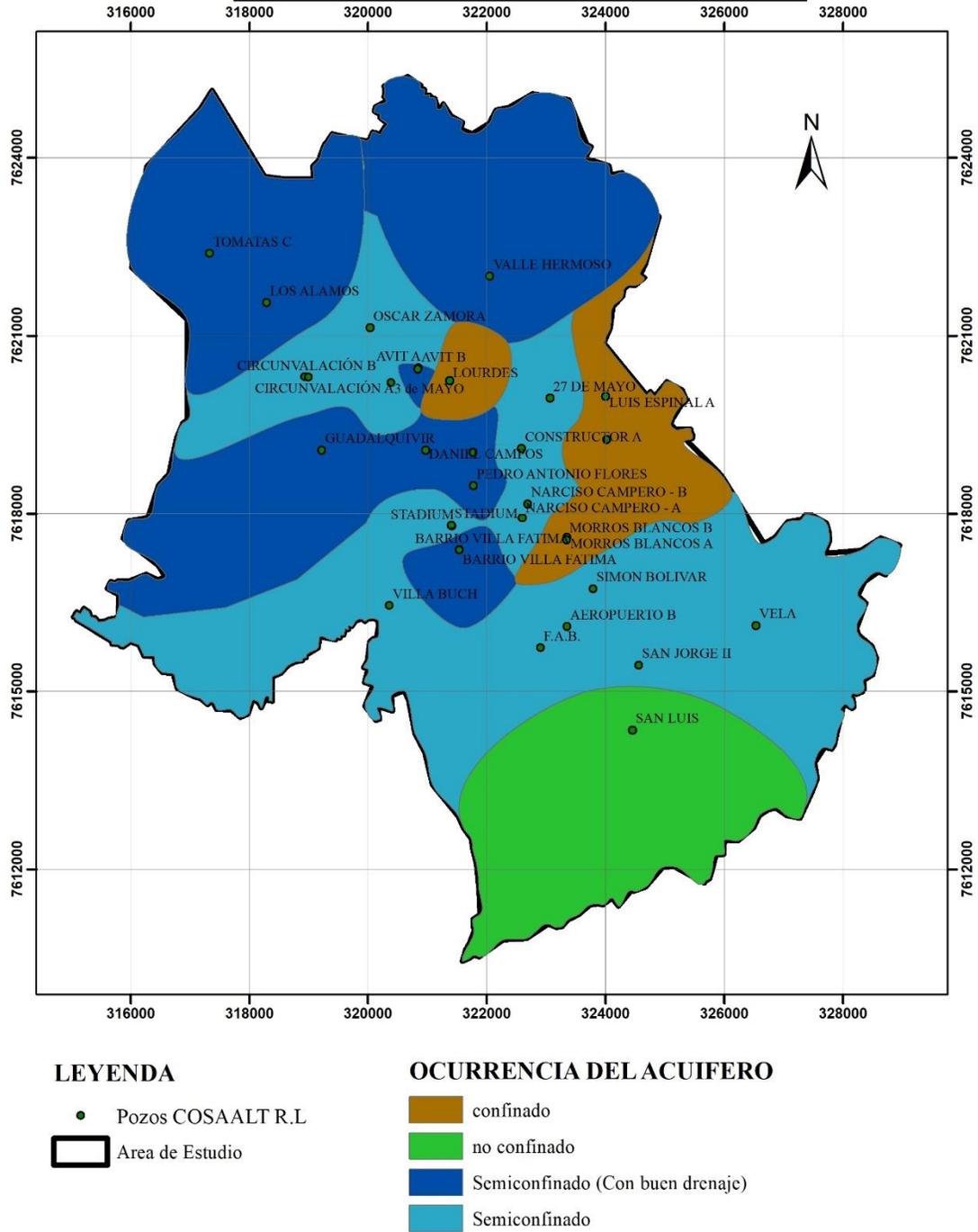
Otra relación puede existir entre la distancia de la profundidad del agua a la superficie del suelo, esto significaría dos cosas que se trata de un acuífero libres o de pozos surgentes, este último punto tiene mucha relación con el tipo de suelo en la zona no saturada.

Con pruebas de bombeo se puede ver observar los conos de deyección o abatimientos los descensos son rápidos, pero en acuíferos confinados tiene una lenta recuperación tardan en estabilizarse, para los acuíferos libres sucede lo contrario.

- **Parámetros hidrogeológicos:** Se refiere a la relación del coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y abatimientos que son característicos de acuíferos confinados o libres.
- **Datación de las aguas:** Se consideran que las aguas con mayor edad tienen una circulación del flujo muy lenta esto se puede interpretar que las formaciones de suelos finos característicos de acuíferos confinados.

Entonces las líneas de flujo que se encuentran a más profundidad tiene una mayor datación lo que significa velocidades bajas presencia de material fino, en cambio las de menor edad, las aguas se renuevan rápidamente y circulan por material permeable característico de acuíferos libres.

# OCURRENCIA DEL ACUÍFERO



*Figura 4.4. Ocurrencia de las aguas subterráneas del Área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.*

### **4.3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE LOS POZOS QUE ESTÁN BAJO LA CONCESIÓN DE COSAALT R.L. Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS**

La información más actual sobre los parámetros hidrogeológicos es de tres pozos por la limitante de que no se cuenta con pozos de observación para las demás fuentes.

Comparando los resultados de permeabilidad obtenidos de los tres pozos en la gestión 2019 tienen algo de relación con los resultados del estudio de 1979, haciendo una media ponderada con los datos de la tabla 4.1 en la zona del pozo T-16 donde caen los pozos M. blancos, Villa Fátima y Stadium la permeabilidad es de 3 m/d.

Si consideramos hacer otra media ponderada con solo los tres parámetros y como delimitación el área de estudio, las distancias de estos pozos son muy próximos por lo que para las zonas más alejadas no existe un cambio en este parámetro, por lo que se utilizara los datos del estudio de 1979 para todos los pozos excepto para los tres que cuentan con datos más recientes.

### **4.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL GRADO DE VULNERABILIDAD**

Con toda la información recolectada se determinan las características de cada parámetro para después darle su valoración correspondiente, se explicará de donde se obtuvo cada parámetro para aplicar el método.

#### **4.4.1. Método GOD**

En la tabla 4.5 se reflejan de manera resumida la condición de cada parámetro, donde se consideró lo siguiente:

- ❖ **Ocurrencia del acuífero:** Resultado de la zonificación descrita en el anterior punto.
- ❖ **Litología de la zona no saturada:** Se tomó como prioridad los materiales más representativos de la zona, analizado desde los perfiles litológicos de la información entregada por la entidad de COSAALT R.L.
- ❖ **Profundidad del nivel de agua:** En la ciudad de Tarija se tiene un clima semiárido por lo que contamos de una época de lluvias que empieza en octubre y termina más o menos en abril seguido empieza la época de estiaje hasta el mes de septiembre, entonces se puede notar un cambio entre estas dos estaciones, las variaciones del nivel

freático (anexo 3) son notables en época seca y húmeda. Entonces para este parámetro se analizó el caso más desfavorable, la distancia más corta a la superficie.

**Tabla 4.5. Parámetros para la aplicación del método GOD.**

N°	POZO	G	O	D (m)
1	27 DE MAYO	semiconfinado	arcillas, limos aluviales, arenas aluviales y gravas	63,4
2	3 de MAYO	semiconfinado	arcillas, arenas aluviales, gravas	22,2
3	AEROPUERTO B	semiconfinado	arcillas, arenas aluviales	31,01
4	AVIT A	semiconfinado	arenas aluviales y gravas	42
5	AVIT B	semiconfinado (Con buen drenaje)	gravas, arena aluviales	30,3
6	CIRCUNVALACIÓN A	semiconfinado	arena aluviales y arcillas	36,35
7	CIRCUNVALACIÓN B	semiconfinado	arena aluviales y arcillas	27,9
8	CONSTRUCTOR A	semiconfinado	arcillas, arenas aluviales, gravas	59,6
9	DANIEL CAMPOS	semiconfinado (Con buen drenaje)	arcillas, arenas aluviales, gravas	30,9
10	F.A.B.	semiconfinado	arcillas, arenas aluviales	38
11	GUADALQUIVIR	semiconfinado (Con buen drenaje)	arenas aluviales, arcillas y gravas	5,8
12	LOS ALAMOS	semiconfinado (Con buen drenaje)	areniscas y formaciones ígneas	27,3
13	LOURDES	confinado	limo aluviales, loess	33,8
14	LUIS ESPINAL A	confinado	arcillas , limos y arenas aluviales, gravas	50
15	MONTECRISTO (PN)	confinado	arcillas y limos aluviales y gravas	55
16	MORROS BLANCOS A	confinado	arcillas, limo aluviales, loess, grava y arenas	54
17	MORROS BLANCOS B	confinado	arcillas, limo aluviales, arenas fluviales y grava	53
18	NARCISO CAMPERO - A	semiconfinado	arcillas, gravas coluviales	33,9
19	NARCISO CAMPERO - B	semiconfinado	arcillas, arenas aluviales, gravas	33,9
20	OSCAR ZAMORA	semiconfinado	arenas aluviales y gravas	12,7
21	PEDRO ANTONIO FLORES	semiconfinado (Con buen drenaje)	arenas aluviales y gravas	36,4
22	SAN BERNARDO B	semiconfinado (Con buen drenaje)	arcillas, gravas coluviales	34,8
23	SAN JORGE II	semiconfinado	arcilla, arenas aluviales y gravas	25,7
24	SAN LUIS	no confinado	arenas aluviales y arcillas	2,75
25	SIMON BOLIVAR	semiconfinado	arcillas, limo aluviales, gravas	42,6

26	STADIUM	semiconfinado	limo aluviales, loess, gravas	17,6
27	STADIUM	semiconfinado	arcillas, limo aluviales, gravas	17,7
28	TOMATAS C	semiconfinado (Con buen drenaje)	gravas coluviales y arenas	11,7
29	VALLE HERMOSO	semiconfinado (Con buen drenaje)	arenas aluviales, limos, formaciones ígneas	36,9
30	VELA	semiconfinado	arcillas, arenas aluviales, gravas	75
31	VILLA BUCH	semiconfinado	arcillas, limos aluviales y gravas	16,9
32	VILLA FATIMA A	semiconfinado (Con buen drenaje)	arcillas, gravas y limos	14,45
33	VILLA FATIMA B	semiconfinado (Con buen drenaje)	arenas aluviales, arcillas y gravas	14,5

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: G: Tipo de confinamiento del acuífero, O: El material más predominante de la zona no saturada, D: Profundidad a la que se encuentra el nivel de agua desde la superficie en época de estiaje.

#### 4.4.2. Método DRASTIC

- ❖ **Profundidad del nivel del agua:** Parámetro ya definido en el anterior método.
- ❖ **Recarga neta:** Se analizó la recarga neta a partir de dos metodologías una totalmente empírica a través de fórmulas propuestas (Mander y Shiftan, Cheeturvedi).

El segundo a través del método “Fluctuación del Nivel Freático” o llamado también “Variación de Nivel del Freático”, desarrollando la estimación con los registros de nivel estático y precipitación de las gestiones “2019-2020” y “2020-2021” esto se debe a que se tiene registros del año completo.

Las estaciones con las que se trabajó son: El Aeropuerto (ASSANA), E Tejar, San Jacinto Sud, Turumayo y Coimata, estaciones más próximas al centro de la ciudad y por lo tanto reflejan el comportamiento en las zonas donde están las fuentes de abastecimiento (pozos).

