

## **1.1.Introducción**

El agua es un elemento indispensable para todo tipo de vida, por lo tanto debe de ser cuidada para su consumo responsable y de esta manera no generar daños ambientales irreversibles en nuestro planeta.

Un acuífero es la fuente de explotación de agua subterránea y sus aportes son por la precipitación, este aporte puede llegar a ser de manera directa o indirectamente siendo generado por los flujos de agua subterránea que llega de una cuenca cercana.

El objetivo principal de esta investigación es aportar con un diagnóstico del comportamiento de los niveles freáticos al estudio de las aguas subterráneas debido a que es un área de estudio no explorada en profundidad.

Según las investigaciones realizadas del agua subterránea en la ciudad de Tarija se tiene un último estudio elaborado en el año 1980 por las Naciones Unidas en el Valle Central de Tarija, al no haberse realizado estudios actualizados de este tema se plantea realizar un diagnóstico detallado del comportamiento de las aguas subterráneas de los pozos operados en la zona urbana de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

El sistema de abastecimiento de agua potable en la mayoría de los barrios es mediante pozos perforados para extracción del agua subterránea.

Con datos brindados de los niveles freáticos por la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija (COSAALT), se diagnostica el comportamiento del agua subterránea y de esta manera poder cuidar el recurso natural que es vital para la vida.

Se elabora un mapa isofreático de los niveles freáticos mensuales y un mapa de zonificación de acuerdo a las variaciones anuales del nivel freático de los pozos del área de estudio.

Se realiza una comparación del hidrograma del nivel freático de los pozos de observación con el hidrograma de la precipitación mensual del área urbana de la ciudad de Tarija con la que se evalúa el comportamiento de la recarga del acuífero.

Los datos de la precipitación mensual se obtuvieron de la estación Aeropuerto perteneciente a la red estatal del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Con la investigación del presente trabajo se pretende realizar un aporte tanto académico como social.

## **1.2. Justificación de la investigación**

Todos los seres humanos consumimos agua para satisfacer nuestras necesidades básicas; el problema surge cuando se excede los niveles de consumo, ante esta preocupación emerge la necesidad de estudiar el comportamiento de las aguas subterráneas.

Con los datos brindados del nivel de las aguas subterráneas desde septiembre de 2018 a diciembre de 2019 de cuarenta pozos de abastecimiento y control del área urbana de la ciudad de Tarija operados por cooperativa COSAALT, se diagnosticará el comportamiento del nivel freático de las aguas subterráneas.

De esta manera se aportará con una investigación en este campo de la ingeniería que no es tan estudiado.

## **1.3. Planteamiento del problema**

Cuál es el comportamiento del nivel freático de la zona urbana en la ciudad de Tarija de acuerdo a los datos de los pozos operados por la cooperativa COSAALT.

## **1.4. Hipótesis del trabajo a investigar**

Con la evaluación del nivel freático de los pozos de observación de COSAALT de la zona urbana de la ciudad de Tarija se podrá diagnosticar el comportamiento del nivel freático y de esta manera cuidar el recurso hídrico.

## **1.5.Objetivos**

### **1.5.1.Objetivo general**

Diagnosticar el comportamiento del nivel freático de los pozos que maneja COSAALT en la zona urbana de la ciudad de Tarija para cuidar el recurso hídrico.

### **1.5.2.Objetivos específicos**

- Elaborar una tabla para registrar la función del pozo, el barrio de abastecimiento y la fecha de inicio de operación de los pozos que maneja COSAALT en la zona urbana de la ciudad de Tarija.
- Elaborar un mapa isofreático de los niveles estáticos de los pozos de observación de COSAALT en el área urbana de la ciudad de Tarija para señalar la dirección del flujo.
- Evaluar las variaciones de los niveles freáticos anuales para zonificar el área urbana de la ciudad de Tarija.
- Comparar el hidrograma del nivel freático estático de los pozos de observación y el hidrograma de la precipitación mensual de la estación Aeropuerto del área urbana de la ciudad Tarija para evaluar el comportamiento de la recarga en la época de lluvia y de estiaje.

## **1.6.Metodología**

El presente trabajo de investigación es un estudio exploratorio y descriptivo que diagnosticará el nivel freático que es poco estudiado, indicando cual será el sentido del flujo del agua subterránea, la variación anual del nivel freático y como es el comportamiento de la recarga en épocas de lluvia y de estiaje para cuidar el recurso hídrico.

## Área de estudio

Se realizó el diagnóstico del nivel freático en el área urbana de la ciudad de Tarija de acuerdo a los datos de los pozos operados por COSAALT.

## Datos

Con el registro de los niveles freáticos realizados por COSAALT de los cuarenta pozos de observación del área urbana de la ciudad de Tarija se diagnosticó el comportamiento de los niveles freáticos.

Para la elaboración del mapa de isolíneas se tomaron datos de los cuarenta pozos de observación.

En el diagnóstico de la variación anual del nivel freático se tomaron los datos de veinticuatro pozos, descartando dieciséis por la falta de información del nivel freático al inicio de su operación.

Para evaluar el comportamiento de la recarga en época de lluvia y estiaje se utilizaron datos de ocho pozos que tienen información completa mensual de sus niveles freáticos.

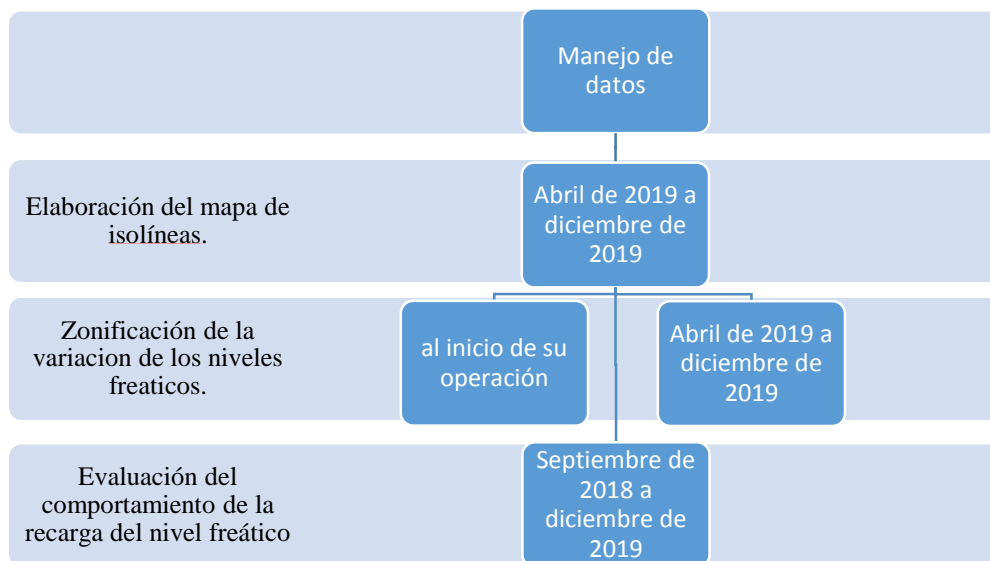


Figura 1. Escala temporal.  
Fuente: Elaboración propia.

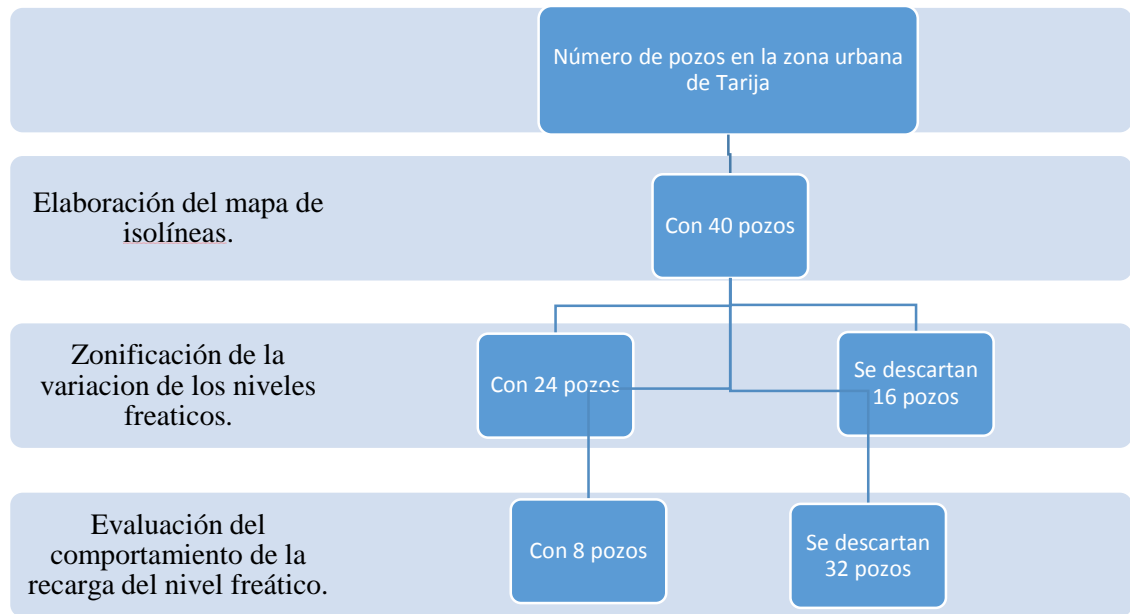


Figura 2. Escala espacial.  
Fuente: Elaboración propia.

### Factores evaluados

El factor evaluado es el nivel freático estático de los cuarenta pozos del área urbana de la ciudad de Tarija que fueron recopilados de la base de datos de COSAALT.

### Procedimiento

Se realizó una tabla que indique la función del pozo, el barrio de abastecimiento y la fecha de inicio de operación de los cuarenta pozos de observación del área urbana de la ciudad de Tarija.

Con la medida del nivel piezométrico de los cuarenta pozos de observación en el área urbana de Tarija en el año 2019, se realizó el mapa isofreático, obteniendo la cota del nivel del agua, que es igual a la cota del terreno menos la profundidad del agua.

Se trazó las isolíneas mediante líneas de igual altura piezométrica con una equidistancia de 10 m, de forma similar a la representación de una superficie

topográfica mediante curvas de nivel y las líneas de flujo serán perpendiculares a las isolíneas.

Se calculó la variación anual del nivel freático con la diferencia del nivel freático al inicio de su operación del pozo y el nivel freático registrado en el año 2019 dividiendo con los años de operación.

Se determinó un rango de variación anual del nivel freático para realizar un mapa de zonificación del área urbana de la ciudad de Tarija.

Se graficó los hidrogramas de la precipitación mensual de la estación Aeropuerto de Tarija y del nivel freático de los pozos que maneja COSAALT para comparar y evaluar el comportamiento de la recarga en épocas de lluvia y de estiaje.

## 2.1. Agua subterránea

El agua subterránea es relativamente libre de contaminación y es particularmente útil para uso doméstico en pueblos pequeños y en granjas aisladas.

En regiones áridas, el agua subterránea es frecuentemente la única fuente segura de abastecimiento para irrigación. Dado que las temperaturas del agua subterránea son relativamente bajas, grandes cantidades de ella se utilizan para enfriamiento en zonas cálidas. Aparte de uso directo, el agua del sub suelo representa también una fase muy importante del ciclo hidrológico.

La mayor parte del flujo en corrientes permanentes de agua proviene del agua subterránea, mientras que una gran parte del flujo en corrientes intermitentes puede filtrarse bajo la superficie.

De este modo ningún examen sobre agua superficial puede ignorar las relaciones con los procesos subsuperficiales.

Dado que el estado y movimiento del agua subterránea están íntimamente ligados con la estructura geológica del terreno, la comprensión de los controles geológicos es un prerrequisito para el correcto entendimiento de los procesos de hidrología subsuperficial. (Linsley et al., 1977:157)

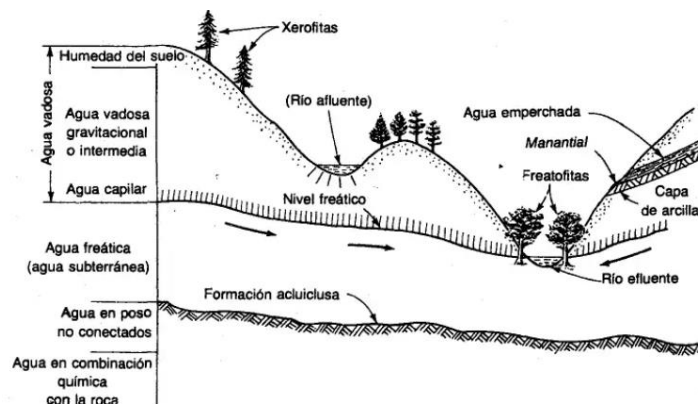


Figura 3. Sección transversal esquemática que muestra el estado del agua subterránea.

Fuente: Linsley et al. 1977.

## 2.2. Estado del agua subterránea

La figura 3 es una sección transversal esquemática de la parte superior de la corteza terrestre con una columna idealizada que muestra una clasificación común del agua subterránea.

Las dos regiones principales están separadas por una superficie irregular llamada nivel freático o tabla de agua en un acuífero inconfinado es el lugar geométrico de los puntos donde la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica.

Por encima del nivel freático está la zona vadosa en la cual los poros del suelo pueden contener aire o agua; por esta razón se llama también zona de aeración.

En la zona freática, por debajo de la tabla de agua, los intersticios están llenos de agua por lo cual esta zona se llama también zona de saturación.

La zona freática puede extenderse a una profundidad considerable, pero, a medida que aumenta la profundidad, el peso de la sobrecarga tiende a cerrar los poros de manera que es poca el agua que se encuentra en el suelo a profundidades superiores a los 3 kilómetros.

Se encuentran a menudo zonas localmente saturadas que constituyen los llamados conos de agua emperchada sobre lentes o estratos de material impermeables.

Algunas veces el agua subterránea se halla en una formación recubierta por un estrato impermeable, formando así un acuífero confinado o artesiano.

Los acuíferos confinados se encuentran generalmente a presión debido al peso de la sobrecarga y a la cabeza hidrostática.

Si un pozo llega a penetrar la capa confinante, el agua subirá hasta alcanzar el nivel piezométrico que es el equivalente artesiano de la tabla de agua.

Si el nivel piezométrico se halla por encima de la superficie del terreno, el pozo descargara como un manantial. (Linsley et al., 1977:158)



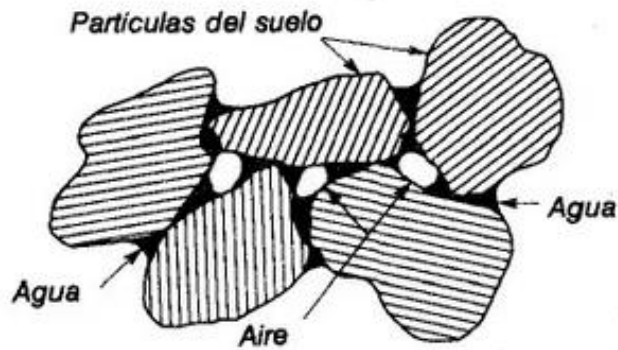


Figura 4. Humedad capilar del suelo.  
Fuente: Linsley et al. 1977.

### 2.3. Orígenes del agua subterránea

Casi toda el agua subterránea es agua meteórica proveniente de la precipitación.

En algunos sitios se encuentra agua de formación, presente en la roca durante su formación o deposición, y generalmente de alto contenido salino.

En menores cantidades existe también la llamada agua juvenil, formada químicamente dentro del subsuelo y traída a la superficie por rocas intrusivas. Tanto el agua de formación como el agua juvenil con frecuencia son fuente de minerales indeseables en el agua subterránea.

El agua de lluvia llega a formar parte del agua subterránea por infiltración y percolación de corrientes y lagos. La percolación directa es el proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea donde los suelos son altamente permeables o donde la capa freática está cerca de la superficie del terreno.

En sitios donde la precipitación anual es relativamente baja y la capa freática está a cientos de metros bajo la superficie, se puede esperar muy poca o nula recarga.

En estas áreas el agua de irrigación puede producir alguna recarga, pero la infiltración del agua de los ríos a través de gravas permeables será posiblemente la mayor fuente de recarga. Los ríos que contribuyen al agua subterránea se denominan corrientes afluentes.

Dichas corrientes se secan con frecuencia durante sequias prolongadas, cuando la percolación absorbe todo el caudal disponible, comportándose así como corrientes intermitentes.

Las corrientes de agua casi nunca son afluentes en toda su longitud. A veces el canal cruza estratos de diferente permeabilidad, donde ocurren las mayores pérdidas por percolación en tramos cortos de alta permeabilidad. Con frecuencia se encuentran áreas de considerable percolación en las corrientes que cruzan estratos de grava procedentes de abanicos aluviales.

En áreas de agua subterránea artesiana la capa acuiclosa superior impide una recarga directa apreciable; el área de recarga puede estar muy alejada del acuífero artesiano. (Linsley et al., 1977:166)

#### **2.4. Importancia del estudio de las aguas subterráneas**

El agua subterránea es utilizada para el abastecimiento de agua potable, tanto en viviendas individuales, como en aglomeraciones urbanas, en proyectos agropecuarios para riego y para uso animal; igualmente, muchas industrias consumidoras de grandes cantidades de agua hacen uso de este recurso.

Uno de los aspectos que hacen particularmente útil el agua subterránea para el consumo humano es la menor contaminación a la que está sometida y la capacidad de filtración del suelo que la hace generalmente más pura que las aguas superficiales.

Además que este recurso es poco afectado por períodos prolongados de sequía. La utilización del agua subterránea se ha venido incrementando en el mundo desde tiempos atrás y cada día gana en importancia debido al agotamiento o no existencia de fuentes superficiales. (Velez, 1999:3)

#### **2.5. Descripción del movimiento del agua**

El agua que se encuentra en la atmósfera en forma de vapor se condensa en nubes, las cuales originan las precipitaciones (P) en forma de nieve, lluvia o granizo. Una parte

de dichas precipitaciones se evapora nuevamente antes de llegar a la superficie del suelo y la otra cae al suelo por la acción de la gravedad.

De esta última, una parte es interceptada por la vegetación o por otras superficies y luego se evapora igualmente y la otra entra en contacto directo con el suelo o con cuerpos de agua (lagos y mares principalmente).

Aquella que cae al suelo puede alimentar la red hidrográfica directamente (escorrentía superficial), almacenarse en algunas partes de la superficie (almacenamiento superficial) o penetrar en el suelo y subsuelo (infiltración) para de esta manera alimentar las reservas de las capas acuíferas. (Ver Figura 5).

La energía calorífica proveniente del sol evapora parte del agua que está en las superficies libres (lagos, mares, etc.), en la red hidrográfica y en la superficie del suelo. De igual manera una parte del agua que está en la zona no-saturada del suelo se evapora directamente o se absorbe por las plantas las cuales a su vez le devuelven a la atmósfera en forma de vapor mediante el mecanismo de transpiración.

Estos fenómenos son generalmente designados con el término de evapotranspiración. En cuanto al agua que se ha infiltrado en las zonas más profundas de la corteza terrestre y que alimenta las capas acuíferas, puede alcanzar más profundidad, o pasar a alimentar el flujo de los ríos, o retornar directamente a los mares a causa de la percolación, donde se inicia nuevamente el ciclo.

La Figura 5 es una representación del ciclo hidrológico. De la anterior descripción se desprende lo siguiente:

Las fuentes principales de energía que mueven el ciclo del agua a través de sus diferentes fases son la energía calorífica proveniente del sol y la energía gravitacional

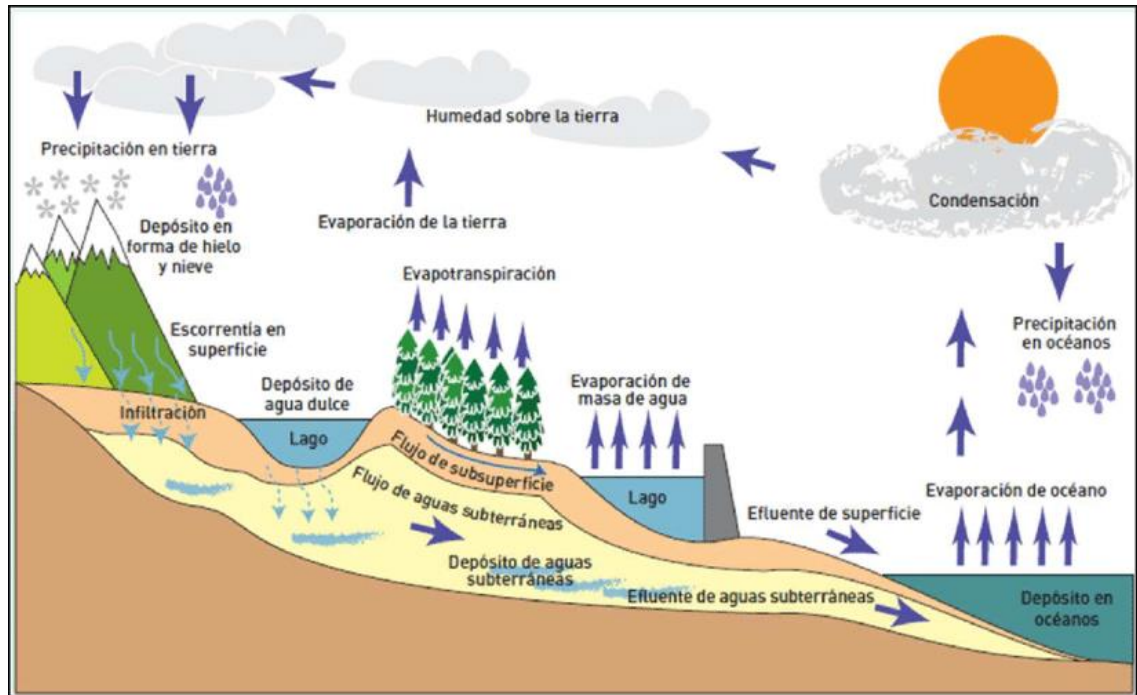


Figura 5. El ciclo hidrológico.

Fuente: [https://1.bp.blogspot.com/9d1oNjnLuA4/XMbk4mADJdI/AAAAAAAAAOc/HbtA8xCPBX4II\\_pxrN5n6RlnAbpzJU0QQCEwYBhgL/s1600/Ciclo-Hidrologico-del-Agua.png](https://1.bp.blogspot.com/9d1oNjnLuA4/XMbk4mADJdI/AAAAAAAAAOc/HbtA8xCPBX4II_pxrN5n6RlnAbpzJU0QQCEwYBhgL/s1600/Ciclo-Hidrologico-del-Agua.png)

Las fases del ciclo son las siguientes:

- Precipitación (P)
- Evapotranspiración (ET)
- Escorrentía superficial (ES)
- Infiltración (I)

En el desarrollo de estos procesos el agua se encuentra, como ya se mencionó, en diferentes estados y en distintos almacenamientos. Así una partícula de agua que dé el ciclo completo y que se encuentra en el océano pasa, en razón de la evaporación, a la atmósfera en forma de vapor; después de un cierto tiempo se condensa y cae a la superficie bajo la forma de lluvia y luego como escorrentía superficial o subterránea, puede volver al mar.

Ligado a lo anterior aparece un concepto importante cual es el de tiempo de residencia que da una idea del orden de magnitud del tiempo medio que una partícula de agua permanece en cada emplazamiento. (Velez, 1999:16)

## 2.6. Flujo no saturado

En la figura 6 se muestran en forma esquemática los procesos de flujo subsuperficial y las zonas en que ellos ocurren.

Tres procesos importantes son la *infiltración* de agua superficial en el suelo para convertirse en *humedad del suelo*, el *flujo subsuperficial* o flujo no saturado a través del suelo, y el *flujo de agua subterránea* o flujo saturado a través de los estratos de suelo o roca. Los estratos de suelo o roca que permiten el flujo de agua se denominan *medios porosos*.

El flujo es no saturado cuando el medio poroso todavía tiene algunos de sus vacíos ocupados por aire y es saturado cuando los vacíos están llenos de agua.

El *nivel freático* es la superficie donde el agua se encuentra a presión atmosférica en un medio saturado. Por debajo del nivel freático, el medio poroso se encuentra saturado y a presiones superiores a la atmosférica.

Por encima del nivel freático, las fuerzas capilares pueden saturar el medio poroso a lo largo de una corta distancia en la *franja capilar*, por encima de la cual el medio poroso se encuentra usualmente no saturado excepto después de una lluvia, cuando la infiltración desde la superficie del terreno puede producir temporalmente condiciones de saturación.

Las *salidas de agua subsuperficial* y *agua subterránea* ocurren cuando el agua subsuperficial emerge para convertirse en flujo superficial en una corriente o manantial. La humedad del suelo se extrae por evapotranspiración a medida que el suelo se seca. (Chow et al., 1994:101)

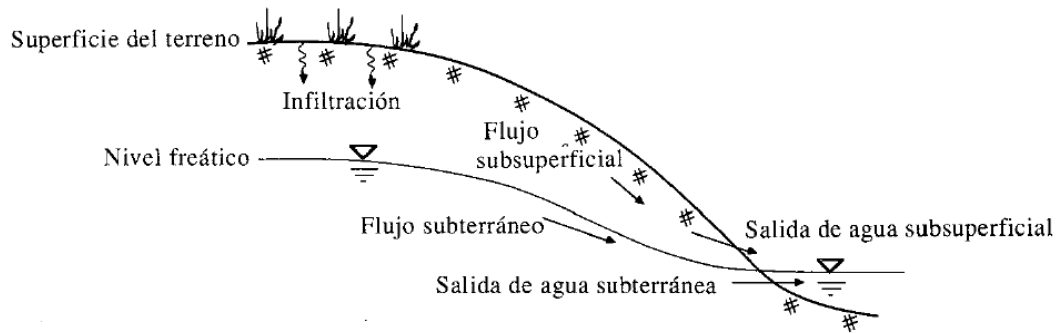


Figura 6. Zonas y procesos del agua subterránea.  
Fuente: Chow et al. 1994.

## 2.7. Humedad en la zona freática

Dentro de la zona freática todos los espacios porosos están llenos de agua y los diferentes estados de humedad, tensión de humedad y demás, son de poco interés.

La atención en este caso se encuentra en determinar la cantidad de agua presente, la cantidad que se puede extraer y el movimiento del agua en esta zona. (Linsley et al., 1977:163)

## 2.8. Concepto de hidrogeología

La definición y los términos utilizados para denominar el estudio de las aguas subterráneas han variado a través del tiempo.

Actualmente se aceptan como términos adecuados los de hidrología subterránea (para diferenciarla de la hidrología de superficie, división ésta introducida por Meinzer en 1942), hidrogeología o geohidrología.

Así pues, puede decirse que la hidrogeología hace parte de la hidrología general considerando ésta como “la ciencia que trata de las aguas terrestres, de sus maneras de aparecer, de su circulación y distribución en el globo, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre”, definición ésta adoptada por el Comité Coordinador del decenio hidrológico internacional iniciado en 1965 bajo patrocinio de la UNESCO.

Puede entonces definirse la hidrología subterránea como “aquella parte de la hidrología que estudia el almacenamiento, la circulación y la 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 a la acción del hombre”. (Velez, 1999:7)

## **2.9. La hidrogeología en el campo de las ciencias**

La hidrogeología es una rama del conocimiento que se basa y utiliza el concurso de muchas y muy variadas disciplinas, una de las principales es la geología ya que son precisamente las formaciones geológicas las que constituyen el medio donde se almacena y se mueve el agua subterránea. Sin un conocimiento básico de ciertos aspectos de la geología es imposible un estudio de los recursos en aguas subterráneas y mucho menos su explotación racional. Otras disciplinas son:

- La hidroquímica que permite el conocimiento de las características químicas del agua que va a ser explotada, aspecto éste esencial tanto desde el punto de vista técnico como en lo que se relaciona con la utilización.
- La mecánica de los fluidos para poder estudiar las leyes que rigen el movimiento de un fluido en un medio poroso.
- La hidrología de superficie ya que los recursos superficiales están íntimamente relacionados con las aguas subterráneas.
- La climatología para evaluar la precipitación y la evapotranspiración, factores esenciales desde el punto de vista cuantitativo, en particular en lo relativo a la recarga de los acuíferos.
- La estadística, en particular con el desarrollo de nuevos métodos basados en variables aleatorias que permiten estimar los recursos en aguas subterráneas de una región dada. (Velez, 1999:7-8)

## **2.10. Acuíferos**

Una formación geológica que contiene agua y que la transmite de un punto a otro en cantidades suficientes para permitir su desarrollo económico, recibe el nombre de acuífero.

En contraste un acuífero es una formación que contiene agua pero que no la transmite con la rapidez suficiente para proveer un abastecimiento significativo a un pozo o a un manantial. Un acuífero no tiene intersticios interconectados y no puede retener o transmitir agua.

La relación de volumen de poros al volumen total de la formación se denomina porosidad. La porosidad original de un material es aquella que existía en el tiempo en el cual el material fue formado.

La porosidad secundaria es el resultado de fracturas y canales de solución.

La porosidad secundaria no se puede medir sin ayuda de una muestra tan grande que resulta imposible de tomar.