**Tabla 4.6. Precipitación media anual “Periodo 2019-2020”**

METODO ISOYETAS (2019-2020)					
Nº	Pp min. (mm)	Pp máx. (mm)	Promedio (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	(A*Pp media)
1	420,54	424,06	422,30	0,14	58,47
2	424,17	473,29	448,73	17,96	8.059,75
3	473,31	526,93	500,12	46,74	23.376,56
4	526,96	589,50	558,23	19,97	11.146,75
5	589,53	652,04	620,78	7,71	4.788,02

6	652,07	716,87	684,47	5,42	3.709,36
7	716,88	783,82	750,35	4,28	3.211,81
8	783,91	853,13	818,52	2,18	1.785,42
9	853,66	871,46	862,56	0,16	140,20

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 4.7. Precipitación media anual “Periodo 2020-2021”**

<b>METODO ISOYETAS (2020-2021)</b>					
<b>N°</b>	<b>Pp.min. (mm)</b>	<b>Pp.max. (mm)</b>	<b>Promedio (mm)</b>	<b>área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>(A*Pp media)</b>
1	473,01	504,69	488,85	23,00	11.243,04
2	504,69	562,27	533,48	47,87	25.539,30
3	562,28	619,79	591,03	18,46	10.907,94
4	619,87	677,41	648,64	5,42	3.516,27
5	677,50	734,97	706,24	4,26	3.007,77
6	735,06	792,61	763,84	3,09	2.361,28
7	792,76	850,23	821,50	1,90	1.556,92
8	850,31	906,31	878,31	0,57	502,49

*Fuente: Elaboración propia.*

Sabemos que la precipitación media anual por el método de Isoyetas es igual:

$$Pp = \frac{1}{A_T} \sum (Pp_i * A_i)$$

Donde:

$A_T$ = Área total de estudio en km<sup>2</sup>.

$Pp_i$ = Promedio de precipitación entre dos isoyetas en mm.

$A_i$ = Área entre dos isoyetas en km<sup>2</sup>.

$\sum (Pp_i * A_i)$  =Producto entre la precipitación y su área correspondiente.

Datos:

$A_T$ = 104,57 km<sup>2</sup>.

$$\sum (Pp_i * A_i) = (422,30 * 0,14) + (448,73 * 17,96) * \dots = \mathbf{56.276,33}$$

$$\sum (Pp_i * A_i) = (488,85 * 23) + (533,48 * 47,87) * \dots = \mathbf{58.635,01}$$

Entonces:

$$Pp_{2019-2020} = \frac{1}{140,57} \sum (56.276,33) = \mathbf{538,19 \text{ mm}}$$

$$Pp_{2020-2021} = \frac{1}{140,57} \sum (58.635,01) = \mathbf{560 \text{ 74 mm}}$$

La porosidad eficaz o rendimiento específico se asignó según el tipo de material.

Aplicando la fórmulas empíricas tenemos:

1) Datos:

$P_{p2019-2020} = 538,19 \text{ mm/año}$ .

$P_{p2020-2021} = 560,74 \text{ mm/año}$ .

$$r_{2019-2020} = 0,9(538,19 - 360) = \mathbf{160,37 \text{ mm/año}}$$

$$r_{2020-2021} = 0,9(560,74 - 360) = \mathbf{180,67 \text{ mm/año}}$$

$$r = \frac{160,37 + 180,67}{2} = \mathbf{170,52 \text{ mm/año}}$$

Es posible suponer con los datos que se tiene que la recarga neta anual a través de la fórmula de Mander y Shiftan es de 170,52 mm/año.

2) Datos:

$P_{p2019-2020} = 538,19 \text{ mm/año}$ .

$P_{p2020-2021} = 560,74 \text{ mm/año}$ .

$$r_{2019-2020} = 50,8 \left( \frac{538,19}{25,4} - 15 \right)^{0,4} = \mathbf{105,32 \text{ mm/año}}$$

$$r_{2020-2021} = 50,8 \left( \frac{560,74}{25,4} - 15 \right)^{0,4} = \mathbf{111,12 \text{ mm/año}}$$

$$r = \frac{105,32 + 111,12}{2} = \mathbf{108,22 \text{ mm/año}}$$

Con la segunda fórmula podemos conocer con los datos que tenemos, que se presentó una posible recarga neta de 108 mm/año.

Aplicando el método Variación de Nivel del Freático tenemos:

**Tabla 4.8. Variaciones del nivel freático “Periodos (2019-2020) (2020:2021)”**

Periodo	Nº	h <sub>1</sub> (baja) (m)	h <sub>2</sub> (sube) (m)	Δh (m)
Iro De Mayo	1	56,1	52,9	3,20
27 De Mayo	1	64	63,1	0,90
	2	66,75	63,4	3,35
3 De Mayo	1	30,5	29	1,50
4 De Mayo	2	34,75	28,2	6,55
Aeropuerto A	1	33,5	30,15	3,35
Avit A	1	37,55	36,15	1,40
	2	43,5	42,5	1,00
Avit B	1	36,45	30,3	6,15

Circunvalación A	1	46,2	38,6	7,60
	2	45,6	36,35	9,25
Circunvalación B	1	38,1	33,4	4,70
Constructor A	1	66,4	60,3	6,10
Constructor B	1	64,9	60,6	4,30
Daniel Campos	1	33,6	30,15	3,45
	2	34,4	30,9	3,50
Guadalquivir	1	11,6	9,4	2,20
	2	10,7	5,8	4,90
Las Velas	1	76	69,4	6,60
Los Alamos	1	27,26	27	0,26
Lourdes	1	41	33,5	7,50
Luis Espinal B	1	55,6	50,1	5,50
	2	63,75	52,2	11,55
Morros Blanco B	1	58,8	54,2	4,60
Morros Blancos A	1	60,55	53,9	6,65
Narciso Campero	1	36,82	35,11	1,71
	2	39,05	32,35	6,70
Oscar Zamora	1	12	11,5	0,50
	2	13,2	12,3	0,90
Pedro Antonio Flores	1	42,5	38,2	4,30
San Bernardo A	1	43,5	40,1	3,40
	2	42,4	41,1	1,30
San Jorge Ii	1	28	26,35	1,65
	2	28,1	20,2	7,90
San Luis	1	6,8	2,8	4,00
San Salvador	1	34,5	29,8	4,70
	2	34,9	31,8	3,10
Simón Bolívar	1	54	42,6	11,40
Stadium A	1	24,5	18,9	5,60
Stadium B	1	28,5	16,25	12,25
	2	42,5	20,7	21,80
Valle Hermoso	1	49	37,3	11,70
Villa Busch	1	20	16,9	3,10
Villa Fátima A	1	22	15,6	6,40
Villa Fátima B	1	26,2	15,6	10,60

*Fuente: elaboración propia.*

La muestra de las curvas extrapoladas (anexo 7) nos dan a conocer este dato de la variación del nivel freáticos y la relación con la precipitación, donde (1) representa la variación del periodo 2019-2020 y (2) del periodo 2020-2021.

**Tabla 4.9. Estimación de la recarga por el método VNF.**

Pozo	Periodo	Pp. Media anual (mm)	$\Delta h$ (m)	$m_e$	Recarga (mm)	Recarga media anual (mm)
27 DE MAYO	2019-2020	538,19	4,70	5	235	195
	2020-2021	560,74	3,10	5	155	
3 de MAYO	2019-2020	538,19	11,70	5	585	370
	2020-2021	560,74	3,10	5	155	
AEROPUERTO B	2019-2020	538,19	10,60	4	424	424
AVIT A	2019-2020	538,19	1,40	4	56	48
	2020-2021	560,74	1,00	4	40	
AVIT B	2019-2020	538,19	6,15	6	369	369
CIRCUNVALACIÓN A	2019-2020	538,19	1,50	5	75	201,25
	2020-2021	560,74	6,55	5	327,5	
CIRCUNVALACIÓN B	2019-2020	538,19	3,35	7	234,5	234,5
CONSTRUCTOR A	2019-2020	538,19	4,30	5	215	215
DANIEL CAMPOS	2019-2020	538,19	3,20	5	160	160
GUADALQUIVIR	2019-2020	538,19	4,90	7	343	402,5
	2020-2021	560,74	6,60	7	462	
LAS VELAS	2019-2020	538,19	7,90	3	237	237
LOS ALAMOS	2019-2020	538,19	3,35	15	502,5	502,5
LOURDES	2019-2020	538,19	6,70	4	268	268
LUIS ESPINAL A	2019-2020	538,19	0,50	3	15	21
	2020-2021	560,74	0,90	3	27	21
MORROS BLANCOS A	2019-2020	538,19	4,60	4	184	184
MORROS BLANCOS B	2019-2020	538,19	6,65	3	199,5	199,5
NARCISO CAMPERO - A	2019-2020	538,19	4,30	5	215	193,75
	2020-2021	560,74	3,45	5	172,5	
NARCISO CAMPERO - B	2019-2020	538,19	4,30	7	301	271,25
	2020-2021	560,74	3,45	7	241,5	
OSCAR ZAMORA	2019-2020	538,19	12,25	4	490	681
	2020-2021	560,74	21,80	4	872	
PEDRO ANTONIO FLORES	2019-2020	538,19	11,55	6	693	693
SAN BERNARDO B	2019-2020	538,19	3,40	7	238	164,5
	2020-2021	560,74	1,30	7	91	
SAN JORGE II	2019-2020	538,19	7,50	5	375	325
	2020-2021	560,74	5,50	5	275	325
SAN LUIS	2019-2020	538,19	3,50	4	140	140
SIMON BOLIVAR	2019-2020	538,19	1,71	3	51,3	51,3
STADIUM (Pozo antiguo)	2019-2020	538,19	9,25	2	185	139,5
	2020-2021	560,74	4,70	2	94	199
STADIUM (Pozo nuevo)	2019-2020	538,19	7,60	4	304	304
VALLE HERMOSO	2019-2020	538,19	4,00	4	160	160
VILLA BUCH	2019-2020	538,19	6,10	3	183	183
VILLA FÁTIMA A	2019-2020	538,19	2,20	4	88	88

VILLA FÁTIMA B	2019-2020	538,19	0,26	4	10,4	10,4
----------------	-----------	--------	------	---	------	------

*Fuente: Elaboración propia.*

Para los pozos que no se pueda obtener la recarga por el método VNF, entonces se considerara la recarga obtenida de forma empírica.

- ❖ **Acuífero textura:** Se seleccionó en material más representativo de la zona saturada, existiendo en algunos casos varias zonas saturadas que se pueden considerarse como acuíferos colgados, el más representativo espesor será el seleccionado.
- ❖ **Tipo de suelo:** Corresponde a la primera capa o tipo de suelo con la superficie.
- ❖ **Topografía:** Por medio del programa ArcGis con datos descargados de GeoBolivia, se construyó un mapa topográfico donde a través de las herramientas (Sople), haciendo una relación de las zonas con la misma pendiente, para dar uniformidad a este factor.
- ❖ **Impacto a la zona vadosa:** Es la misma variable del anterior método tratándose del material más predominante en la zona no saturada (tabla 2.18, penúltima columna).
- ❖ **Conductividad hidráulica (C):** Considerando que es un parámetro que es difícil de estimar en las condiciones en la que se encuentran los pozos se le asignará realizando la media ponderada de la permeabilidad del estudio de 1979 por las naciones unidas en varios puntos de la ciudad (anexo 9).

Los parámetros definidos se resumen en la siguiente tabla:

*Tabla 4.10. Parámetros definidos para la aplicación del método DRASTIC.*

Nº	POZO	D (m)	R (mm/año)	A	S	T (%)	I	C (m/d)
1	27 DE MAYO	63,4	195,0	grava con poca arcilla	arcilla beige	3	arcillas, limos aluviales, arenas aluviales y gravas	2,6
2	3 de MAYO	22,2	370,0	grava y arcilla arenosa	arcilla arenosa	3	arcillas, arenas aluviales, gravas	2,6
3	AEROPUERTO B		424,0	arcilla, grava arenosa	arcilla	3	arcillas, arenas aluviales	3
4	AVIT A	42	48	grava con poca presencia de arcilla	arcilla	3	arenas aluviales y gravas	2,6
	AVIT B	30,3	369	grava, arena más arcilla	arcilla y limo	3	gravas, arena aluviales	2,6

6	BARRIO VILLA FÁTIMA A	14,45	88,0	grava, arena y arcilla	arcilla	5	arcillas, gravas y limos	2,42
7	BARRIO VILLA FÁTIMA B	14,5	10,4	grava, arena y limo	arena y arcilla	5	arenas aluviales, arcillas y gravas	2,42
8	CIRCUNVALACIÓN A	36,35	201,25	arena media arcilla	arcilla	5	arena aluviales y arcillas	1,4
9	CIRCUNVALACIÓN B	27,9	234,5	arcilla más arena fina	arena	5	arena aluviales y arcillas	1,4
10	CONSTRUCTOR A	59,6	215,0	arcilla, arena gruesa y fina	arcilla	3	arcillas, arenas aluviales, gravas	3
11	DANIEL CAMPOS	30,9	160,0	arcilla, grava	arcilla	3	arcillas, arenas aluviales, gravas	2,6
12	F.A.B.	38	170,52	arena fina y gruesa, arcilla y grava	arcilla	5	arcillas, arenas aluviales	3
13	GUADALQUIVIR	5,8	402,5	arena fina, arcilla arenosa	grava arenosa	5	arenas aluviales, arcillas y gravas	1,4
14	LOS ALAMOS	27,3	502,5	lutita, areniscas limosas y arenosas	grava y guijarro	3	areniscas y formaciones ígneas	1,4
15	LOURDES	33,8	268	arcilla	arcilla	3	limo aluviales, loess	2,6
16	LUIS ESPINAL A	50	170,52	mayormente grava con pocas arcillas y arenas	limo y arena	3	arcillas, limos y arenas aluviales, gravas	15
17	MONTECRISTO (PN)	55	170,52	grava triturada, arcilla y limo	arcilla y limo	3	arcillas y limos aluviales y gravas	3
18	MORROS BLANCOS A	54	184	grava, arena, arcilla y limo	arcilla y limo	5	arcillas, limo aluviales, loess, grava y arenas	5,86
19	MORROS BLANCOS B	53	199,5	grava, arena, arcilla	arcilla, limo y arena	5	arcillas, limo aluviales, arenas fluviales y grava	5,86
20	NARCISO CAMPERO - A	33,9	193,75	grava y arcilla	arcilla	3	arcillas, gravas coluviales	3
21	NARCISO CAMPERO - B	33,9	271,25	arenas, arcillas	arcilla	3	arcillas, arenas aluviales, gravas	3

22	OSCAR ZAMORA	12,7	681,0	limo arena arcilla	arcilla	3	arenas aluviales y gravas	2,6
23	PEDRO ANTONIO FLORES	36,4	693,0	grava con poca presencia de arena	arena	3	arenas aluviales y gravas	3
24	SAN BERNARDO B	34,8	164,5	grava	arcilla	3	arcillas, gravas coluviales	3
25	SAN JORGE II	25,7	325	grava arenosa y arcilla limosa	arcilla y arena gruesa	3	arcilla, arenas aluviales y gravas	5,9
26	SAN LUIS	2,75	140	grava arena, limo	limo y arena	3	arenas aluviales y arcillas	5,9
27	SIMON BOLIVAR	42,6	51,3	grava, arena y limo	arcilla, limo y arena	5	arcillas, limo aluviales, gravas	3
28	STADIUM (Pozo antiguo)	17,6	340,5	grava fina y subangulosa, limo arcilloso	arcilla plástica	5	limo aluviales, loess, gravas	4,01
29	STADIUM (Pozo nuevo)	17,7	224	arcilla, arena, limo y grava	arcilla y limo	5	arcillas, limo aluviales, gravas	4,01
30	TOMATAS	11,7	170,7	arena + grava	arcilla y limo	1	gravas coluviales y arenas	6,5
31	VALLE HERMOSO	36,9	468	gravilla, arena y rocas triturada	arena fina y limo	3	arenas aluviales, limos, formaciones ígneas	15
32	VELA	75	198	gravilla, arena, arcilla y limo	arcilla	5	arcillas, arenas aluviales, gravas	5
33	VILLA BUCH	16,9	93	arcilla con limo, gravas y arenas	arcilla y limo	3	arcillas, limos aluviales y gravas	1

*Fuente: elaboración propia.*

Nota: D: Factor de la profundidad del agua, R: Factor de la recarga neta, A: Factor de la litología del acuífero, S: Factor del tipo de suelo, T: Factor de la topografía, I: Factor de la litología del a zona no saturada, C: Factor de la conductividad hidráulica.

#### 4.4.3. Método AVI

- ❖ **Espesor de las capas sedimentarias (d):** De cada pozo se extrajo en espesor de cada tipo de suelo registrado, para toda la profundidad del pozo.

- ❖ **Conductividad hidráulica (K):** Se asignó una determinada permeabilidad según el tipo de textura del suelo para cada espesor, para estos valores se consideró la tabla 4.11, de donde varios autores hacen referencia.

Para aplicar la fórmula de resistencia hidráulica se extrajo los diferentes espesores de los pozos que cuentan con litología (anexo 4).

**Tabla 4.11. Permeabilidades más comunes en los diferentes tipos de suelo.**

Permeabilidad (m/d)	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas			
Clasificación	Buenos Acuíferos				Acuíferos Pobres				Impermeables		
Capacidad de drenaje	Drenan Bien				Drenan Mal			No Drenan			

*Fuente: Custodio M. y Llamas, M. R. 1976.*

Las tablas 4.12-4.13 muestran la asignación de la permeabilidad a los diferentes materiales de todos los pozos, la asignación fue con ayuda a las tablas 4.11, se puede notar que los diferentes pozos no cuentan con un suelo isótropo por lo se trata una aproximación.

Estas asignaciones son directas sin considerar ningún tipo de semejanza a ningún ensayo, están puestas en función al tipo de textura que presentan.

**Tabla 4.12. Asignación de posibles valores de permeabilidad a los distintos tipos de suelos encontrados en los pozos de COSAALT.**

Tipo de Suelo	K (m/d)	Tipo de Suelo	K (m/d)
arcilla	0,001	arena	1
arcilla gravosa	1	arena fina	1
arcilla plastica	0,0001	arena mediana	1
arcilla arenosa	0,1	arena mediana + arcilla	0,5
arcilla arenosa gruesa	0,5	arena gruesa	5
arcilla arenosa fina	0,1	arena gruesa + grava	10
arcilla beige	0,01	arena gruesa + grava fina	10
arcilla compactada	0,00001	arena gruesa + gravilla	10
arcilla gris oscura	0,0001	arena gruesa + gravilla + arcilla	1
arcilla negra	0,0001	arena gruesa + gravilla + arcilla + Qz	1
arcilla con grava	0,5	arena gruesa + m. org. + arcilla	0,1
arcilla solida	0,0001	arena gruesa + arcilla	0,5
arcilla +m. org. + gravilla	0,001	arena gruesa a fina	1

arcilla + arena	0,01	arena gruesa + limo	0,01
arcilla + arena fina	0,1	arena gravosa + arcilla	5
arcilla + arena + grava	1	arena + grava	10
arcilla + arena gruesa	0,5	arena + grava + arena	10
arcilla + arena + limo	0,01	arena + limo	0,01
arcilla + gravilla	1	arena fina + limo	0,001
arcilla + grava	1	arena + gonglo	1
arcilla + grava arenosa	8	arena arcillosa	0,01
arcilla + grava fina	2	arena + arcilla + limo	0,001
arcilla limosa	0,0001	arena triturada	1
arcilla + limo	0,0001	areniscas	1
arcilla + limo + arena	0,01	areniscas + limos	0,1

*Fuente: Elaboración propia con ayuda de la tabla N°32.*

**Tabla 4.13. Asignación de posibles valores de permeabilidad a los distintos tipos de suelos encontrados en los pozos de COSAALT.**

Tipo de Suelo	K (m/d)	Tipo de Suelo	K (m/d)
areniscas + lutita intercalada	1	grava con alteracion de arcilla	10
arenisca cuarzosa	1	limo	0,0001
grava	100	limo + arena	0,01
grava arenosa	10	limo + arena fina	0,01
grava con arena	10	limo + arcilla	0,00001
grava fina	50	limo arcilloso	0,00001
grava triturada	50	limo arcilloso + arena	0,001
grava limosa	15	limo + grava + arena	1
grava con arcilla	25	gravilla	100
grava compactada	100	gravilla + arena	10
grava + arcilla	25	gravilla + arena gruesa	10
grava + arena	10	gravilla mult. + Qz + arcilla	1
grava + arena + limo	1	gravilla cantos ang. + Qz + arcilla	1
grava + limo	0,5	gravilla cantos ang. + arena gruesa + Qz	10
grava + limo + arena	1	lutita	0,00001
grava arenosa + arcilla	5	roca triturada + gravilla	25
grava + guijarro	100	roca triturada + arena gruesa + gravilla	25
grava + roca alterada	100		
grava fina + arena gruesa	10		
grava fina + arena gruesa + arcilla	1		
grava fina + arcilla	10		
grava fina arcillosa	25		
grava media	100		
grava media y fina	100		
grava mediana + arena gruesa + arcilla	1		

*Fuente: elaboración propia.*

#### 4.4.4. Método Ekv

- ❖ **Espesor de la zona subsaturada (b):** Para determinar este parámetro solo se toma en cuenta la parte antes de llegar a la zona saturada, por lo que esta distancia es antes de llegar a la primera zona saturada cerca de la superficie, en algunos pozos se cuenta con más de 2 de estas zonas identificándolos como acuífero colgados.
- ❖ **Permeabilidad vertical (kv):** Se le asignó una permeabilidad a capa según el tipo de textura, igual que el anterior método, pero con la diferencia que solo se toma en cuenta hasta la zona subsaturada.

Como son los mismos factores del anterior método se utilizará la asignación de las tablas 4.12-4.13 para la permeabilidad.

### 4.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN

#### 4.5.1. Método Radio fijo calculado (R.F.C.)

- ❖ **Caudal de bombeo ( $Q_b$ ):** Este dato es obtenido de la información recopilada, mediante pruebas de bombeo.
- ❖ **Tiempo de tránsito (t):** Los perímetros serán calculados para 3 diferentes tiempos de tránsito (1 días, 50 días y 10 años).
- ❖ **Porosidad eficaz del acuífero ( $m_e$ ):** De acuerdo al material que se encuentra en la zona saturada, la descripción del suelo será la misma del parámetro del tipo de medio de acuífero del método DRASTIC.
- ❖ **Espesor saturado en la captación (e):** A través de los perfiles litológicos se puede calcular este espesor, tomando siempre como prioridad la zona más cercana a la superficie.

Los parámetros definidos son resumen en la siguiente tabla:

*Tabla 4.14. Parámetros definidos para en método de Radio fijo.*

N°	Pozo	Caudal (l/s)	Tiempo de Tránsito			$m_e$	espesor de acuífero
			Z1 (días)	Z2 (días)	Z3 (años)		
1	27 DE MAYO	3,63	5	50	10	5	70
2	3 de MAYO	2,84	5	50	10	5	21

3	AEROPUERTO B	5,42	5	50	10	3	77
4	AVIT A	22,91	5	50	10	4	42,5
5	AVIT B	7,95	5	50	10	6	30
6	CIRCUNVALACIÓN A	3,59	5	50	10	5	33
7	CIRCUNVALACIÓN B	2,02	5	50	10	7	48
8	CONSTRUCTOR A	6,67	5	50	10	5	45,59
9	DANIEL CAMPOS	2,3	5	50	10	5	20
10	F.A.B.	4,03	5	50	10	5	36,29
11	GUADALQUIVIR	15,97	5	50	10	7	37,5
12	LOS ALAMOS	6,02	5	50	10	15	13,3
13	LOURDES	8,6	5	50	10	4	15
14	LUIS ESPINAL A	8,81	5	50	10	3	57
15	MONTECRISTO (PN)	3,54	5	50	10	4	12
16	MORROS BLANCOS A	5,4	5	50	10	4	39
17	MORROS BLANCOS B	10,14	5	50	10	3	51
18	NARCISO CAMPERO - A	3,3	5	50	10	5	7
19	NARCISO CAMPERO - B	3,3	5	50	10	7	13
20	OSCAR ZAMORA	14,55	5	50	10	4	39
21	PEDRO ANTONIO FLORES	8,05	5	50	10	6	61,5
22	SAN BERNARDO B	4,2	5	50	10	7	63,45
23	SAN JORGE II	3,15	5	50	10	5	36
24	SAN LUIS	10,2	5	50	10	4	31
25	SIMON BOLIVAR	9,15	5	50	10	4	49
26	STADIUM (P. antiguo)	19,8	5	50	10	2	37
27	STADIUM (P. nuevo)	19,8	5	50	10	4	59
28	TOMATAS	4,42	5	50	10	10	20
29	VALLE HERMOSO	4,12	5	50	10	4	29
30	VELA	2,15	5	50	10	3	33
31	VILLA FATIMA A	12,85	5	50	10	4	17
32	VILLA FATIMA B	7,9	5	50	10	4	50

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: El espesor se seleccionó el estrato saturado más predominante.