La porosidad original generalmente se mide secando en un horno una muestra inalterada del terreno y pesándola. (Linsley et al., 1977:163)

## **2.11. Tipos de acuíferos y su comportamiento**

Ante todo conviene indicar, que cuando se bombea un pozo, baja el nivel de agua en el mismo, y en toda la porción de acuífero circundante a él.

El descenso de nivel es más pronunciado en el pozo, y aminora a medida que aumenta la distancia al mismo.

La distancia existente entre el pozo de bombeo y la zona del acuífero, en que la influencia puede considerarse nula, es el llamado radio de influencia. En la figura 7 se esquematiza gráficamente.



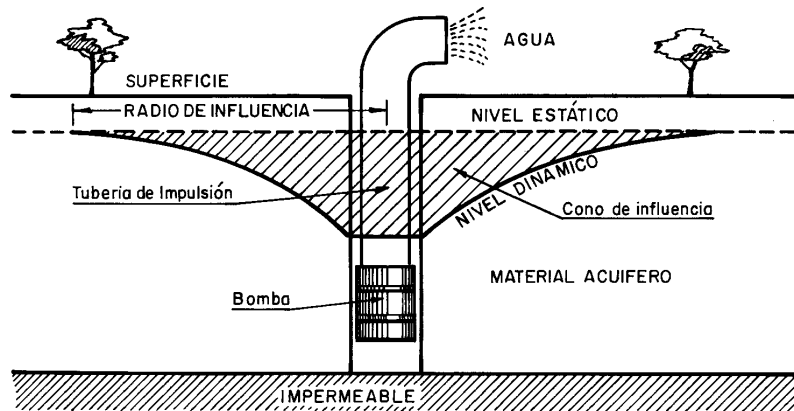


Figura 7. Cono de influencia al bombear un pozo de captación.  
Fuente: Villanueva e Iglesias. s/f.

En definitiva, se forma un torno al pozo un gran cono de bombeo, cuya superficie es la superficie piezométrica dinámica, y el valor del nivel de agua en un punto de dicha superficie es el llamado nivel dinámico.

El nivel estático es el que existía en el acuífero antes de empezar el bombeo. Hechas estas consideraciones iniciales, se pasa a comentar los tipos de acuíferos que existen en la naturaleza.

Desde el punto de vista de su textura, existen fundamentalmente tres tipos de materiales acuíferos:

- Aquellos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución. Forman en conjunto los acuíferos kársticos y fisurados, y se encuentran entre ellos, las calizas, dolomías, granitos y basaltos, etc., siendo los dos primeros los tipos más importantes.
- Aquellos cuya permeabilidad es debida a su porosidad intergranular. Son los denominados acuíferos porosos y se encuentran entre ellos, las gravas, arenas, arcosas, etc., y en general todos los materiales detríticos con tamaño de grano de arena como mínimo.

- Por último, están los acuíferos cuya permeabilidad es debida a un conjunto de las dos anteriores causas y se tienen así los acuíferos kársticos y porosos. Son típicas las calcarenitas.

En general los porosos son más homogéneos, aun dentro de la heterogeneidad que hay que admitir a todos los acuíferos. Tanto estos como los kársticos-porosos son capaces de almacenar gran cantidad de agua por unidad de volumen de acuífero y por tanto, son en general acuíferos lentos que reaccionan con inercia a los bombeos. Los radios de influencia suelen ser más cortos que en los kársticos.

Los kársticos, sin embargo, son menos homogéneos y suelen ser más dispares los resultados de los ensayos. Tienen menor capacidad para almacenar agua y pueden ser considerados por ello acuíferos rápidos, en los que los radios de influencia son más altos que en los restantes acuíferos.

De otra parte, estos acuíferos según sus circunstancias hidráulicas y estructurales pueden reaccionar de tres distintas formas:

- *Acuíferos libres.* Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. El agua que ceden es el agua que tienen almacenada en sus poros. Este volumen de agua es alto en comparación con los acuíferos que se comentan a continuación, y por ello tienen bastante inercia. Los conos de bombeos suelen ser esbeltos, es decir, con elevados descensos de nivel en el pozo y corto radio de influencia.
- *Acuíferos cautivos o confinados.* Son aquellos que están absolutamente aislados en el subsuelo, es decir, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de dicho material acuífero. En realidad, están a presión o en carga, debido al peso de los materiales superiores. El agua que ceden procede de la descompresión de estas capas superiores, cuando se procede la depresión en el acuífero. En rigor, no existen en la naturaleza acuíferos cautivos puros, dado que no existen materiales absolutamente impermeables capaces de aislarlos, aunque a efectos prácticos

muchos podrán considerarse como tales, entre otros, aquellas formaciones permeables que permaneces cautivas en una gran extensión y afloran en superficie por alguno de sus extremos. Se consultará más adelante este caso. Son acuíferos rápidos con muy poca inercia, debido a su baja capacidad de almacenar agua, que reaccionan, o transmiten en seguida las influencias de un bombeo puntual. Los conos de bombeo suelen ser de menor altura que en los libres, pero con radios de influencia largos.

- *Acuíferos semiconfinados*. En ellos los materiales que los rodean no son todos impermeables. Así, el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado. Consecuentemente, la velocidad de reacción de estos acuíferos ante un bombeo es más moderada que en los cautivos y los radios de influencia tienen valores medios entre libres y cautivos.

De acuerdo con esto, se puede tener una idea cualitativa de la forma de los conos de influencia y de la velocidad de reacción de los diversos acuíferos ante un bombeo.

Por ejemplo, los acuíferos más lentos, es decir, los que transmiten con menor velocidad las influencias de los bombeos y que además tendrán conos de influencia profundos, pero de radios cortos, serán aquellos de textura porosa granular cuando trabajan como libres.

Recíprocamente, los acuíferos que acusaran con mayor velocidad los efectos de un bombeo puntual, con conos de bombeo poco profundos y radios de influencia largos, serán los kársticos, cuando trabajan como cautivos. (Villanueva e Iglesias, s/f: 18-20)

## **2.12. Captaciones de agua subterránea**

Se llamará captación de agua subterránea a toda instalación que permita poner a disposición de uso el agua contenida en los acuíferos.

- *Pozos*. Perforación vertical, en general de forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad. El agua penetra a lo largo de las paredes creando un

flujo de tipo radial. Es con mucho el tipo de captación más común, a la que se dedicará la mayor parte de esta sección.(Custodio y Llamas, 1983:620)

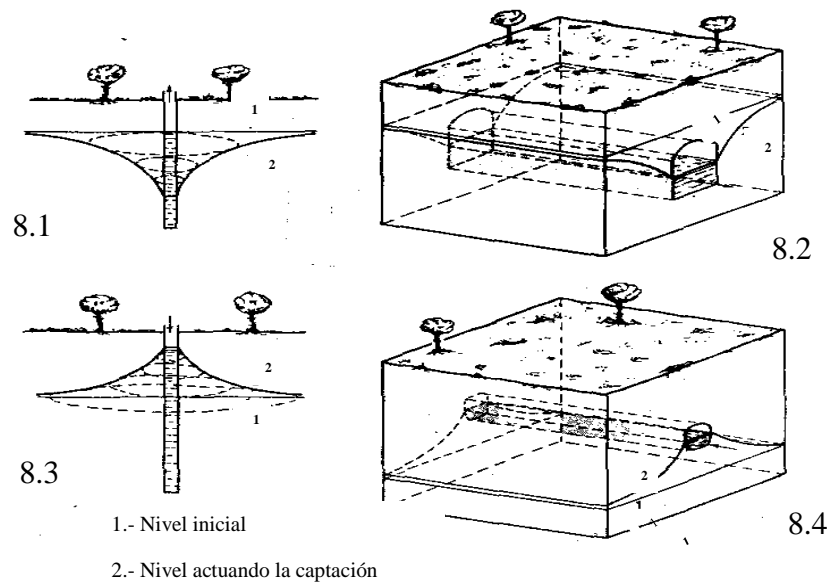


Figura 8. Efecto de las captaciones en el nivel del agua de los acuíferos.

- 8.1 Formación del embudo o cono invertido de descensos a consecuencia de un pozo de bombeo.
- 8.2 Formación de un valle de drenaje a consecuencia de una captación en galería.
- 8.3 Formación de un domo de inyección a consecuencia de un pozo de recarga.
- 8.4 Formación de un cresta de recarga a consecuencia de la introducción de agua por un tubo horizontal filtrante (dren inverso).

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

### 2.13. Filtro de pozo

El filtro es uno de los componentes más importantes para el correcto funcionamiento de un pozo para la extracción de agua. Básicamente, consiste en un caño o tubo con orificios a través de los cuales ingresa el agua contenida en un acuífero, pero no el material granular natural de la formación productiva, ni el que se hubiese agregado artificialmente (engravado).

Un filtro eficiente debe permitir el ingreso a la perforación, durante las tareas de desarrollo, de los componentes finos naturales del acuífero y de los introducidos artificialmente durante la ejecución del pozo.

De esta forma se logra un incremento de permeabilidad en la vecindad del filtro, que puede aumentar considerablemente con el engravado artificial.

El uso de mallas de aberturas pequeñas para detener el paso del material fino, resulta eficiente para dicha finalidad, pero no para la obtención de caudales importantes. En definitiva, una malla puede impedir el paso de una arena muy fina, pero también limita significativamente el ingreso de agua.

### **2.13.1. Tipos de filtro**

De acuerdo a la forma y distribución de los orificios o aberturas, los filtros tienen diferente denominación y capacidad filtrante. Los más empleados en pozos para agua son:

- Filtros ranurados
- Filtros agujereados

Los filtros ranurados pueden construirse manualmente, mediante el empleo de una sierra, o de un soplete para cortar el caño.

En el primer caso los cortes se hacen transversalmente al eje del caño, pero con el soplete de acetileno, pueden efectuarse en el mismo sentido o paralelamente al eje (figura 9). El ranurado también puede fabricarse industrialmente empleando tornos cortadores. La superficie filtrante o abierta en los filtros ranurados por corte rara vez llega al 10% de la superficie total de la cañería y suele ser menor al 5% en los filtros ranurados a soplete.

Otro inconveniente de estos últimos es el excesivo tamaño de la ranura y su forma irregular (figura 9).

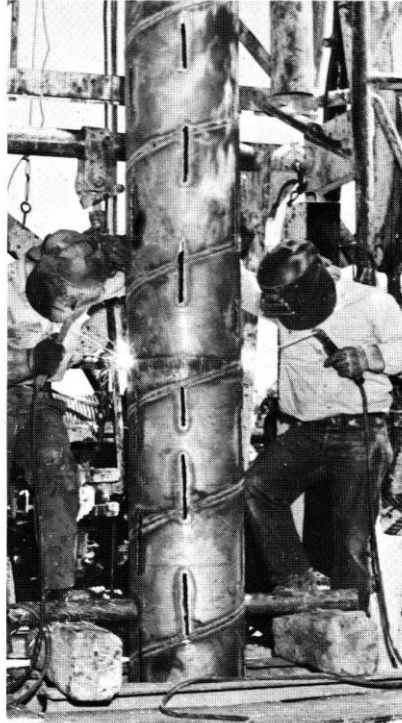


Figura 9. Cañería ranurada verticalmente con soplete. La superficie abierta es muy escasa y las ranuras muy anchas.

Fuente: Auge. 2005.

Uno de los filtros ranurados industrialmente, de mayor uso en los pozos de agua, es el del tipo persiana o celosía, pues las ranuras se protegen mediante una cobertura similar a una celosía (figura 10). Con estos filtros, de acuerdo al tamaño de la abertura, se logran superficies filtrantes del orden del 10%.

El filtro con más área abierta, y que por lo tanto permite un mayor pasaje de agua, es el de ranura continua, desarrollado por la firma Edward Johnson.

El mismo consiste en un filamento metálico enrollado en forma continua, alrededor de otros dispuestos axialmente, cuya función es otorgarle resistencia y que por lo tanto actúan como esqueleto del filtro. Este tipo de filtro tiene una superficie abierta del orden del 20% y además, la ventaja de que puede fabricarse con una abertura entre 0,1 y más de 3 mm.

Actualmente es uno de los más empleados y puede conseguirse en acero negro, galvanizado e inoxidable.

En la figura 11 se indica la forma como se enrolla el filamento periférico, que se suelda en los cruces con cada una de las nervaduras de soporte. En la figura 12 se muestra un detalle del filamento y las nervaduras. (Auge, 2005:35-36)

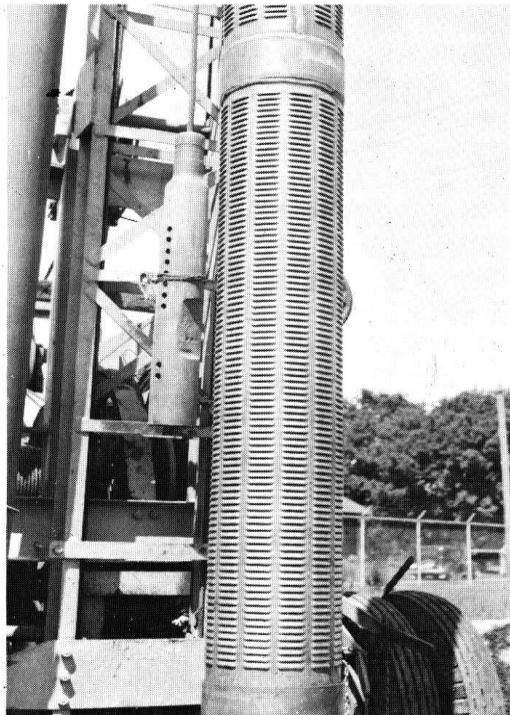


Figura 10. Filtro tipo persiana o celosía, en tramos de 1,5 m.  
Fuente: Auge. 2005.

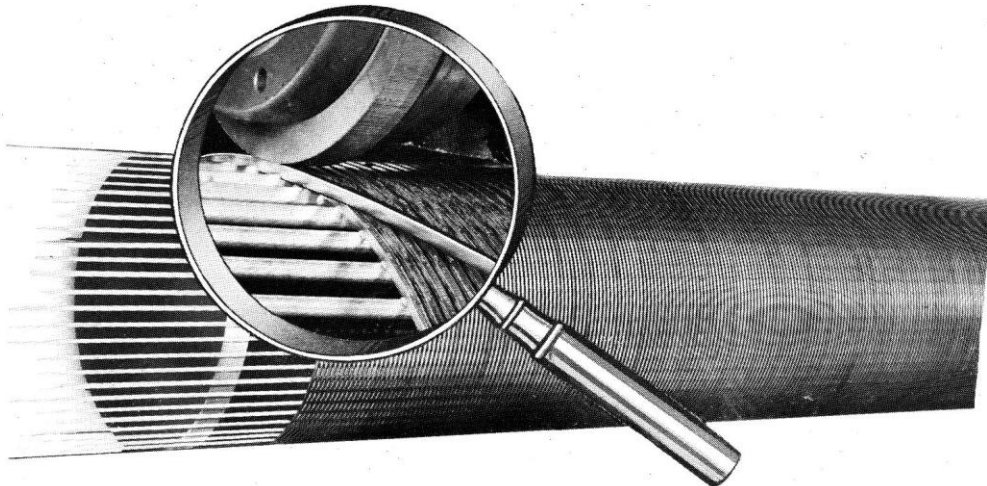


Figura 11. Enrollado del filamento en un filtro de ranura continua tipo Johnson. El filamento va soldado a las nervaduras en cada cruce.  
Fuente: Auge. 2005.