#### 4.5.2. Método Wyssling

- ❖ **Gradiente hidráulico (i):** Este será calculado según la dirección de las aguas subterráneas (anexo 8), con el dato de los niveles estáticos registrado.
- ❖ **Caudal de bombeo ( $Q_b$ ):** Parámetro ya definido en el anterior método.
- ❖ **Tiempo de tránsito (t):** Parámetro definido en el anterior método.

- ❖ **Permeabilidad (K):** De acuerdo al material que se encuentra en la zona saturada, la descripción del suelo será la misma del parámetro del tipo de medio de acuífero del método DRASTIC.
- ❖ **Espesor saturado en la captación (e):** Parámetro definido en el anterior método.
- ❖ **Porosidad eficaz del acuífero (m<sub>e</sub>):** Parámetro definido en el anterior método.

Los parámetros definidos son resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 4.15. Parámetros definidos para la aplicación del método Wyssling.**

N°	Pozo	i (m/m)	Tiempo de Tránsito			V <sub>e</sub> (m/d)	Long.(m)			K (m/d)
			Z <sub>1</sub> (d)	Z <sub>2</sub> (d)	Z <sub>3</sub> (años)		I <sub>5d</sub>	I <sub>10d</sub>	I <sub>10años</sub>	
1	27 DE MAYO	0,01	5	50	10	0,36	2	18	1.305	2,6
2	3 de MAYO	0,01	5	50	10	0,52	3	26	1.898	2,6
3	AEROPUERTO B	0,01	5	50	10	1,00	5	50	3.650	3
4	AVIT A	0,06	5	50	10	3,90	20	195	14.235	2,6
5	AVIT B	0,06	5	50	10	2,60	13	130	9.490	2,6
6	CIRCUNVALACIÓN A	0,10	5	50	10	2,80	14	140	10.220	1,4
7	CIRCUNVALACIÓN B	0,10	5	50	10	2,00	10	100	7.300	1,4
8	CONSTRUCTOR A	0,02	5	50	10	1,20	6	60	4.380	3
9	DANIEL CAMPOS	0,02	5	50	10	1,04	5	52	3.796	2,6
10	F.A.B.	0,01	5	50	10	0,60	3	30	2.190	3
11	GUADALQUIVIR	0,03	5	50	10	0,60	3	30	2.190	1,4
12	LOS ALAMOS	0,01	5	50	10	0,09	0	5	341	1,4
13	LOURDES	0,02	5	50	10	1,30	7	65	4.745	2,6
14	LUIS ESPINAL A	0,01	5	50	10	5,00	25	250	18.250	15
15	MONTECRISTO (PN)	0,01	5	50	10	0,52	3	26	1.882	3
16	MORROS BLANCOS A	0,03	5	50	10	2,25	11	113	8.213	3
17	MORROS BLANCOS B	0,03	5	50	10	3,00	15	150	10.950	3
18	NARCISO CAMPERO - A	0,03	5	50	10	1,80	9	90	6.570	3
19	NARCISO CAMPERO - B	0,03	5	50	10	1,29	6	64	4.693	3
20	OSCAR ZAMORA	0,004	5	50	10	0,26	1	13	949	2,6
21	PEDRO ANTONIO FLORES	0,01	5	50	10	0,50	3	25	1.825	3
22	SAN BERNARDO B	0,01	5	50	10	0,43	2	21	1.564	3
24	SAN JORGE II	0,002	5	50	10	0,24	1	12	861	5,9
25	SAN LUIS	0,01	5	50	10	1,48	7	74	5.384	5,9
26	STADIUM (P. antiguo)	0,02	5	50	10	1,50	8	75	5.475	3
27	STADIUM (P. nuevo)	0,02	5	50	10	3,00	15	150	10.950	3
28	TOMATAS	0,01	5	50	10	1,50	8	75	5.475	3
29	VALLE HERMOSO	0,01	5	50	10	0,65	3	33	2.373	6,5
30	VELA	0,01	5	50	10	2,58	13	129	9.410	15
31	VILLA BUCH	0,01	5	50	10	1,67	8	83	6.083	5
32	VILLA FATIMA A	0,02	5	50	10	1,50	8	75	5.475	3
33	VILLA FATIMA B	0,02	5	50	10	1,45	7	72	5.290	3

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: Ve= Velocidad eficaz producto del gradiente hidráulico con la permeabilidad sobre la porosidad eficaz, I<sub>5d</sub>, I<sub>10d</sub>, I<sub>10años</sub> = Longitud de recorrido del flujo en función del tiempo de tránsito.

## CAPÍTULO V

### 5. APLICACIÓN PRACTICA

#### 5.1. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA HALLAR GRADOS DE VULNERABILIDAD

Las demostraciones de las fórmulas para los diferentes métodos ya se han explicado ahora solamente se realizará la aplicación y su correspondiente valoración.

##### ❖ Método GOD

El producto de estos tres factores nos da una calificación a la que con la figura 2.12 se le asigna un grado.

*Tabla 5.1. Grado de índice de vulnerabilidad por el método GOD.*

Nº	Pozo	G	O	D	Índice de Vulnerabilidad	Grado
1	27 DE MAYO	0,5	0,75	0,6	0,23	Baja
2	3 de MAYO	0,5	0,75	0,7	0,26	Baja
3	AEROPUERTO B	0,5	0,75	0,7	0,26	Baja
4	AVIT A	0,5	0,75	0,7	0,26	Baja
5	AVIT B	0,6	0,75	0,7	0,32	Media
6	CIRCUNVALACIÓN A	0,6	0,7	0,7	0,29	Baja
7	CIRCUNVALACIÓN B	0,6	0,75	0,7	0,32	Media
8	CONSTRUCTOR A	0,4	0,75	0,6	0,18	Baja
9	DANIEL CAMPOS	0,5	0,65	0,7	0,23	Baja
10	F.A.B.	0,5	0,7	0,7	0,25	Baja
11	GUADALQUIVIR	0,8	0,7	0,8	0,45	Media
12	LOS ALAMOS	0,8	0,8	0,7	0,45	Media
13	LOURDES	0,2	0,5	0,7	0,07	Baja
14	LUIS ESPINAL A	0,3	0,65	0,7	0,14	Baja
15	MONTECRISTO (PN)	0,2	0,6	0,6	0,07	Muy Baja
16	MORROS BLANCOS A	0,2	0,65	0,6	0,08	Muy Baja
17	MORROS BLANCOS B	0,2	0,65	0,6	0,08	Muy Baja
18	NARCISO CAMPERO - A	0,55	0,6	0,7	0,23	Baja
19	NARCISO CAMPERO - B	0,6	0,7	0,7	0,29	Baja
20	OSCAR ZAMORA	0,4	0,7	0,8	0,22	Baja
21	PEDRO ANTONIO FLORES	0,6	0,7	0,7	0,29	Baja
22	SAN BERNARDO B	0,7	0,65	0,7	0,32	Media
23	SAN JORGE II	0,5	0,75	0,7	0,26	Baja
24	SAN LUIS	0,8	0,75	0,9	0,54	Muy Alta
25	SIMON BOLIVAR	0,4	0,75	0,7	0,21	Baja
26	STADIUM A	0,5	0,5	0,8	0,20	Baja

27	STADIUM B	0,5	0,7	0,8	0,28	Baja
28	TOMATAS	0,9	0,8	0,8	0,58	Muy Alta
29	VALLE HERMOSO	0,5	0,75	0,7	0,26	Baja
30	VELA	0,3	0,7	0,6	0,13	Baja
31	VILLA BUCH	0,3	0,65	0,8	0,16	Baja
32	VILLA FÁTIMA A	0,6	0,7	0,8	0,34	Media
33	VILLA FÁTIMA B	0,6	0,7	0,8	0,34	Media

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: (G, O, D) = Son las calificaciones en función a la figura 2.12.

### ❖ Método DRASTIC

Para aplicar la fórmula se da primero una valoración a sus factores con las tablas 2.13-2.14-2.15-2.16-2.17-2.18 y 2.19, después cada uno es multiplicado por su factor de ponderación de la tabla 2.6 (no pesticida), la sumatoria de estos siete productos nos refleja el grado de vulnerabilidad, a esta se le asigna un grado con la tabla 2.7.

*Tabla 5.2. Grado de índice de vulnerabilidad por el método DRASTIC.*

N°	Pozo	D <sub>r</sub>	R <sub>r</sub>	A <sub>r</sub>	S <sub>r</sub>	T <sub>r</sub>	I <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>	IV.	Grado
1	27 DE MAYO	1	6	7	7	9	6	1	106	Moderada
2	3 de MAYO	3	8	8	8	9	6	1	129	Moderada
3	AEROPUERTO B	1	6	6	7	9	6	1	103	Baja
4	AVIT A	1	1	8	7	9	6	1	89	Baja
	AVIT B	2	9	8	7	9	7	1	131	Moderada
6	CIRCUNVALACIÓN A	1	9	6	7	9	6	1	115	Moderada
7	CIRCUNVALACIÓN B	2	9	6	9	9	6	1	124	Moderada
8	CONSTRUCTOR A	1	9	6	7	9	6	1	115	Moderada
9	DANIEL CAMPOS	1	6	6	7	9	6	1	103	Baja
10	F.A.B.	1	6	7	7	9	6	1	106	Moderada
11	GUADALQUIVIR	7	8	6	9	9	6	1	145	Moderada
12	LOS ALAMOS	2	1	5	10	9	6	1	91	Baja
13	LOURDES	1	9	5	7	9	6	1	112	Moderada
14	LUIS ESPINAL A	1	9	8	6	9	6	3	125	Moderada
15	MONTECRISTO (PN)	1	6	7	7	9	6	1	106	Moderada
16	MORROS BLANCOS A	1	9	6	6	9	6	2	116	Moderada
17	MORROS BLANCOS B	1	6	7	7	9	6	2	109	Moderada
18	NARCISO CAMPERO - A	1	8	7	7	9	6	1	114	Moderada
19	NARCISO CAMPERO - B	1	9	7	7	9	6	1	118	Moderada
20	OSCAR ZAMORA	5	1	6	7	9	6	1	103	Baja
21	PEDRO ANTONIO FLORES	1	9	8	9	9	6	1	125	Moderada
22	SAN BERNARDO B	1	6	8	7	9	6	1	109	Moderada
23	SAN JORGE II	2	8	7	8	9	6	2	124	Moderada

24	SAN LUIS	9	6	8	6	9	6	2	150	Alto
25	SIMON BOLIVAR	1	9	7	7	9	6	1	118	Moderada
26	STADIUM A	3	9	8	7	9	6	1	131	Moderada
27	STADIUM B	3	8	8	7	9	6	1	127	Moderada
28	TOMATAS C	5	6	8	9	9	8	2	146	Moderada
29	VALLE HERMOSO	1	9	7	6	9	6	3	122	Moderada
30	VELA	1	8	7	7	9	6	2	117	Moderada
31	VILLA BUCH	3	3	5	6	9	6	1	96	Baja
32	VILLA FÁTIMA A	5	9	7	7	9	7	1	143	Moderada
33	VILLA FÁTIMA B	5	9	7	8	9	6	1	140	Moderada

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: (Dr, Rr, Ar, Sr,Tr, Ir, Cr) = Son las calificaciones en función a las tablas 2.13 a 2.19.

### ❖ Método AVI

Para la aplicación en base a la atenuación del suelo hacia el contaminante solo es la sumatoria de los cocientes entre el espesor y su respectiva permeabilidad, arrojando en unidad de tiempo (días), convirtiendo en años para la aplicación de la tabla 2.9 para asignarle un grado de vulnerabilidad.

**Tabla 5.3. Grado de índice de vulnerabilidad por el método AVI.**

N°	Pozo	(c) días	(c) años	Grado
1	27 DE MAYO	1.140.149	3.123,70	Bajo
2	3 de MAYO	411.972,80	1.128,69	Bajo
3	AEROPUERTO B	82.079,50	224,88	Moderado
4	AVIT A	77.103,55	211,24	Moderado
5	AVIT B	26.508,10	72,62	Alto
6	CIRCUNVALACIÓN A	35.229,49	96,52	Alto
7	CIRCUNVALACIÓN B	542,44	1,49	Extremadamente alto
8	CONSTRUCTOR A	14.389,79	39,42	Alto
9	DANIEL CAMPOS	54.505,20	149,33	Moderado
10	F.A.B.	18.088,89	49,56	Alto
11	GUADALQUIVIR	58.421,75	160,06	Moderado
12	LOS ALAMOS	7.033.674	19.270,34	Extremadamente bajo
13	LOURDES	67.001,60	183,57	Moderado
14	LUIS ESPINAL A	53.001,77	145,21	Moderado
15	MONTECRISTO (PN)	7.790.000	21.342,47	Extremadamente bajo
16	MORROS BLANCOS A	228.827,40	626,92	Moderado
17	MORROS BLANCOS B	15.221,45	41,7	Alto
18	NARCISO CAMPERO - A	53.001,77	145,21	Moderado
19	NARCISO CAMPERO - B	42.015,28	115,11	Moderado
20	OSCAR ZAMORA	47.320,20	129,64	Moderado
21	PEDRO ANTONIO FLORES	485,29	1,33	Extremadamente alto

22	SAN BERNARDO B	4.693,12	12,86	Alto
23	SAN JORGE II	122.835,10	336,53	Moderado
24	SAN LUIS	54.317,00	148,81	Moderado
25	SIMON BOLIVAR	15.035,04	41,19	Alto
26	STADIUM A	1.052.404	2.883,30	Bajo
27	STADIUM B	18.329,20	50,22	Alto
28	TOMATAS	6.012,80	16,47	Alto
29	VALLE HERMOSO	18.308,92	50,16	Alto
30	VELA	54.870,47	150,33	Moderado
31	VILLA BUCH	555.013,90	1.520,59	Bajo
32	VILLA FÁTIMA A	44.026,00	120,62	Moderado
33	VILLA FÁTIMA B	8.733,40	23,93	Alto

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: (c) = Factor de resistencia de atenuación natural del suelo.

### ❖ Método Ekv

El cálculo previo es la permeabilidad vertical, después el espesor saturado superior más cercano a la superficie freática analizado desde los perfiles litológicos, individualmente a cada uno se le asigna un valor con la tabla 2.10, pero para reflejar un valor final se utiliza la tabla 2.11.

**Tabla 5.4. Grado de índice de vulnerabilidad por el método Ekv.**

N°	Pozo	$K_v$ (m/d)	Índice	b (m)	Índice	Índice final	Grado
1	27 DE MAYO	$1,59 \times 10^{-4}$	1	30	2	3	Baja
2	3 de MAYO	$3,40 \times 10^{-4}$	2	9	3	5	Media
3	AEROPUERTO B	$2,35 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
4	AVIT A	$2,13 \times 10^{-3}$	2	24	2	4	Baja
5	AVIT B	$4,56 \times 10^{-3}$	2	25	2	4	Baja
6	CIRCUNVALACIÓN A	$4,65 \times 10^{-3}$	2	6	3	5	Media
7	CIRCUNVALACIÓN B	$2,34 \times 10^{-1}$	3	8	3	6	Media
8	CONSTRUCTOR A	$8,66 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
9	DANIEL CAMPOS	$1,46 \times 10^{-3}$	2	14	2	4	Baja
10	F.A.B.	$6,15 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
11	GUADALQUIVIR	$2,40 \times 10^{-3}$	2	7	3	5	Media
12	LOS ALAMOS	$2,05 \times 10^{-5}$	1	5	4	5	Media
13	LOURDES	$1,24 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
14	LUIS ESPINAL A	$1,15 \times 10^{-2}$	3	30	2	5	Media
15	MONTECRISTO (PN)	$1,58 \times 10^{-5}$	1	30	2	3	Baja
16	MORROS BLANCOS A	$6,03 \times 10^{-4}$	1	30	2	3	Baja
17	MORROS BLANCOS B	$9,00 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
18	NARCISO CAMPERO - A	$1,70 \times 10^{-3}$	2	24	2	4	Baja
19	NARCISO CAMPERO - B	$2,68 \times 10^{-3}$	2	25	2	4	Baja
20	OSCAR ZAMORA	$2,85 \times 10^{-3}$	2	7	3	5	Media

21	PEDRO ANTONIO FLORES	$2,52 \times 10^{-1}$	3	30	2	5	Media
22	SAN BERNARDO B	$2,47 \times 10^{-2}$	3	15	2	5	Media
23	SAN JORGE II	$1,22 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
24	SAN LUIS	$2,36 \times 10^{-3}$	2	4	5	6	Media
25	SIMON BOLIVAR	$8,98 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
26	STADIUM A	$1,04 \times 10^{-4}$	2	30	2	4	Baja
27	STADIUM B	$6,27 \times 10^{-3}$	2	30	2	4	Baja
28	TOMATAS	$1,81 \times 10^{-2}$	3	4	4	7	Media
29	VALLE HERMOSO	$7,65 \times 10^{-3}$	2	9	3	5	Media
30	VELA	$2,97 \times 10^{-3}$	2	16	2	4	Baja
31	VILLA BUCH	$2,13 \times 10^{-4}$	1	30	2	3	Baja
32	VILLA FÁTIMA A	$2,41 \times 10^{-3}$	2	14	2	4	Baja
33	VILLA FÁTIMA B	$1,32 \times 10^{-2}$	3	12	2	5	Media

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: b = Espesores de estratos de la zona sub saturada o capilar más cercanos hacia la zona saturada.

## 5.2. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA HALLAR PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE LOS POZOS

Las definiciones de los parámetros fueron explicadas en el capítulo anterior, entonces aplicamos las diferentes fórmulas para obtener los perímetros en base a información recolectada y algunos parámetros asumidos

### ❖ Método Radio fijo en función al tiempo de tránsito

La metodología depende tiempo de tránsito, entonces al tomar en cuenta tres tiempos diferentes tenemos los siguientes resultados:

*Tabla 5.5. Perímetros de protección determinados por el método Radio Fijo.*

N°	Pozo	Radio 1 (m)	Radio 2 (m)	Radio 3 (m)	Diámetro 1 (m)	Diámetro 2 (m)	Diámetro 3 (m)
1	27 DE MAYO	12	38	322	24	75	645
2	3 de MAYO	19	61	521	39	122	1.042
3	AEROPUERTO B	18	57	485	36	114	970
4	AVIT A	43	136	1.162	86	272	2.325
5	AVIT B	25	78	665	49	156	1.331
6	CIRCUNVALACIÓN A	17	55	467	35	109	934
7	CIRCUNVALACIÓN B	9	29	246	18	57	491
8	CONSTRUCTOR A	20	63	542	40	127	1.083
9	DANIEL CAMPOS	18	56	480	36	112	960
10	F.A.B.	17	55	472	35	110	944
11	GUADALQUIVIR	29	91	781	58	183	1.562
12	LOS ALAMOS	20	64	550	41	129	1.100
13	LOURDES	44	140	1.199	89	281	2.398

14	LUIS ESPINAL A	27	84	719	53	168	1.437
15	MONTECRISTO (PN)	32	101	860	64	201	1.720
16	MORROS BLANCOS A	22	69	589	44	138	1.178
17	MORROS BLANCOS B	30	95	815	60	191	1.630
18	NARCISO CAMPERO - A	36	114	972	72	228	1.945
19	NARCISO CAMPERO - B	22	71	603	45	141	1.206
20	OSCAR ZAMORA	36	113	967	72	226	1.934
21	PEDRO ANTONIO FLORES	17	55	468	35	109	935
22	SAN BERNARDO B	11	36	308	23	72	616
23	SAN JORGE II	16	49	419	31	98	838
24	SAN LUIS	34	106	908	67	213	1.816
25	SIMON BOLIVAR	25	80	684	51	160	1.368
26	STADIUM A	61	192	1.638	121	383	3.276
27	STADIUM B	34	107	917	68	215	1.834
28	TOMATAS	17	55	471	35	110	941
29	VALLE HERMOSO	22	70	597	44	140	1.194
30	VELA	17	55	467	35	109	933
31	VILLA FATIMA A	51	161	1.377	102	322	2.753
32	VILLA FATIMA B	23	74	629	47	147	1.259

Fuente: Elaboración propia.

#### ❖ Método Wissinlg

El método calcula un perímetro más detallado, si bien el ancho de la zona de llamada se mantiene constante pero la isocronas varían con el tiempo de tránsito.

Tabla 5.6. Perímetros de protección determinados por el método Wissinlg.

N°	Pozo	B	X <sub>o</sub>	B'	t (5 días)		t (50 días)		t (10 años)	
					S <sub>o</sub>	S <sub>u</sub>	S <sub>o</sub>	S <sub>u</sub>	S <sub>o</sub>	S <sub>u</sub>
1	27 DE MAYO	251	40	125	13	11	48	30	1.380	75
2	3 de MAYO	429	68	214	20	18	74	48	2.026	128
3	AEROPUERTO B	203	32	101	21	16	87	37	3.713	63
4	AVIT A	299	48	149	54	34	265	70	14.329	94
5	AVIT B	147	23	73	32	19	166	36	9.536	46
6	CIRCUNVALACIÓN A	67	11	34	26	12	159	19	10.241	21
7	CIRCUNVALACIÓN B	26	4	13	15	5	108	8	7.308	8
8	CONSTRUCTOR A	211	34	105	23	17	100	40	4.446	66
9	DANIEL CAMPOS	191	30	96	21	15	88	36	3.856	60
10	F.A.B.	320	51	160	19	16	72	42	2.287	97
11	GUADALQUIVIR	876	139	438	30	27	108	78	2.440	250
12	LOS ALAMOS	2.793	445	1.397	21	20	67	62	746	406
13	LOURDES	953	152	476	48	41	177	112	5.031	286
14	LUIS ESPINAL A	89	14	45	42	17	276	26	18.278	28
15	MONTECRISTO (PN)	1.236	197	618	33	31	114	89	2.216	334
16	MORROS BLANCOS A	133	21	66	28	17	145	33	8.255	42

17	MORROS BLANCOS B	191	30	95	39	24	196	46	11.010	60
18	NARCISO CAMPERO - A	453	72	226	41	32	167	77	6.711	141
19	NARCISO CAMPERO - B	244	39	122	26	19	110	45	4.769	76
20	OSCAR ZAMORA	3.099	493	1.550	36	35	120	107	1.552	603
21	PEDRO ANTONIO FLORES	377	60	188	19	16	69	44	1.938	113
22	SAN BERNARDO B	191	30	95	13	10	48	27	1.623	58
23	SAN JORGE II	641	102	320	16	15	55	44	1.032	170
24	SAN LUIS	482	77	241	38	30	149	76	5.533	149
25	SIMON BOLIVAR	269	43	134	29	22	126	51	5.559	84
26	STADIUM (P. antiguo)	771	123	385	69	54	281	131	11.190	240
27	STADIUM (P. nuevo)	483	77	242	38	30	151	76	5.625	150
28	TOMATAS	294	47	147	19	16	74	41	2.463	90
29	VALLE HERMOSO	119	19	60	29	17	160	31	9.447	38
30	VELA	113	18	56	22	14	110	27	6.119	36
31	VILLA FATIMA A	1.088	173	544	55	47	203	128	5.802	327
32	VILLA FATIMA B	235	37	118	27	20	118	46	5.364	74

*Fuente: Elaboración propia.*

Nota: B = Ancho de zona de llamada,  $X_0$  = El radio de llamada, B' = Ancho de frente de llamada,  $S_0$  = Distancia del perímetro aguas arriba,  $S_u$  = Distancia del perímetro aguas abajo.