Figura 12. Detalle del filamento y las nervaduras en un filtro de ranura continúa.  
Fuente: Auge. 2005.

### **2.13.2. Engravado**

La colocación de un prefiltro, comúnmente llamado de grava, aunque es frecuente emplear arena mediana o gruesa, tiene por finalidad evitar la entrada al pozo de la arena fina de formación, luego de completar el desarrollo del mismo.

El prefiltro además, aumenta considerablemente la permeabilidad en la vecindad del filtro, que es donde se produce un incremento notable de la velocidad que genera fuertes pérdidas de carga, debido al pasaje de flujo laminar a turbulento. (Auge, 2005:42)

### **2.14. Líneas de flujo y superficies equipotenciales**

Una línea de flujo es la envolvente de los vectores velocidad en un instante determinado (figura 13).

Trayectorias son los caminos seguidos por las partículas de agua en su recorrido. En régimen permanente las trayectorias coinciden con las líneas de flujo, en régimen variable pueden no coincidir.



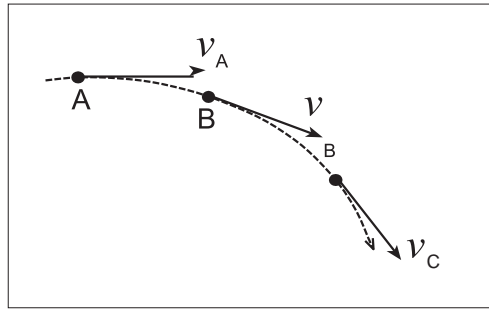


Figura 13. ABC es una línea de flujo.  
 Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf). s/f.

Una superficie equipotencial es el lugar geométrico de los puntos del espacio que tienen un mismo potencial hidráulico.

Por tanto, el flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales, buscando el máximo gradiente (Figura 14), igual que una pelota rueda por una ladera perpendicularmente a las curvas de nivel buscando la máxima pendiente.

Por supuesto que todo esto no son conceptos exclusivos de la Hidráulica Subterránea, sino que son análogos a otros campos de la Física: flujo eléctrico, térmico, etc.

Por ejemplo, en el flujo eléctrico las superficies equipotenciales contienen los puntos con el mismo potencial eléctrico, y el flujo de electrones se produce perpendicularmente a las superficies equipotenciales.

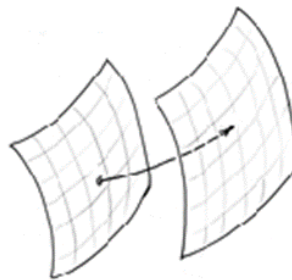
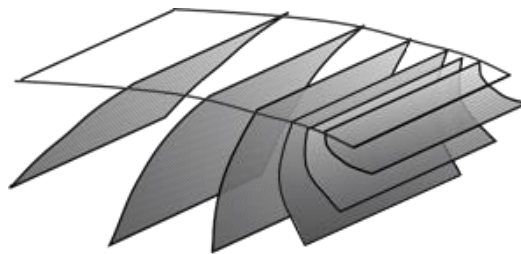


Figura 14. Superficies equipotenciales.  
 Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf). s/f.

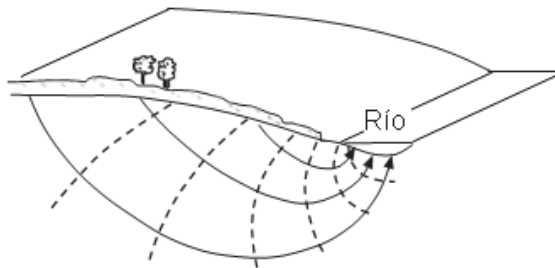
Las superficies equipotenciales pueden presentar cualquier forma y disposición y la dirección de flujo será perpendicular a estas superficies.

### 2.15. Redes de flujo

En la Figura 15 vemos las superficies equipotenciales que podrían existir debajo de una ladera, suponiendo que la distribución de la permeabilidad en el subsuelo fuera isótropa y homogénea.



(15.1)



(15.2)

Figura 15. Superficies equipotenciales bajo una ladera y el correspondiente perfil con red de flujo.

Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf). s/f.

Este tipo de representaciones en tres dimensiones pueden ser didácticas pero imposibles de manejar en casos reales. Se hace necesario utilizar representaciones en dos dimensiones: redes de flujo, frecuentemente en perfiles verticales y mapas de isopiezas.

Una red de flujo (figura 15.1) es una representación esquemática del flujo en un plano mediante líneas de flujo y líneas equipotenciales.

Las líneas equipotenciales son la traza de las superficies equipotenciales al ser cortadas por el plano en que se dibuja la red de flujo. El flujo siempre es tridimensional, así que las redes de flujo constituyen una simplificación bidimensional de la realidad.

El trazado de una red de flujo debe cumplir estas condiciones:

- (Necesario) Ambas familias de líneas tienen que cortarse perpendicularmente.
- (Conveniente) Los espacios resultantes deben ser “cuadrados” (aunque sean trapecios curvilíneos o incluso triángulos, han de ser proporcionados para que se aproximen lo más posible a cuadrados; un círculo inscrito debería ser tangente a los cuatro lados).

## **2.16. Flujo regional**

El flujo natural del agua subterránea en una región también se esquematiza mediante redes de flujo. En la figura 16 esquematizamos el flujo subterráneo suponiendo el subsuelo homogéneo e isótropo. La forma de la superficie freática es la que gobierna toda la red.

Si la geología es compleja, nuestra representación será solamente una simplificación de la realidad. En el apartado siguiente veremos cómo afectan al flujo los cambios de conductividad hidráulica.

En la figura 16 observamos algunos aspectos fundamentales:

Áreas de recarga y de descarga: Las áreas de recarga son aquellas en que el flujo subterráneo presenta una componente vertical descendente, y las áreas de descarga, ascendente. Aunque en este esquema tienen escasa entidad, también existen áreas intermedias en las que el flujo es prácticamente horizontal.

Flujos locales y regionales: La diferenciación es relativa, depende de la escala que consideremos. Los flujos locales normalmente están asociados a valles de menor entidad y los flujos regionales a los valles principales de una región.

En la misma vertical dos sondeos pueden encontrar aguas de calidad química muy distinta, como en los puntos marcados como A y B en la figura 16. El agua en B procede de un flujo regional (mayor recorrido, tiempo de permanencia mucho mayor), por lo que será más salina y su composición química puede ser muy diferente.

Puntos de estancamiento: Zonas de la red de flujo que no están sometidas a ningún gradiente, por lo que el agua no se moverá, como el marcado en la figura 16 con E.

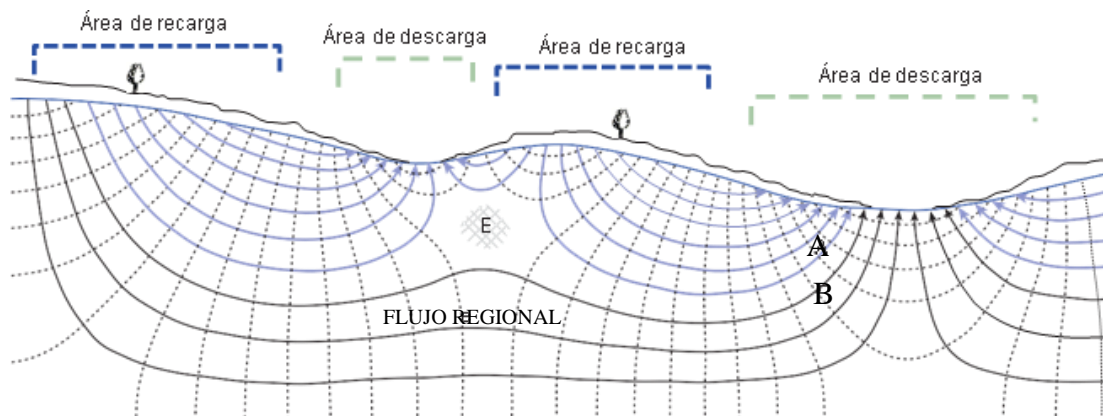


Figura 16. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en una región de conductividad hidráulica homogénea.

Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf). s/f.

No olvidamos que una sección vertical pertenece a una realidad tridimensional. La red de flujo de la figura 16 anterior podría corresponder a este entorno.

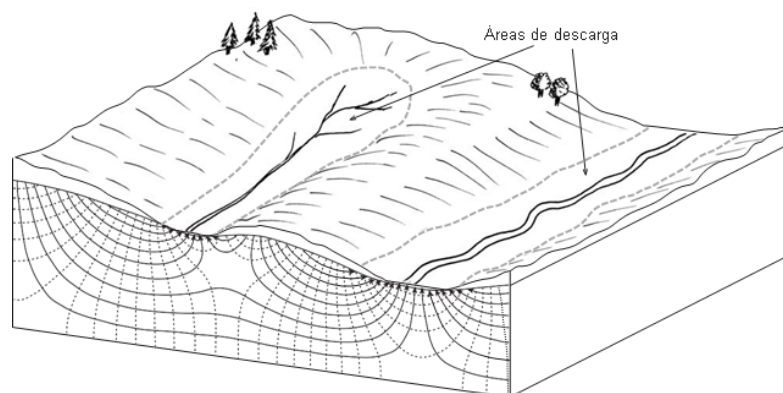


Figura 17. Áreas de descarga.

Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf). s/f.

Como indicábamos, el cauce menor genera un área de descarga con el correspondiente flujo local, figura 17, mientras que el cauce principal recibe flujos locales y regionales.

Puede observarse que la divisoria subterránea entre ambos cauces no coincide con la divisoria topográfica, ni tampoco con el punto más alto de la superficie freática.

### 2.17. Flujo horizontal: Mapas de isopiezas (Mapa Isofreático)

Un mapa de isopiezas refleja la forma de la superficie freática o de la superficie piezométrica, según se trate de un acuífero libre o confinado, igual que un mapa topográfico refleja la forma de la superficie del terreno.

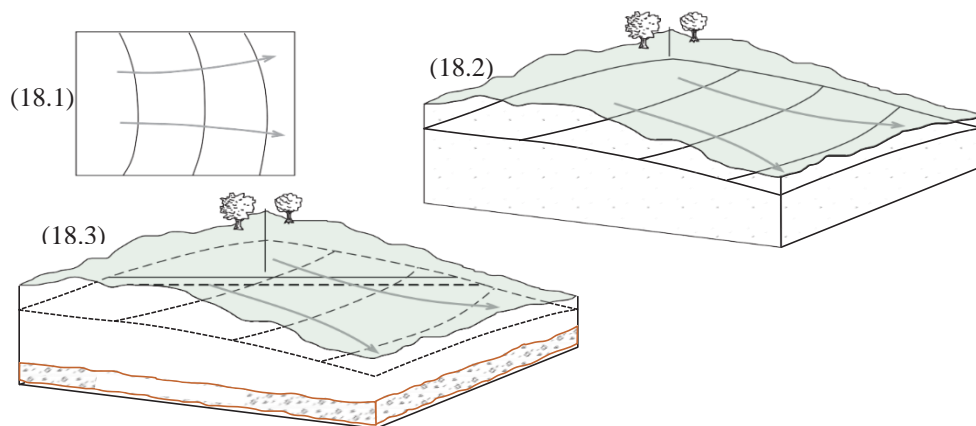


Figura 18. El mapa de isopiezas (18.1) puede representar la forma de la superficie freática de un acuífero libre (18.2) o la forma de la superficie piezométrica de un acuífero confinado (18.3).

Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf). s/f.

Como ya sabemos, la superficie freática es una superficie real, que constituye el límite superior de la parte saturada del acuífero libre (figura 18.2), mientras que en el acuífero confinado o semiconfinado (figura 18.3), la superficie piezométrica es una superficie virtual, definida por la altura a la que llegaría la columna de agua si existiera un piezómetro en cada punto.

En el acuífero libre, las líneas isopiezas son las intersecciones de las superficies equipotenciales con la superficie freática (figura 19.1), mientras que en el confinado las superficies equipotenciales están, lógicamente, dentro del acuífero, mientras que la superficie piezométrica con sus curvas isopiezas se encuentra varios metros por encima (figura 19.2).

En ambos casos de este ejemplo esquemático se generan idénticos mapas de isopiezas.

El mapa es la representación del flujo tridimensional sobre un plano horizontal. En el acuífero confinado, las superficies equipotenciales son verticales, por lo que el flujo es horizontal; la representación de la realidad tridimensional sobre dos dimensiones (el mapa de isopiezas) no implica pérdida de información acerca del flujo en el acuífero.

En cambio, en el acuífero libre de este ejemplo, a la izquierda, las superficies equipotenciales no son verticales, por lo que el flujo no es horizontal.

El mapa de isopiezas refleja solamente una parte de la información: la componente horizontal del flujo. Sería necesario complementarlo con una red de flujo en un corte vertical.

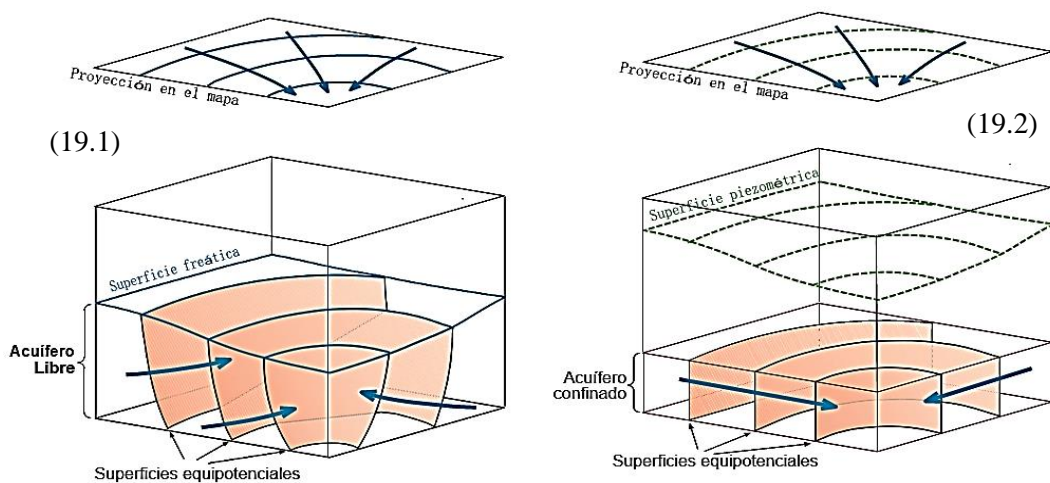


Figura 19. Superficies equipotenciales en un acuífero libre con componente vertical de flujo y en un acuífero confinado con flujo horizontal.

Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf). s/f.

Las fases para la realización de un mapa de isopiezas serían:

- Medida del nivel piezométrico en diversos puntos (los más posibles). Hay que obtener la cota del nivel del agua, que es igual a la cota del terreno menos la profundidad del agua. Esta última se mide con un hidronivel, con precisión de 1 cm. La cota del terreno con mapas o altímetros, que generalmente tendrán un error mínimo de 1 metro. En estudios de detalle, un topógrafo marca la cota del terreno en cada pozo con precisión de milímetros.
- Situación sobre el mapa de todas las medidas y trazado de las isolíneas<sup>1</sup> con una equidistancia determinada (la equidistancia entre isolíneas se elegirá dependiendo de la escala del mapa, la cantidad de datos disponibles y la variabilidad de éstos).
- Dibujo de las líneas de flujo perpendiculares a las líneas isopiezométricas. En un mapa de isopiezas a veces no se dibujan líneas de flujo. Lo habitual es trazar algunas para indicar las direcciones del flujo, pero no tantas para que formen una malla de cuadrados.<sup>2</sup>

### 2.17.1. Superficies piezométricas

La superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero referidas a una determinada profundidad. Se las representa mediante líneas de igual altura piezométrica, de forma similar a la representación de una superficie topográfica mediante curvas de nivel.

A estas curvas se las llama *isopiezas*; se trata pues de líneas proporcionales a las equipotenciales, y así se las designa también en ocasiones.

En principio se admite que las superficies equipotenciales del flujo del agua en un acuífero son superficies verticales de modo que el potencial es el mismo en cualquier

---

<sup>1</sup> Una **isolínea** es una curva que conecta los puntos en que la función tiene un mismo valor constante.

<sup>2</sup> [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf) .(3-11)

punto de una misma vertical; en este caso la superficie piezométrica es única, al no depender de la profundidad que se considera.

En muchos casos usuales en hidrología subterránea las superficies equipotenciales son planos verticales a efectos prácticos, en especial teniendo en cuenta que las dimensiones horizontales son mucho mayores que las verticales.

Sin embargo, existen casos en que el potencial varía notablemente en una misma vertical tal como sucede en las cercanías de zonas de recarga, en acuíferos con gran pendiente, en las proximidades de captaciones de agua o ríos parcialmente penetrantes, etc.; en este caso las superficies equipotenciales son planos inclinados y entonces es posible dibujar una infinidad de superficies piezométricas según la profundidad que se considere (figura 20).

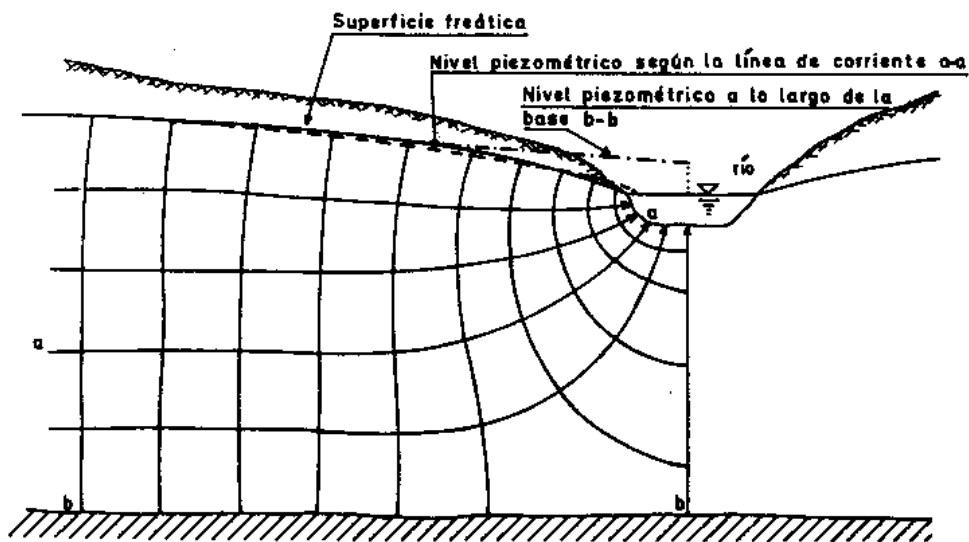


Figura 20. Red de flujo aproximada en un acuífero libre drenado por un río poco penetrante. En las proximidades del río se crea un flujo con componentes verticales de velocidad. La superficie piezométrica es única lejos del río pero varía con la profundidad cerca del mismo, y puede llegar a quedar por encima del terreno.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

### 2.17.2. Determinación de los niveles piezométricos

La única forma disponible para medir los niveles piezométricos en un acuífero es mediante una perforación que permita un acceso directo al mismo.



En el caso de acuíferos libre, sólo en raras ocasiones los métodos geofísicos de superficie permiten determinar con una garantía aceptable la posición de la superficie freática.

Las perforaciones para medir los niveles piezométricos son los pozos existentes en la zona, excavaciones hasta el nivel del agua y los piezómetros que son a modo de pozos, en general de pequeño diámetro, construidos especialmente con este objetivo.

La construcción de piezómetros es costosa y debe reducirse al mínimo indispensable. En acuíferos no consolidados de escasa profundidad se pueden instalar a hinca directa, de forma rápida y relativamente económica, pero en acuíferos más profundos o en rocas consolidadas se precisa de maquinaria costosa y la construcción es a veces lenta y no exenta de dificultades e imprevistos.

En pozos y piezómetros, el nivel del agua se mide en general con una cinta metálica y un dispositivo o artificio para delatar el nivel del agua.

### **2.17.3. Trazado de las curvas isopiezas**

En general sólo es posible obtener valores del potencial o nivel piezométrico en una serie de puntos del acuífero. A partir de ellos deben trazarse las curvas de nivel que sirvan para definir la superficie piezométrica.

En base a estas curvas se pueden trazar las líneas de corriente que deben ser normales a las isopiezas. Los puntos seleccionados no deben mostrar, si es posible, efectos de flujo vertical.

Las curvas equipotenciales deben cumplir las condiciones de contorno del problema o sea que deben ser normales a los límites impermeables y paralelas a las superficies y líneas de nivel constante tales como ríos, lagos, mares, etc., que tengan conexión con el acuífero deben también reflejar los cambios bruscos de permeabilidad. En definitiva, deben respetar las mismas condiciones que las redes de flujo.

En principio el trazado de las curvas isopiezas a partir de los datos puntuales se realiza por métodos análogos a los empleados en topografía.

La equidistancia entre líneas depende de las condiciones del problema o sea del número y repartición espacial de los datos, pendiente de la superficie piezométrica y precisión de los niveles piezométricos medidos.

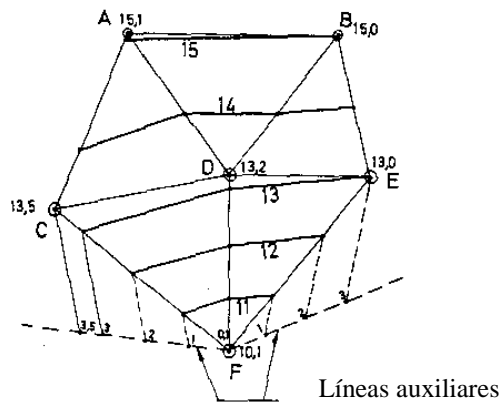


Figura 21. Trazado de las isopiezas dados 5 puntos con los respectivos niveles piezométricos.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

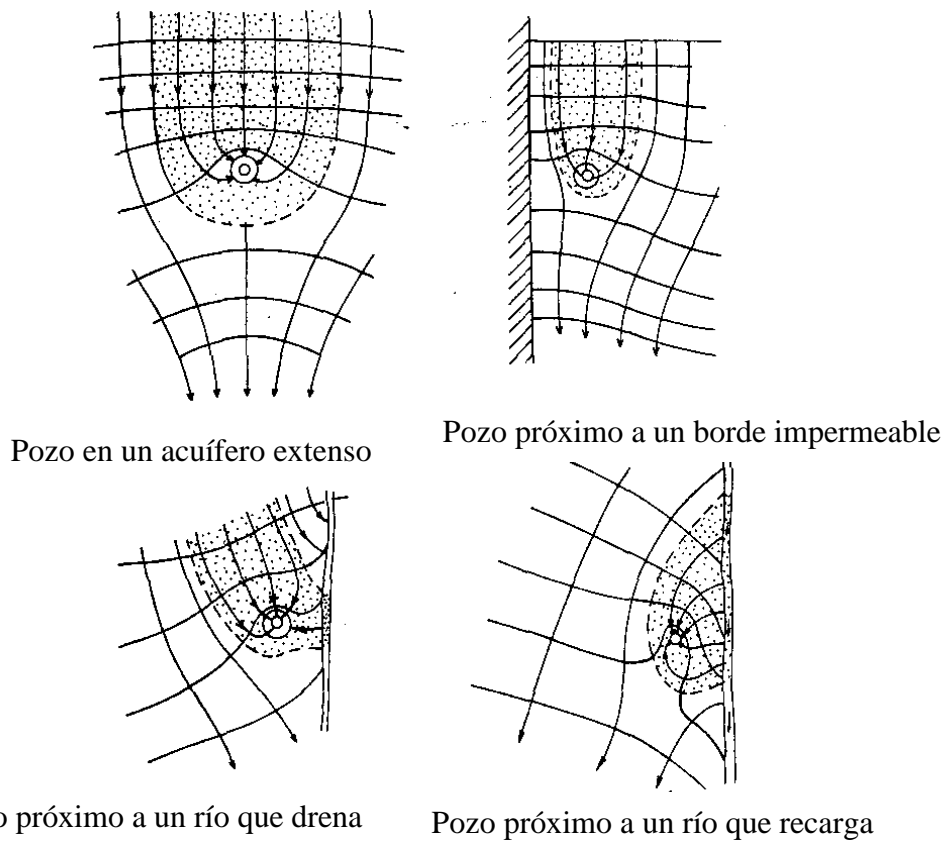


Figura 22. Isopiezas aproximadas creadas por el bombeo en pozos en acuíferos con flujo natural.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

#### 2.17.4. Tipos de superficies piezométricas

Según la separación de las isopiezas y su concavidad o la disposición relativa de las líneas de corriente, se suelen señalar varios tipos de superficies piezométricas.

Estas designaciones son corrientes en la bibliografía francesa especializada en hidrología y están particularmente desarrolladas en los textos de (Castany, 1968:717)

Son designaciones de carácter morfológico y responden a los siguientes criterios:

- *Superficie cilíndrica.* Las isopiezas son rectas paralelas.
- *Superficie radial.* Las isopiezas son curvas y las líneas de corriente tienden a converger; si convergen aguas arriba (isopiezas convexas desde aguas abajo) se dice que la superficie es radial divergente y se llama radial convergente si las líneas de corriente tienden a converger aguas abajo (isopiezas cóncavas desde aguas abajo).
- *Superficie plana.* La separación entre isopiezas es constante.
- *Superficie parabólica.* La separación entre isopiezas disminuye hacia aguas abajo.
- *Superficie hiperbólica.* La separación entre isopiezas aumenta hacia aguas abajo.
- *Superficie elíptica.* La separación entre isopiezas aumenta tanto hacia un lado como hacia el otro a partir de una de ellas.

En la figura 23, se ilustran estas definiciones con algunos ejemplos simples. Las superficies reales pueden ser simples, mixtas o complejas si participan de varios tipos según las zonas que se consideren.

TIPO	Cilíndrica plana	Parabólica Cilíndrica	Parabólica radial Convergente	Hiperbólica radial Convergente	Elíptica cilíndrica
PERFIL SEGÚN EL FLUJO					
ISOPIEZAS					

Figura 23. Ilustraciones simples de algunos tipos sencillos de superficies piezométricas.  
Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

### 2.17.5. Análisis cuantitativo de superficies piezométricas

El análisis cuantitativo de superficies piezométricas se basa en la aplicación de la ley de Darcy cuando puede admitirse que ésta es válida y que el medio puede suponerse de permeabilidad isotrópica.

El flujo que atraviesa la línea AB (figura 24) vale

$$q = T * AB * i$$

Siendo:

$T$  = transmisividad<sup>3</sup>(m<sup>2</sup>/d).

$i$  = gradiente piezométrico (m/m).

$AB$ =distancia entre el punto A y B (m).

Se supone que  $T$  e  $i$  no varían a lo largo de  $AB$ ; si así fuese se divide el segmento en porciones y en cada uno de ellos se determina el caudal que la cruza; el caudal total es la suma de caudales parciales.

<sup>3</sup> Capacidad de un medio para transmitir agua.

El gradiente piezométrico en zonas de variaciones suaves puede determinarse a partir de las isopiezas antecedente y siguiente.

Si  $h_i$  es el potencial correspondiente a la isopieza sobre la que se quiere determinar el gradiente.

$$i = \frac{h_{i-1} - h_{i+1}}{CD}$$

Siendo CD la distancia (en las mismas unidades que h) entre esas dos isopiezas. Puede determinarse con un poco más de precisión dibujando el perfil piezométrico a lo largo de una línea de corriente que corta en un punto central al segmento AB y trazando la tangente a la misma en el punto de nivel correspondiente a la isopieza considerada.

Debe tenerse en cuenta que lo expresado se refiere a flujo horizontal. Para el cálculo de  $i$  debe evitarse que entre  $h_{i-1}$  y  $h_{i+1}$ , existan recargas o drenajes importantes.