### 5.3. RESULTADOS Y COMPARACIÓN DE ENTRE METODOLOGÍAS

Con los resultados obtenidos varias zonas pueden coincidir con una misma calificación por los dos métodos principales difiriendo también en otras zonas, se debe resaltar que, aunque gran parte de la muestra tiene un resultado moderado están a punto de convertirse en un grado alto.

Para la delimitación de perímetros se puede distinguir diámetros muy amplios tratándose de la zona alejada para ambos métodos en especial el Wising muchos de estos se sobreponen esto en consecuencia, tratándose de las zonas inmediatas se marcan perímetros de considerables superficies.

### 5.4. GENERACIÓN DE MAPAS DE NIVELES DE VULNERABILIDAD Y DELIMITACIÓN DE PERÍMETRO DE PROTECCIÓN

Con la ayuda de la información disponible de Geo Bolivia y el programa ArcGis con la herramienta de interpolación IDW se puede visualizar la situación de vulnerabilidad para la ciudad de Tarija.

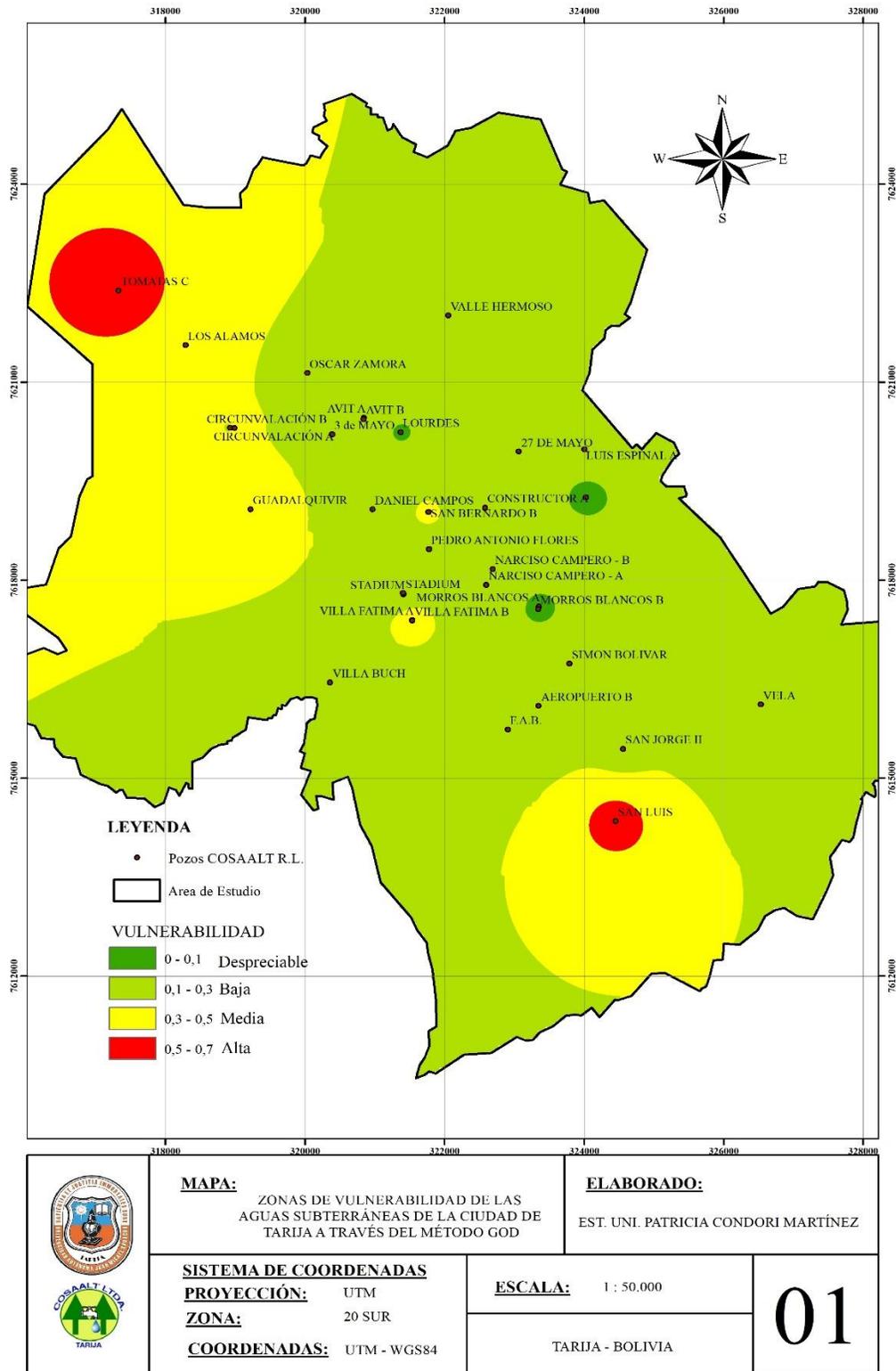
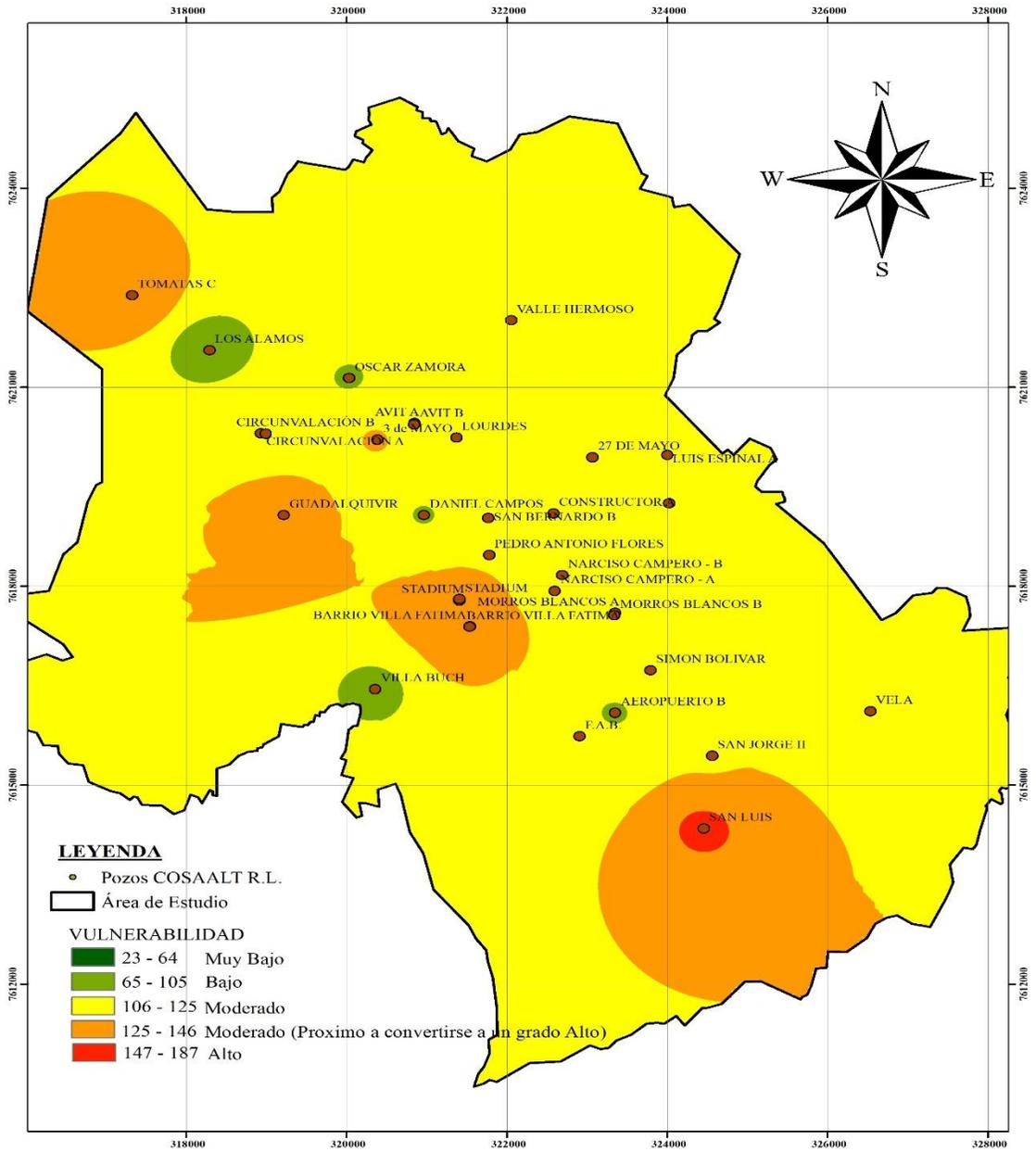


Figura 5.1. Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas "GOD".

Fuente: Elaboración propia.



 	<b>MAPA:</b> ZONAS DE VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE TARIJA A TRAVÉS DEL MÉTODO DRASTIC	<b>ELABORADO:</b> EST. UNI. PATRICIA CONDORI MARTÍNEZ
	<b>SISTEMA DE COORDENADAS</b> <b>PROYECCIÓN:</b> UTM <b>ZONA:</b> 20 SUR <b>COORDENADAS:</b> UTM - WGS84	<b>ESCALA:</b> 1 : 50.000  TARIJA - BOLIVIA

Figura 5.2. Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas "DRASTIC".

Fuente: Elaboración propia.

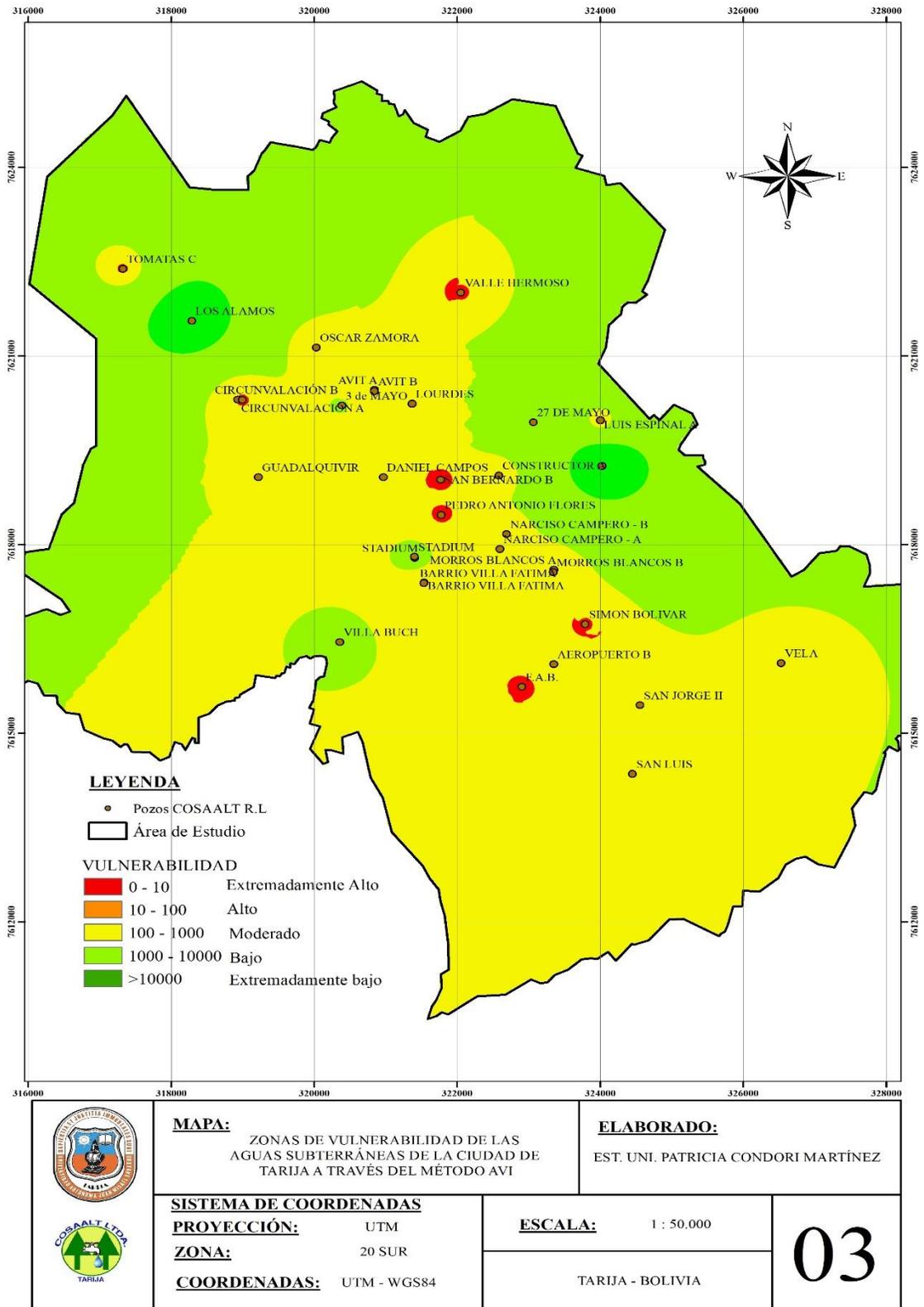


Figura 5.3. Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas AVI.

Fuente: Elaboración propia.

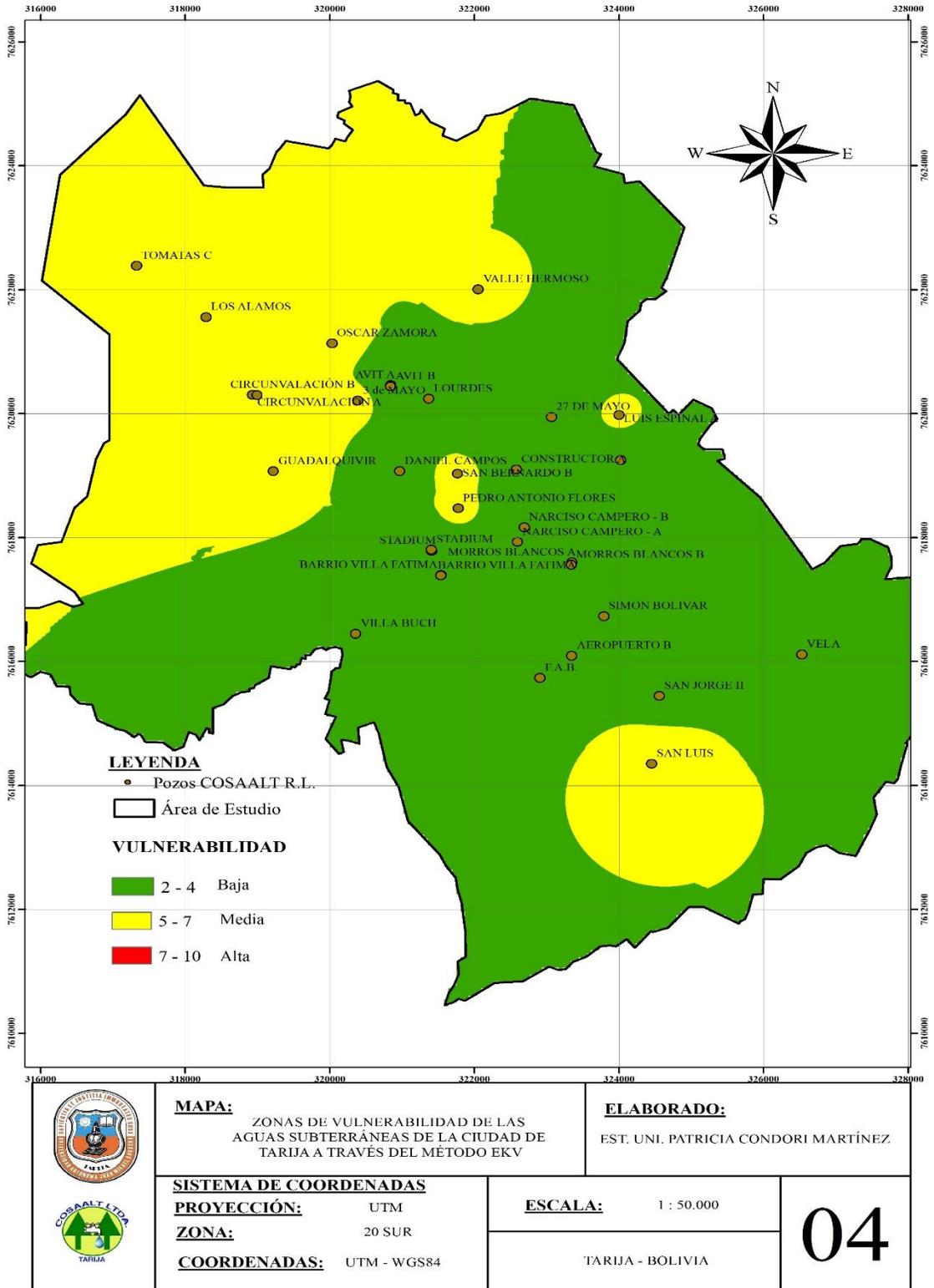
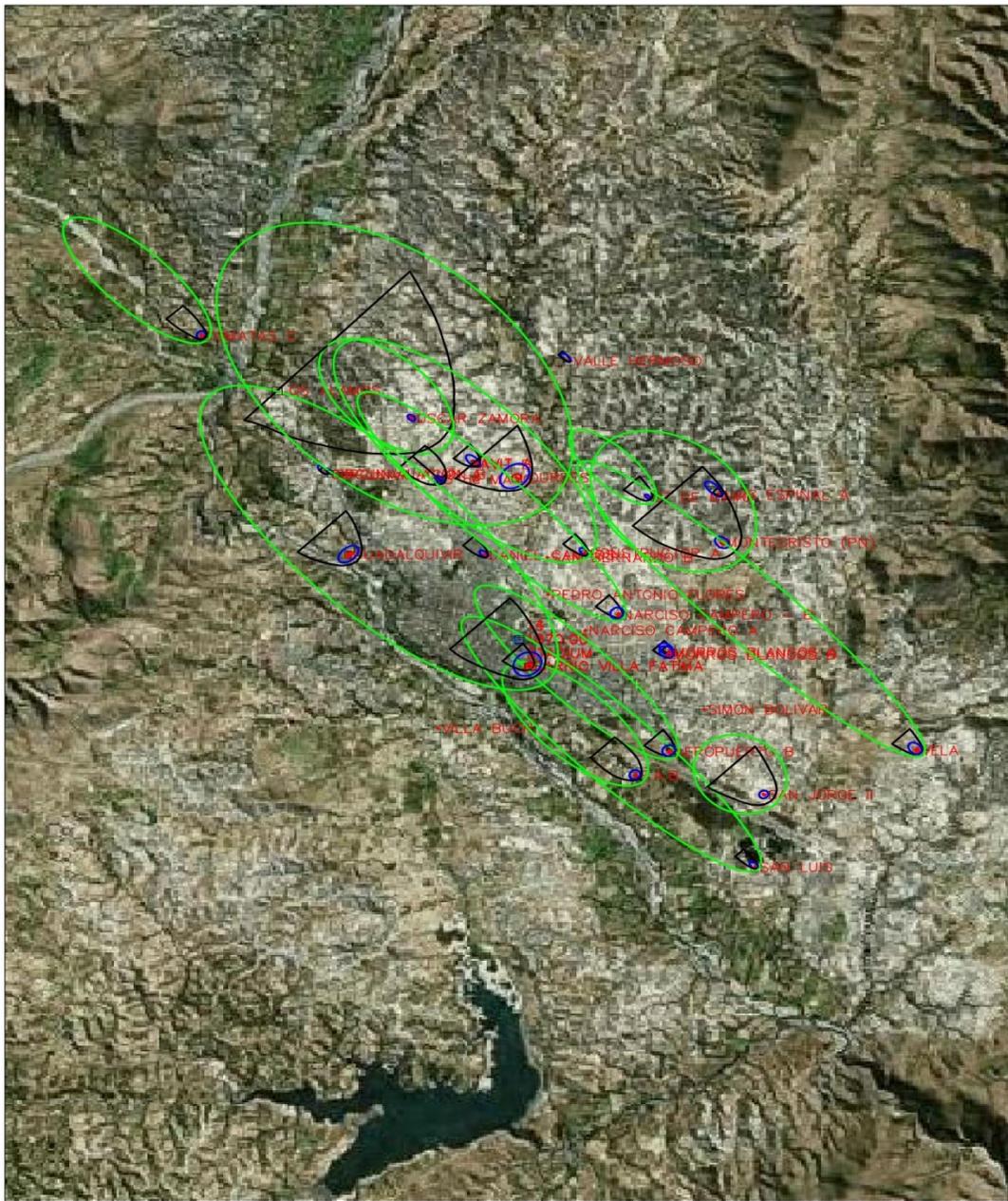


Figura 5.4. Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas Ekv.

Fuente: Elaboración propia.



 	<b>MAPA:</b> PERÍMETROS DE PROTECCIÓN A TRAVÉS DEL MÉTODO WISSINGL		<b>ELABORADO:</b> EST. UNI. PATRICIA CONDORI MARTÍNEZ	
	<b>SISTEMA DE COORDENADAS</b> <b>PROYECCIÓN:</b> UTM <b>ZONA:</b> 20 SUR <b>COORDENADAS:</b> UTM - WGS84		<b>ESCALA:</b> 1 : 50.000 TARIJA - BOLIVIA	
				05

*Figura 5.5. Perímetros de protección a través del método Wissingl.  
 Fuente: Elaboración propia..*

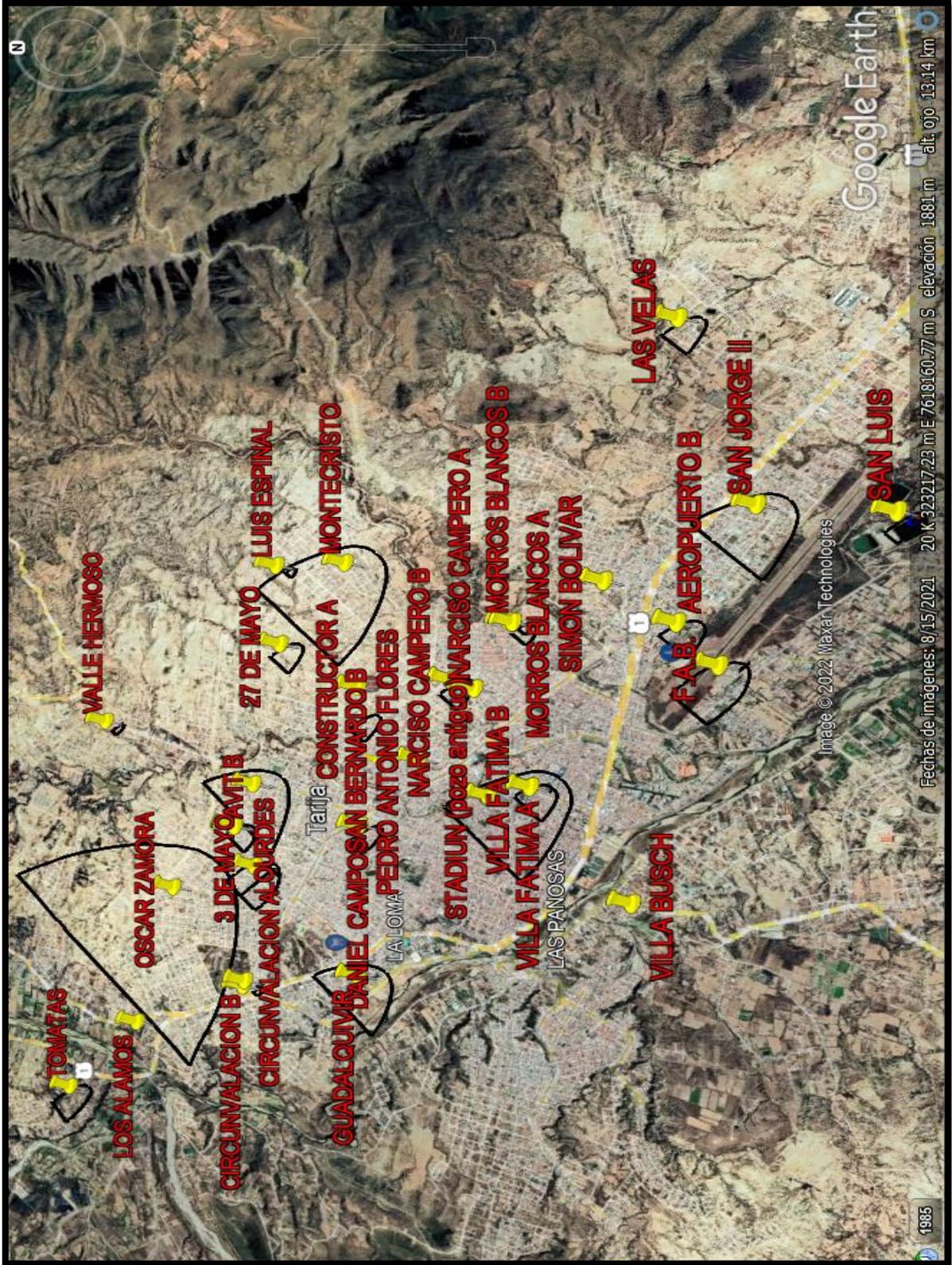


Figura 5.6. Perímetros de protección a través del método Wissingl (Google Earth).  
 Fuente: Elaboración propia..