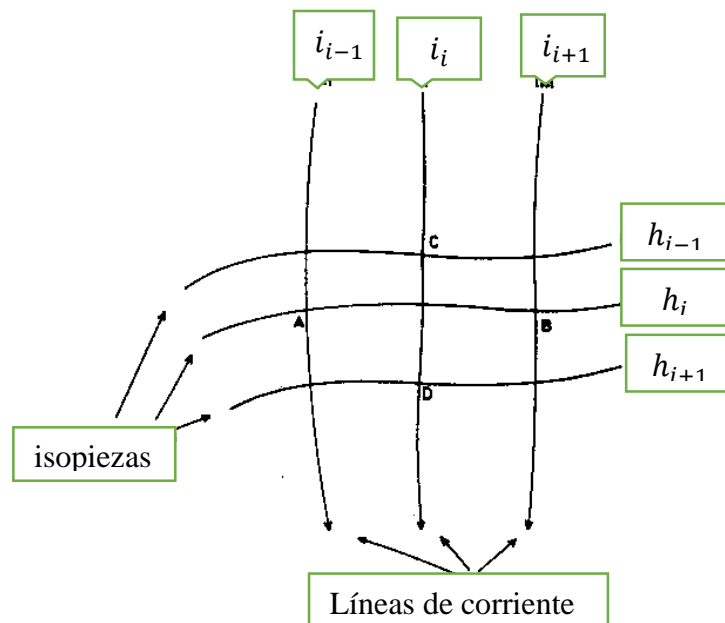


Figura 24. Cálculo del flujo que atraviesa AB o que circula por el tubo  $i_{i-1}$ - $i_{i+1}$  en ausencia de recarga.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

Si en una superficie piezométrica estacionaria se consideran dos líneas contiguas perpendiculares a las líneas isopiezas, en ausencia de recarga y descarga son líneas de corriente y el flujo entre ellas es constante.

Si hay recarga o descarga el flujo entre las mismas varía en esas cantidades pero no hay intercambio con los tubos enmarcados por las líneas contiguas.

Sea la malla ABCD de superficie  $S$ , (figura 25). El balance en la misma establece que:

Entrada por  $AB$  — salida por  $CD$  = descarga en  $S_i$  — recarga en  $S_i$

O sea:

$$T_i * AB * i_i - T_{i+1} * CD * i_{i+1} = q * S_i$$

Siendo:

$T_i$  = Transmisividad media a lo largo de  $AB$  ( $m^2/d$ ).

$T_{i+1}$  = Transmisividad media a lo largo de  $CD$  ( $m^2/d$ ).

$i_i$  = Gradiente a lo largo de  $AB$  ( $m/m$ ).

$i_{i+1}$  = Gradiente a lo largo de  $CD$  ( $m/m$ ).

$AB$  = Distancia entre el punto A y B ( $m$ ).

$CD$  = Distancia entre el punto C y D ( $m$ ).

$q$  = Caudal neto saliente (salidas-entradas, negativo si es entrante) por unidad de superficie en la superficie  $ABCD$ . ( $m^3/s/m^2$ ).

$S_i$  = Área de la Superficie  $ABCD$  ( $m^2$ ).

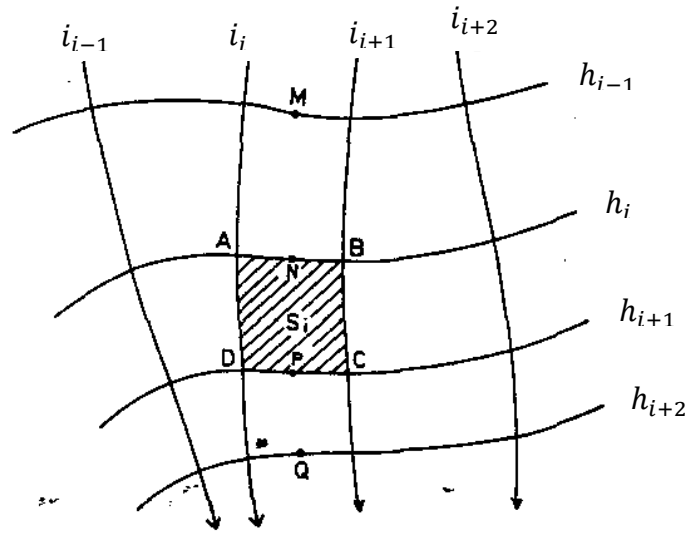


Figura 25. Esquema de aplicación del método del balance. Las líneas h son isopiezas y las i líneas de corriente.  
Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

Esta simple ecuación permite calcular cómo varía  $T$  en el acuífero conociendo el valor en un punto cuando no hay recarga ni descarga o se conoce en el acuífero el valor de las mismas en cada zona.

Si se conoce  $T$  en cada punto del acuífero es posible calcular la recarga o la descarga neta a partir de una superficie piezométrica, siempre y cuando la variación de la misma en el tiempo sea lenta y pequeña.

En un acuífero de ancho constante 1 con  $q=0$ , en dos puntos A y B debe cumplirse que

$$T_A * i_A = T_B * i_B$$

Y si la transmisibilidad es constante, debe ser  $i_A = i_B$

Si el acuífero es de bordes divergentes en el sentido del flujo (figura 26) debe cumplirse si  $q=0$ :

$$l_A * T_A * i_A = l_B * T_B * i_B$$

O aproximadamente

$$l'_A * T_A * i_A = l'_B * T_B * i_B$$

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{l'_B}{l'_A} * \frac{i_B}{i_A}$$

(Custodio y Llamas. 1983:534-649)

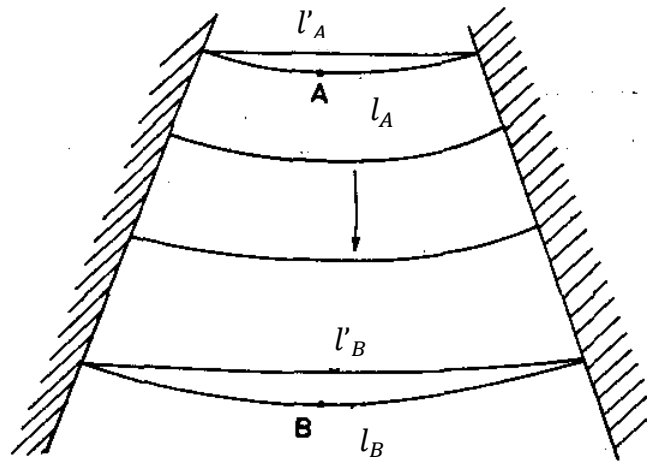


Figura 26. Esquema de un acuífero que diverge en el sentido del flujo.  
Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

## 2.18. Oscilaciones de los niveles piezométricos del agua subterránea y sus causas

El nivel de las aguas subterráneas varía con el tiempo de forma muy diversa. En general se trata de variaciones pequeñas en acuíferos no explotados, pero pueden ser muy importantes en acuíferos con núcleos de bombeo intensos, en especial si se trata de acuíferos cautivos, ya que su coeficiente de almacenamiento es muy pequeño.

Algunas de estas oscilaciones sólo tienen un valor anecdótico o científico, como son las provocadas por las mareas, cambios de la presión atmosférica, sobrecargas rápidas, etc., mientras que otras tienen un indudable valor práctico, pues pueden llegar a afectar y condicionar la explotación de un acuífero por disminución de la altura de agua en los pozos y en el acuífero, mayor elevación del bombeo, etc.



Las variaciones de los niveles piezométricos con el tiempo se visualizan en hidrogramas, que son gráficos cartesianos en los que en ordenadas se representan los niveles piezométricos y en abscisas el tiempo, eligiendo la escala adecuada.

En los hidrogramas no sólo se visualizan las oscilaciones sino también la posible tendencia de variación de niveles; las oscilaciones periódicas pueden ser estudiadas mediante el análisis armónico; la tendencia debe ser analizada estadísticamente.

En general el nivel piezométrico medio de los acuíferos, en un período suficientemente grande, es constante, excepto que el hombre haya cambiado sustancialmente sus condiciones de recarga o descarga.

### **2.19. Tipos de oscilaciones piezométricas del agua subterránea**

Es frecuente distinguir dos tipos principales de oscilaciones.

- Oscilaciones rápidas, cuya duración varía desde menos de un minuto a poco más de un día.
- Oscilaciones de período largo que se repiten en base a un ciclo semianual, anual o de varios años.

En ocasiones conviene considerar un tercer tipo que se suele presentar en zonas con bombeos industriales.

- Oscilaciones de período medio con frecuencia semanal.

No siempre se trata de oscilaciones periódicas; no lo son, por ejemplo, las producidas por bombeos irregulares o las provocadas por crecidas de ríos cuando se estudian con pocos años de registro.

Las oscilaciones piezométricas son unas veces debidas a causas directas que suponen un cambio en el almacenamiento subterráneo tales como:

- Sucesión de épocas secas y épocas húmedas.

- Variaciones de niveles en ríos y lagos conectados directamente con el acuífero.
- Extracción de agua por bombeo o recarga por inyección. En el mismo grupo entra la extracción de agua por plantas freatofitas <sup>4</sup>(evapotranspiración directa) y las recargas en épocas de fuertes lluvias.

## **2.20. Oscilaciones rápidas de tipo periódico**

### **2.20.1. Oscilaciones debidas a los cambios de presión atmosférica. Eficiencia barométrica**

En los acuíferos cautivos se nota un descenso de nivel en los pozos y piezómetros como consecuencia de un incremento en la presión atmosférica, y un ascenso de nivel como consecuencia de una disminución en la misma.

El incremento de carga sobre el acuífero causado por un aumento de la presión atmosférica se reparte entre el terreno y el agua o sea que aumenta la presión intergranular y la presión del agua.

### **2.20.2. Oscilaciones debidas a los cambios de nivel de aguas superficiales. Eficiencia a las mareas**

Si se tiene un acuífero cautivo bajo el mar o cualquier masa de agua superficial extensa (gran lago o embalse), toda elevación del nivel del agua libre supone una sobrecarga, la cual se reparte entre el terreno y el agua, o sea que aumenta la presión intergranular y la presión del agua.

Si se tiene un pozo, el nivel en el mismo aumenta a consecuencia de la elevación del agua libre para equilibrar el incremento de presión del agua.

---

<sup>4</sup> son vegetales que se abastecen del agua freática con la que sus raíces están en contacto muchas veces permanentemente.

Nótese que este efecto difiere del de la acción de los cambios de presión atmosférica en que ahora el esfuerzo actuante sobre el nivel del agua del pozo no cambia.

### **2.20.3. Oscilaciones debidas a la evapotranspiración**

Los acuíferos libres con nivel freático próximo a la superficie del terreno o sometidos a la acción de plantas feotofitas, sufren un efecto de evaporación y/o evapotranspiración directa que alcanza un máximo valor durante el día y el mínimo valor durante la noche. En ello produce una fluctuación de niveles de 24 horas, de período.

Por un efecto de histéresis el nivel freático mínimo se produce hacia la puesta del sol y el máximo se produce hacia media mañana.

El efecto de evapotranspiración directa es despreciable, excepto cuando el nivel freático está a menos de 1 m de la superficie.

El efecto de evapotranspiración puede alcanzar a superficies freáticas situadas a más de 10 m de profundidad si existen plantas freatofitas, pero es raro que en áreas de vegetación corriente llegue a más de 2 o 3 m de profundidad.

### **2.21. Oscilaciones rápidas no periódicas**

Las oscilaciones rápidas no periódicas son debidas en general a sobrecargas o descargas rápidas del terreno.

Tales son el paso de un tren o de un camión pesado por las proximidades del piezómetro en observación, etc.

En general el fenómeno sólo es apreciable en acuíferos cautivos o en acuíferos libres capaces de mostrar reacciones elásticas de importancia.

La sobrecarga rápida crea un aumento de la presión del agua y una elevación brusca del nivel piezométrico y al contrario si se trata de una descarga brusca. si se trata del

paso de un tren, por ejemplo, se produce un brusco ascenso seguido de un brusco descenso cuando se aleja; si el tren se estaciona en las inmediaciones del piezómetro sólo existe el efecto de sobrecarga, pero como ésta es local, la elevación de nivel es también local y se crea un gradiente piezométrico hacia las porciones del acuífero no afectadas de modo que la elevación desaparece a los pocos momentos y se vuelve al nivel inicial, ya que la extensión del acuífero es en general mucho mayor que la del área afectada por la sobrecarga.

El mismo efecto se tiene en una descarga brusca, como la marcha de un tren estacionado en las inmediaciones del piezómetro.

La propagación de ondas elásticas produce una brusca oscilación de subida y bajada a consecuencia del paso de la onda de compresión.

Tal sucede en el caso de terremotos, explosiones o fuertes golpes sobre el terreno.

## **2.22. Variaciones del nivel piezométrico originadas por extracciones de agua subterránea**

El establecimiento de una captación de agua (pozo, dren, galería, etc.) en un acuífero produce un descenso de nivel piezométrico, rápido al principio de la extracción y luego cada vez más lento; al cesar el bombeo o la extracción, los niveles tienden a recuperar su posición inicial, deprisa al principio y luego más lentamente.

En las figuras 27 y 28 se muestran varias porciones de limnigramas de piezómetros situados en las proximidades de Barcelona.

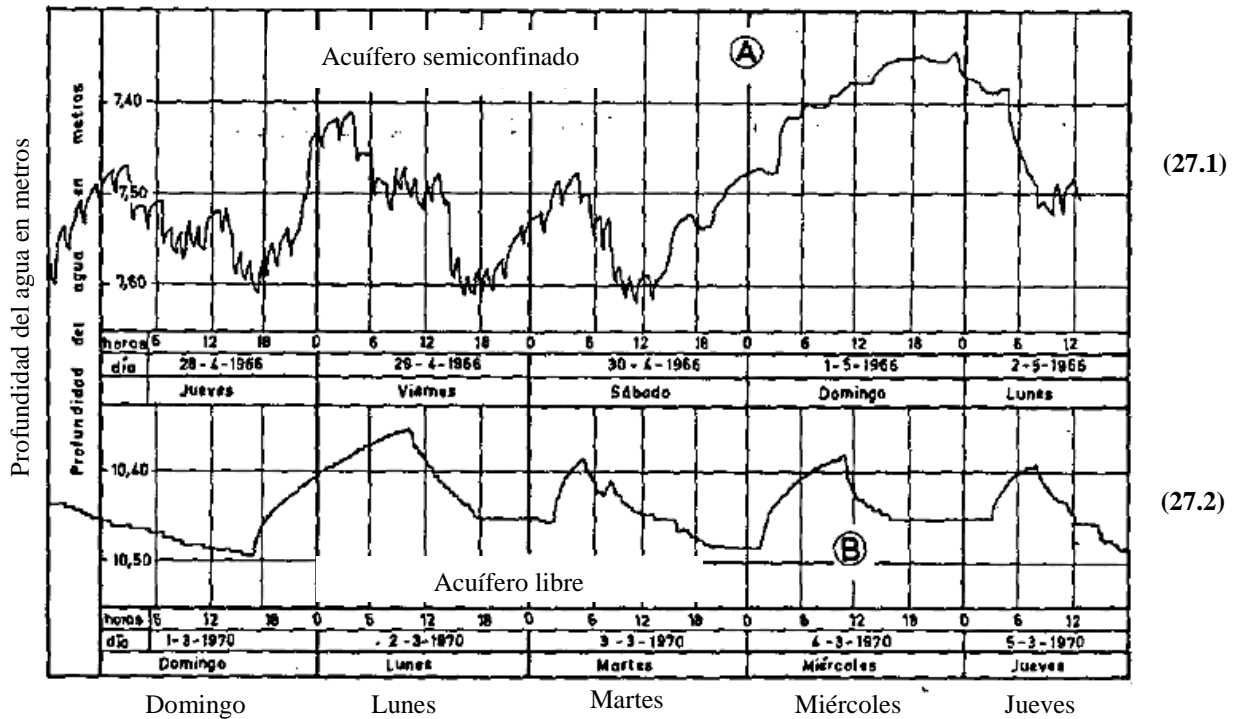


Figura 27. Oscilaciones piezométricas originadas por extracción de agua subterránea.