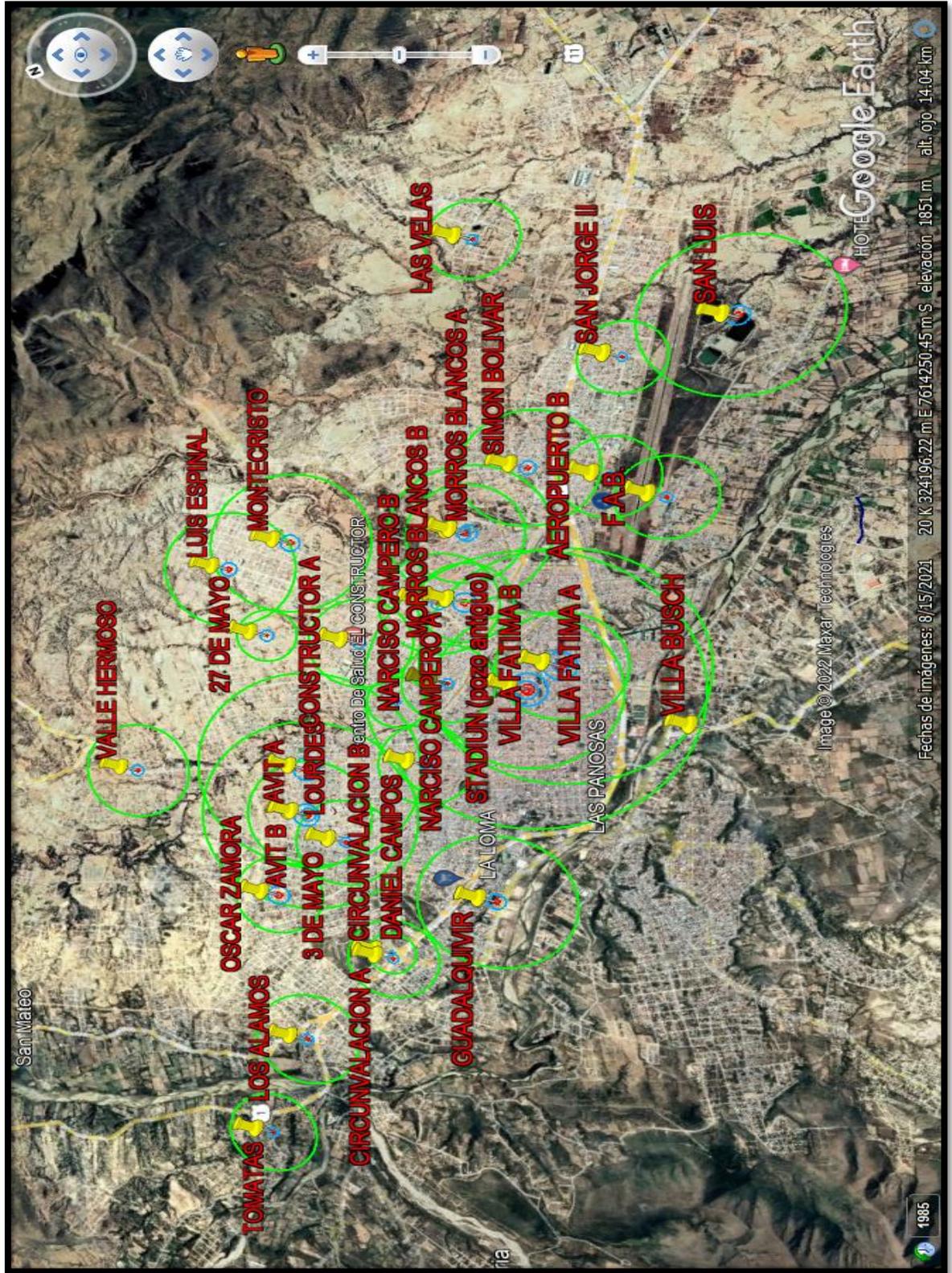


Figura 5.7. Perímetros de protección método Radio fijo (en función al tiempo de tránsito).  
 Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- A lo largo de este estudio se ha podido tratar los métodos para la hallar un grado al riesgo a la contaminación de la aguas subterráneas y perímetros de protección de los pozos, se evidencio que la hipótesis se cumple, seguido los resultados arrojan puntos más vulnerables que otros y superficies que son de influencia para estas aguas.

Comprendiendo las pautas, los criterios que se utilizaron, elementos que se consideraron para llegar a los resultados.

- Se determinó el grado de vulnerabilidad para todos los pozos, haciéndose notar la relación de los puntos con más alto grado entre GOD y DRASTIC, la diferencia entre sus resultados de estos con los métodos AVI y Ekv, esto se debe a que los dos últimos solo toman en cuenta la atenuación natural del suelo.
- Para el área de estudio con el método GOD se determinó que la mayor parte es considerado de bajo a moderado, el motivo es por la composición del material que se encuentra en la zona no saturada, gran cantidad de material fino en conjunto con material de buen drenaje, también considerando que las distancias desde la superficie del suelo hasta el encuentro con el agua se consideró la peor situación, la mayoría se encontraba por encima de los treinta metros, como estos factores son directamente proporcionales al índice de vulnerabilidad que influyen de manera significativa.
- Se obtuvo en la mayoría un grado moderado para el método de DRASTIC para una importante parte del área de estudio, resaltando un punto de alto grado como San Luis los pozos tomatas, Villa Fátima A y B y Guadalquivir están en un nivel moderado pero próximos a convertirse en alto, los resultados se ven influenciado por la recarga, el tipo de material en la zona saturada y la topografía, si bien la estimación de la recarga se realizó con la variación de niveles pero se tiene que considerar que la precipitación en gran parte del área urbana esta impermeabilizada con calles asfaltadas lo que provoca mayor escurrimiento y menos infiltración entonces se considera mínima la recarga de la lluvia que cae en la zona urbana.

➤ El método de VNF nos dio una aproximación de lo que acuífero es capaz de captar de todas las aportaciones por medio de sus propiedades que presenta la zona saturada, según la litología la zona saturada cuentan con un buen material de drenaje (gravas, arenas) en la mayoría de los pozos, por lo que si un contaminante llegaría a esta zona las consecuencias serían fatales, el otro factor es la pendiente que es muy desfavorable ya que con la poca circulación de cualquier fluido que estén contaminados o no, estos tienen más tiempo en depositarse y percolar en la zona no saturada.

➤ Con respecto al segundo objetivo específico, la aplicación del método AVI obtuvimos en unidades de tiempo la resistencia que puede tener el suelo a cualquier agente que entrará en contacto con la zona vadosa sus resultados en muchos puntos son de altas a extremadamente altas esto nos quiere decir lo susceptibles que quedarían estos pozos hacia agentes contaminantes.

El método Ekv para el área de estudio arroja un grado de media a bajo riesgo, el motivo es que el método se limita a los rangos de nuestra área de estudios, los espesores de las capas sedimentarias son de gran proporción en la mayoría de los pozos consecuentemente calificando en un grado menor, considerando también que este último método es más efectivo para acuíferos libre.

➤ La zonificación del área de estudio como un objetivo específico queda de la siguiente manera, la parte central del área urbana expandiéndose hacia el este como un acuífero confinado continuando hacia sus lados la mayor parte del área de estudio como acuífero semiconfinado y al sur encontrándonos con un acuífero libre

Una terminología más que se tomó en cuenta considerándolas como no confinadas pero cubiertas casi como un semiconfinado, teniendo una característica en la zona vadosa con espesores más generosos y más cercanos a la superficie de material de buen drenaje cubierto por encima de ellos suelo fino en su mayoría arcilla en algunos casos arenas con limo.

➤ Las zonas de mayor riesgo son los pozos de San Luis y Tomatas, en estos se tiene que tener de mayor precaución porque San Luis es un punto de descarga además que tienen proximidad a las lagunas de tratamiento de aguas residuales, cualquier accidente de derrame sería fatal, el pozo de Tomatas queda vulnerable al contener en su mayoría un

buen material permeable cualquier contaminante tendría toda la ventaja de expandirse y contaminar al acuífero aguas abajo.

- Determinando perímetros de protección con los métodos de radio fijo y Wisingl fueron de fácil aplicación con datos accesibles, adoptamos un criterio a partir de la experiencia de los países europeos en que los resultados difieren un poco dependiendo de las zonas para el primer método las zonas inmediatas o zona 1 no son menores que los 250 m<sup>2</sup> para el segundo método las distancias entre aguas abajo y arriba están desde los 5 a 16 m.

Para la zona 2 las superficies son por encima de los 2000 m<sup>2</sup> para el radio fijo las distancias con el método Wisingl las distancias aguas arriba crecen un poco más por encima de los 40 m, para la zona 3 los resultados arrojan radios mucho más grandes que se sobreponen entre los pozos.

- Implementar de una manera directa estos perímetros nos ponen en una situación difícil, debido a que cambiar de localización las actividades presentes si las hubiera dentro de estos perímetros y el costo que significaría las indemnizaciones a la población afectada por lo que nos lleva a pensar en otras soluciones.

Una salida puede ser el control de las actividades cercanas a los pozos, la verificación de los desagües para evitar todo tipo de derrames.

- Los mapas nos indican los puntos más densos donde podemos ver la diferencia de la determinación de la vulnerabilidad, estimando la influencia que tiene la calificación obtenida para los espacios entre pozo a pozo que están dentro del área de estudio.
- Casi en la mayoría de la aplicación de los métodos muestran que estamos en un grado moderado, pero teniendo a consideración que estas próximos a convertirse en grado alto, esto se debe tomar como una advertencia porque sin los cuidados y controles necesarios podríamos ser más vulnerables en poco tiempo.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- Creación de información geofísica a través SEV (Sondeo Eléctrico Vertical) por parte de instituciones locales (gobernación, alcaldía), en puntos relevantes para contener más información de la estructura geología para generar perfilados de la litología de la ciudad considerándolos para futuros estudios relacionados al tema.

- Proponer una modelación de acuíferos como un trabajo de investigación para crear una versión que simule de una manera aproximada los fenómenos que ocurren en el acuífero.
- Seguir fomentando a las instituciones la recolección de datos de este recurso hídrico, por su utilidad para futuros proyectos y de otra manera comprobar los cambios de que darán al transcurrir el tiempo.
- Considerar estudios más profundos en los puntos más susceptibles como San Luis y Tomatas, estudios hidroquímicos modelación de la expansión de contaminantes.
- Si bien los grados de vulnerabilidad son moderados, una buena iniciativa es de controlar en que estados se encuentran las actividades cercanas hacia los pozos.
- Abordar el tema de crear una ley o normativa al cuidado y restricción de cualquier actividad agrícola o cualquier tipo de asentamiento humano en las áreas de recarga que la para la ciudad de Tarija es el pie de monte de Sama y las riveras del río de la Victoria ya que de gran importancia para el funcionamiento del sistema de agua subterránea.
- Tomar en consideración el concepto de estrés hídrico, una evaluación de la extracción del agua subterránea de las fuentes de abastecimiento, organizar para tener un plan si nos encontramos con esta situación.