27.1 Oscilaciones piezométricas en dos pozos de observación, en el lateral izquierdo del delta del río Llobregat mostrando el efecto de un bombeo próximo intermitente superpuesto a las fluctuaciones diarias generales producidas por los grandes núcleos de bombeo. se puede apreciar la recuperación dominical y el cese de bombeo próximo, el cual se reanuda el lunes

27.2 En el acuífero libre del valle bajo del río Llobregat mostrando el efecto de bombeo de un pozo próximo. (tomados de los archivos de la comisaría de aguas del pirineo oriental).

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

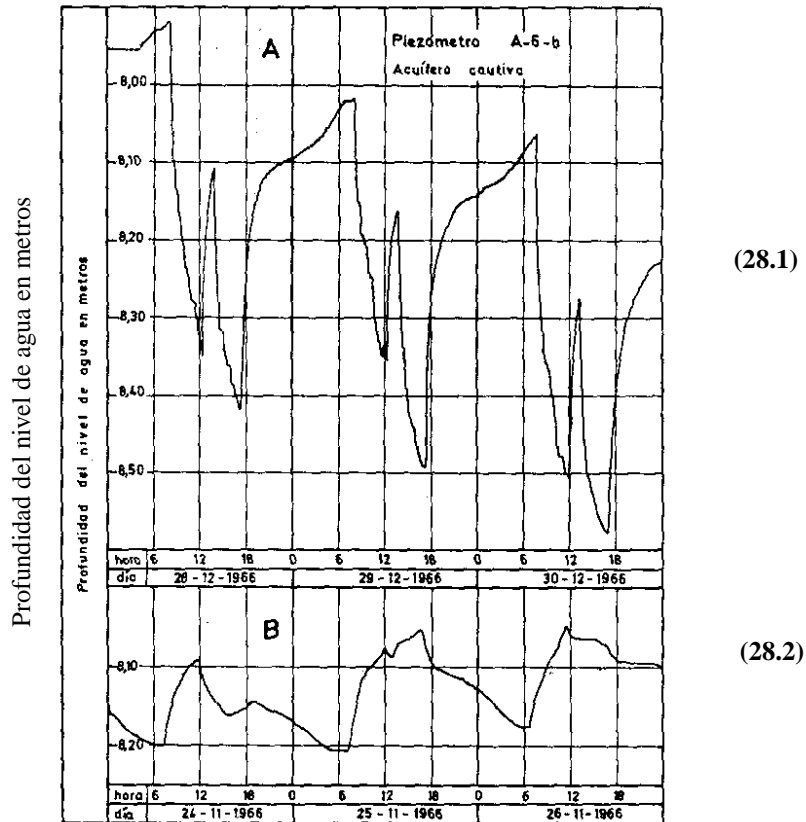


Figura 28. Oscilaciones de nivel en un piezómetro en el acuífero profundo del delta .del río Llobregat.

28.1 efecto de un bombeo-próximo con un período de funcionamiento para riego por la mañana y otro por la tarde. el efecto está superpuesto a las fluctuaciones generales,

28.2 fluctuaciones generales medidas en una época de paro de los pozos próximos.

(tomados de los archivos de la comisaría de aguas del pirineo oriental).

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

### 2.23. Oscilaciones de los niveles piezométricos debidas a las variaciones en la recarga por la precipitación. Efectos estacionales

La fuente principal de recarga a los acuíferos es la infiltración profunda del agua de lluvia, y ésta tiene un carácter intermitente.

La recarga se produce de forma discontinua, con mayor intensidad en unas épocas que en otras y de forma variable según los arios; en unos lugares las lluvias son casi inexistentes. O no son eficaces para producir recarga durante varios meses del año, con lo cual aparecen claramente marcadas unas estaciones en que se produce recarga y otras estaciones en las que normalmente no se produce.

La recarga origina una elevación del nivel de agua y después de la misma el agua aportada se extiende hacia los lugares de descarga, naturales o artificiales, dando origen a un descenso de niveles o recesión, que se mantiene hasta el siguiente período de recarga. En la figura 29 se muestra el efecto de recarga en un acuífero libre a consecuencia de dos lluvias intensas.

Se aprecia claramente el período de recesión al final; el gráfico superior de la misma figura muestra la evolución de niveles en una época en que no hay lluvias.

Las curvas de recesión suelen tener una forma exponencial aproximada y son tanto más rápidas cuanto mayor es la transmisividad del acuífero, menor el coeficiente de almacenamiento y menor la distancia al lugar de salida del agua.

La representación del logaritmo del nivel piezométrico sobre el punto de descarga en función del tiempo debe ser una recta. En la figura 30 se muestran las curvas de recesión de los niveles de un pozo.

En lugares de clima húmedo o semihúmedo la recarga producida en las estaciones húmedas del año consigue casi siempre alcanzar al acuífero y entonces se tiene un ciclo anual o semianual en las oscilaciones piezométricas, según que en el año exista una o dos estaciones húmedas; la figura 31, ilustra este efecto.

En lugares más áridos la recarga de la época húmeda del año puede ser poco importante en años secos si es que llega a producirse; en este caso las variaciones más importantes son debidas a la secuencia de años secos y años húmedos, como lo muestra la figura 32.

Las variaciones estacionales quedan amortiguadas en profundidad de modo que en acuíferos con el nivel freático profundo sólo pueden aparecer de forma marcada las diferencias en pluviometría de un año a otro.

Además, cuanto más profundo es el nivel freático con tanto más retraso se produce el efecto de recarga como aparece en la figura 31 y se aprecia también en la figura 32. El efecto de amortiguación de las variaciones producidas por la recarga es importante

cuando en el mismo acuífero la profundidad del nivel freático varía considerablemente a consecuencia de una topografía accidentada, ya que en cada lugar el tiempo en llegar el agua de infiltración al acuífero es diferente.

El efecto amortiguador es mucho menor cuando la profundidad del nivel freático es casi la misma en todo el acuífero.

En acuíferos freáticos con el nivel poco profundo en materiales arcillosos, la lenta circulación del agua de recarga en el medio no saturado debería producir un efecto lento de recarga y diferido; no obstante en ocasiones, en épocas húmedas se observa una respuesta inicial muy rápida que no puede explicarse normalmente ya que no es posible con la baja permeabilidad del terreno; puede ser debido a infiltración preferencial.

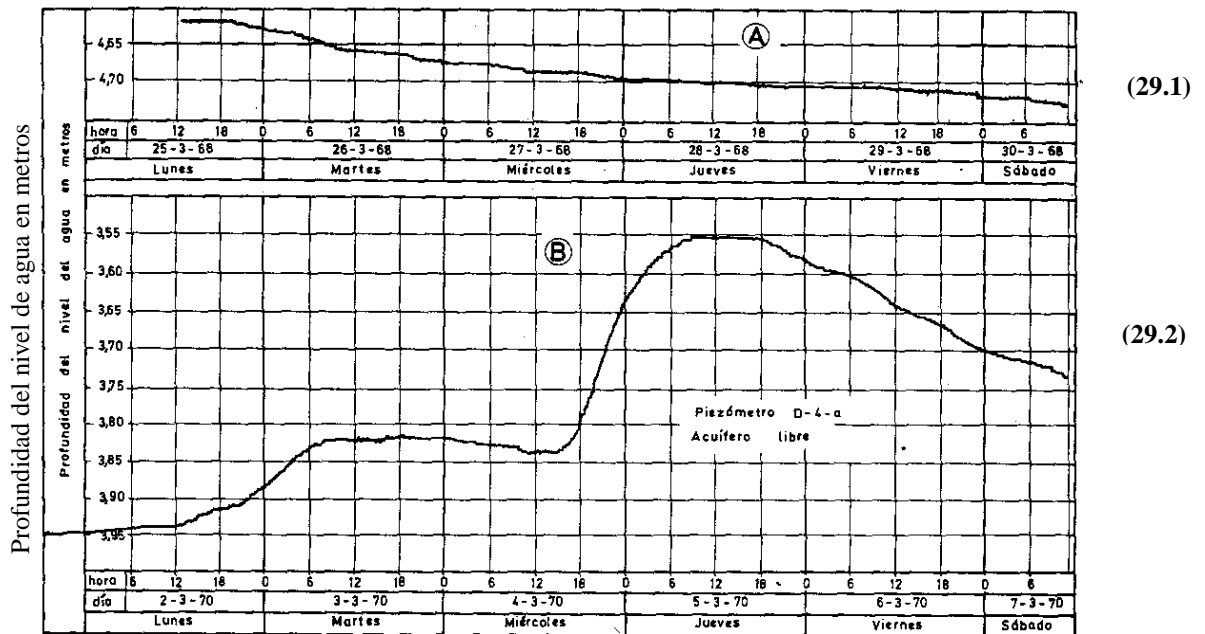


Figura 29. Oscilaciones piezométricas en el acuífero superficial (prácticamente freático) del delta del río Llobregat.

29.1 Época de recesión de niveles después de un período lluvioso.

29.2 Curva mostrando la recarga local producida por una fuerte tormenta y la recesión posterior al producirse la fuga lateral del agua introducida. (tomado de los archivos de la comisaría de aguas del pirineo oriental).

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.



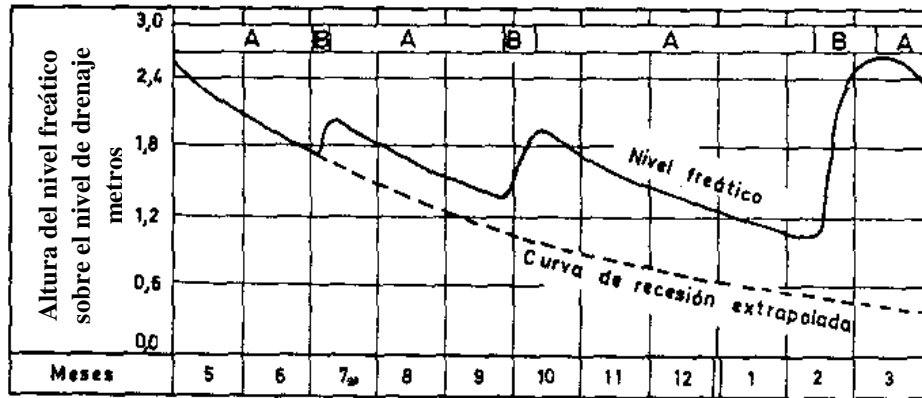


Figura 30. Curvas de recesión de un acuífero libre entre dos canales de drenaje paralelos. En los períodos a, la descarga es mayor que la recarga y en los períodos b la recarga domina sobre la descarga.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

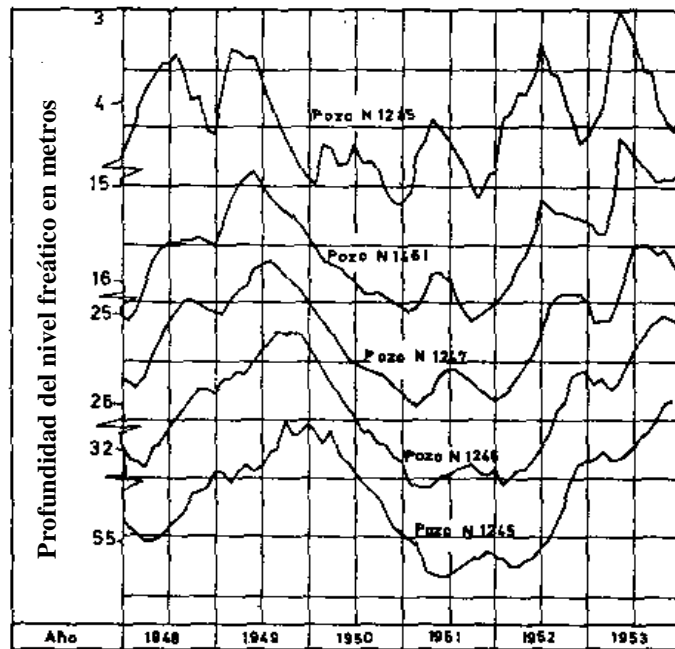


Figura 31. Hidrogramas de cinco pozos de Long Island, New York mostrando el retraso de la recarga al aumentar la profundidad. En el pozo más superficial se nota la recarga de la estación húmeda del Ario.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

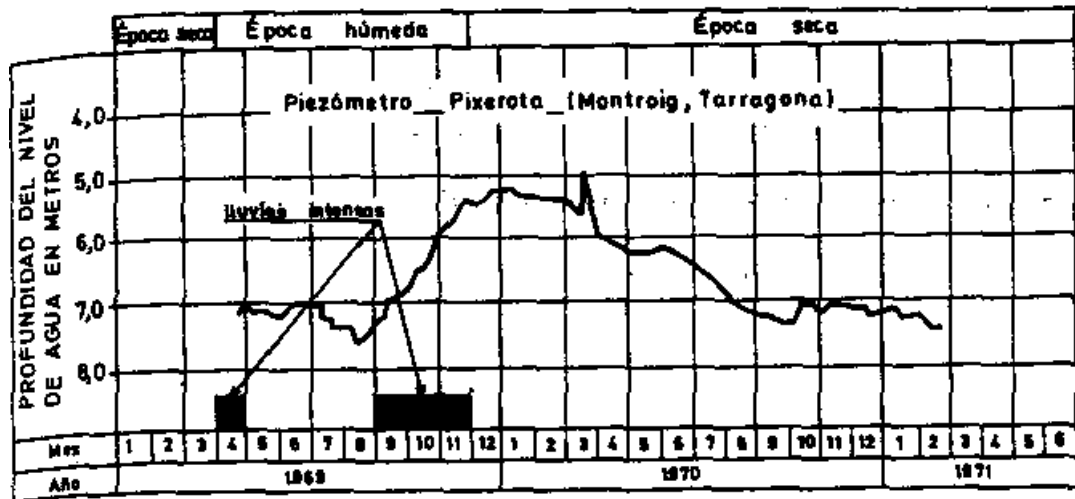


Figura 32. Hidrograma de un piezómetro del campo de Tarragona (España). (Tomado de los archivos de la comisaría de aguas del pirineo oriental; datos de Hifrensa). Los meses señalados son anormalmente húmedos.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

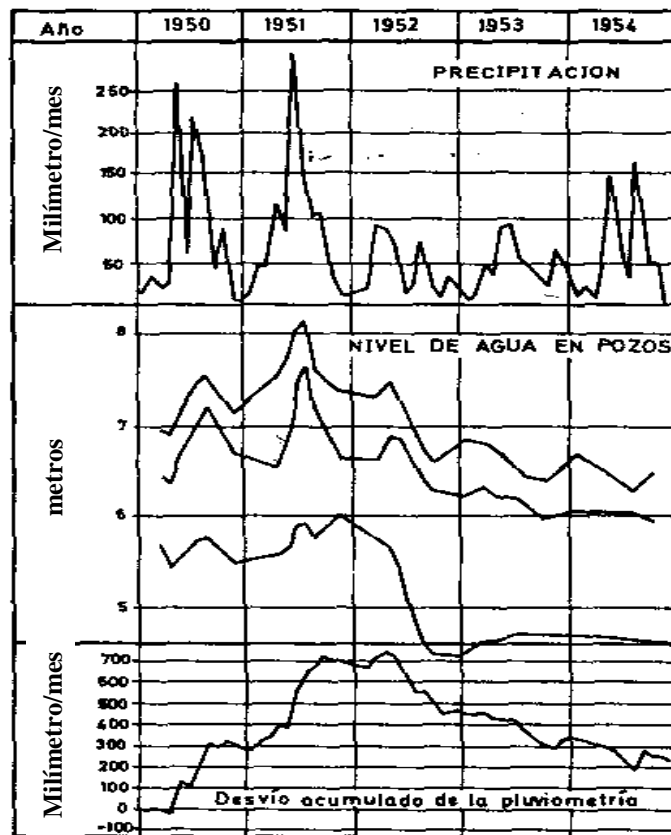


Figura 33. Relación entre niveles del agua subterránea, la pluviometría y el desvío acumulado de la pluviometría.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

## **2.24. Oscilaciones de los niveles piezométricos en acuíferos recargados por un río**

En acuíferos relacionados directamente con un río, los niveles del agua subterránea oscilan de acuerdo con los niveles río, siendo la oscilación tanto menor y tanto más retrasada cuanto más lejos esté el pozo de observación del río.

Existe una distancia a partir de la cual puede suponerse que las variaciones rápidas de caudal del río apenas afectan al acuífero.

En acuíferos relacionados con un río y sometidos a un bombeo intenso, puede suceder que la principal fuente de recarga sea la infiltración del agua del propio río.

Si el lecho del río está sucio la infiltración es difícil y el nivel freático puede despegarse del fondo del cauce; en épocas de avenidas o de aguas altas se producen recargas importantes debido a la descolmatación parcial del lecho del río y a que el agua afecta a porciones de cauce secas y permeables por desecación o por el establecimiento de vegetación, además de una mayor superficie mojada y una mayor carga de agua.

En estos momentos se produce un notable ascenso del nivel freático, tanto mayor cuanto más cerca del río y más cerca de la zona en que el río tiene mayor capacidad de infiltración.

## **2.25. Fluctuaciones de gran periodo y tendencia de los niveles piezométricos**

Al no ser todos los años iguales desde un punto de vista hidráulico, los niveles del agua subterránea varían de acuerdo con las características de cada año, si bien en ocasiones las variaciones interanuales de nivel son pequeñas dado que en general los acuíferos tienen un almacenamiento de agua elevado.

La sucesión de varios años secos o de varios años húmedos puede dar la impresión de que los niveles piezométricos tienen una tendencia a subir o a bajar; muchas veces esta tendencia se vería que no existe si se tuviese un registro de niveles de 30 o más años.

En la figura 34 se muestra la variación de la precipitación en California a lo largo de 19 años y la oscilación de niveles correspondiente, desfasada en casi dos años a consecuencia de la duración de la infiltración profunda.

En cada año se tienen dos máximos y dos mínimos correspondientes a las dos estaciones secas y a las dos estaciones húmedas.

Si se hubiese observado sólo los niveles entre 1936 y 1942 se hubiese tenido la impresión de una tendencia de ascenso y entre 1944 y 1952 una tendencia de descenso, cuando en realidad no parece existir tendencia alguna.

En acuíferos sobreexplotados puede tenerse una tendencia al descenso de niveles piezométricos cuando la recarga es inferior a la extracción.

Esta tendencia debe observarse en piezómetros no afectados directamente por el bombeo, en ocasiones, un descenso progresivo de nivel no es más que el resultado de un incremento progresivo del descenso dinámico provocado por los bombeos; así, en el Prat de Llobregat (Barcelona) existe una tendencia al descenso del nivel piezométrico del acuífero profundo del delta del río Llobregat, pero ello no es más que una consecuencia del aumento del número de pozos de bombeo que producen un cono de descensos cada vez más pronunciado para poder captar la demanda creciente de agua; no existe desequilibrio entre el promedio de entradas y de salidas del acuífero.

La variación del nivel medio del agua en los ríos, ya sea por construcción de embalses, canales de navegación, derivaciones, etc. puede provocar una tendencia hacia una nueva situación de equilibrio más alta o más baja.

Lo mismo puede suceder cuando se modifican las condiciones de recarga por creación o supresión de una zona de regadíos, cambio de zona rural a urbana, etc., o incluso por variación de la cota del cauce de los ríos a consecuencia de extracciones de gravas, rectificación de cauces, etc.; algo similar puede suceder cuando se produce subsidencia del terreno.

Las variaciones climáticas habidas durante la era cuaternaria han influido en los niveles del agua subterránea y han producido tendencias, pero son inapreciables en la duración de la vida del hombre. (Custodio y Llamas, 1983:516-532)

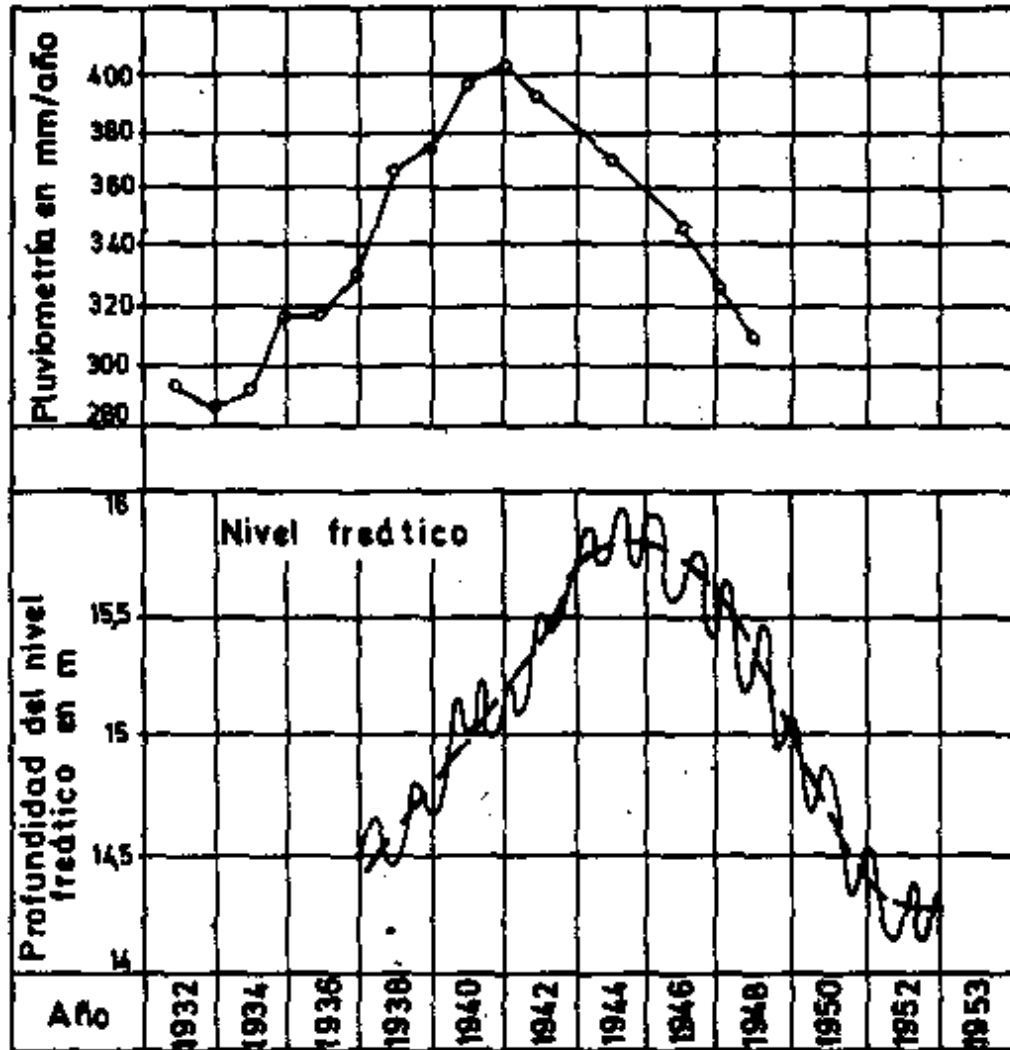


Figura 34. Variaciones a largo plazo de la pluviometría y de los niveles del agua subterránea en California.

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

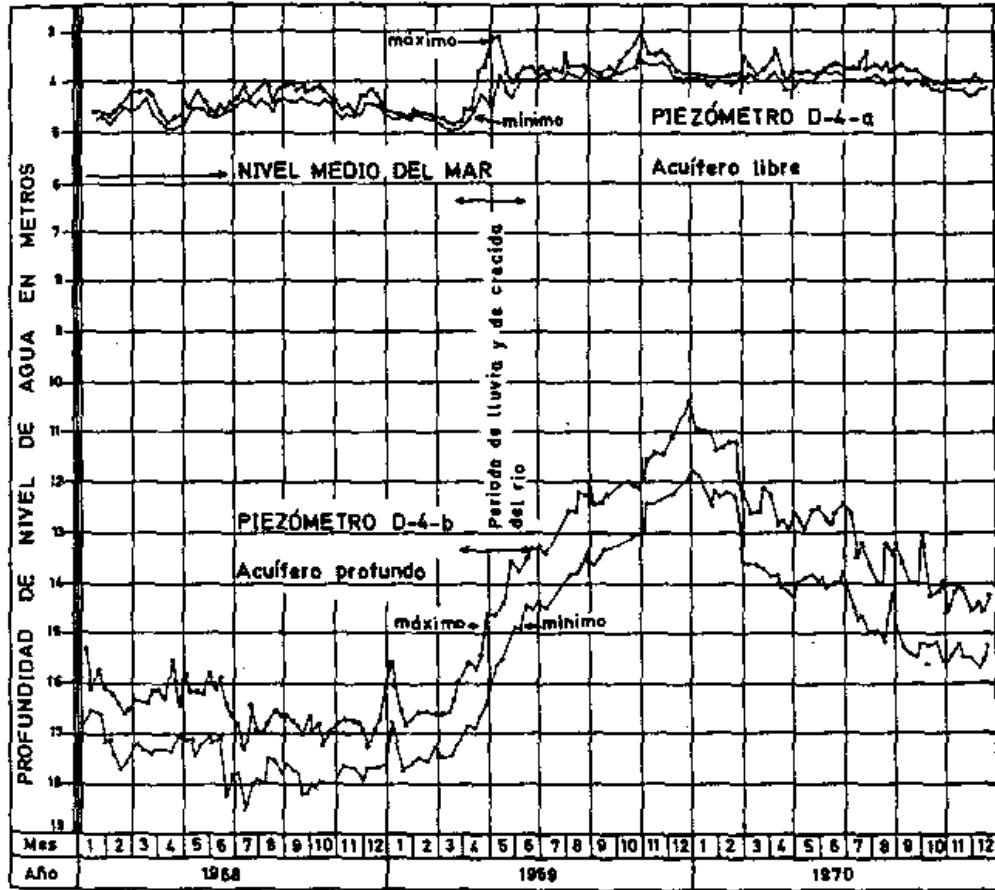


Figura 35. Oscilaciones extremas semanales en los acuíferos de Prat de Llobregat (Barcelona). El acuífero profundo (es libre en otras zonas y semiconfinado en la zona representada) está intensamente explotado por industrias. (Datos de los archivos de la comisaría de aguas del pirineo oriental).

Fuente: Custodio y Llamas. 1983.

## 2.26. Régimen permanente y régimen variable

Cuando un sistema de flujo no varía con el tiempo se dice que está en un régimen permanente, estacionario o en equilibrio. Cuando el flujo varía con el tiempo estamos en un régimen no permanente o variable.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> [http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica\\_Subt.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf).(2)

### **3.1. Ubicación**

El departamento de Tarija, ubicado al sur de Bolivia en la frontera con las repúblicas de Argentina y Paraguay, es un hermoso valle formado por pequeñas ciudades y poblados habitados por gentes amigables y hospitalarias. Los valles y el Chaco son sus dos regiones principales.

La mayor parte del departamento es un bello jardín favorecido por la naturaleza, en el que se conjugan pesca, canto, danza y diversas fragancias de violetas, jazmines, amancayas, azucenas y dalias, ríos de cristalinas aguas y surcan sus praderas y frondosos árboles que protegen con sus sombras los grandes sembradíos.

El pueblo de Tarija es acogedor y cálido como la propia región. Su hospitalidad y alegría son remarcables y constituyen un elemento inolvidable de una estadía en Tarija. La música, sus letras románticas y a veces nostálgicas, hablan del amor y de las bellas mujeres de la tierra tarijeña.

En Tarija se encuentran valles productores de fruta, poblados de viñedos con ríos amplios en los que es posible pescar y yacimientos paleontológicos con pequeños poblados de gente jovial y cariñosa.

El departamento de Tarija está ubicado al Sur de Bolivia, tiene aproximadamente 37.600 Km<sup>2</sup>, presenta características ecológicas muy diferentes, pues se encuentra conformada por seis ecorregiones. La que cubre la mayor extensión es la llanura del Gran Chaco.

### **3.2. Ubicación geográfica**

El departamento de Tarija está ubicado al Sur de Bolivia, tiene aproximadamente 37.600 Km<sup>2</sup>, presenta características ecológicas muy diferentes, pues se encuentra conformada por seis ecorregiones. La que cubre la mayor extensión es la llanura del Gran Chaco, cuya cota promedio alcanza a los 400 m s.n.m., conformada por matorrales espinosos, bosques bajos y sabanas secas. El departamento de Tarija limita al Norte con el departamento de Chuquisaca, por el Sur, con la República Argentina, por el Este, con la República de Paraguay; y por el Oeste, con el departamento de Potosí. La capital del departamento es la ciudad de Tarija y está situada a 14°45' de latitud Sur y 64°48' de longitud oeste

(Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural. Unidad de Análisis Productivo, Subsistema de Información Territorial de Apoyo a la Producción, 2009).

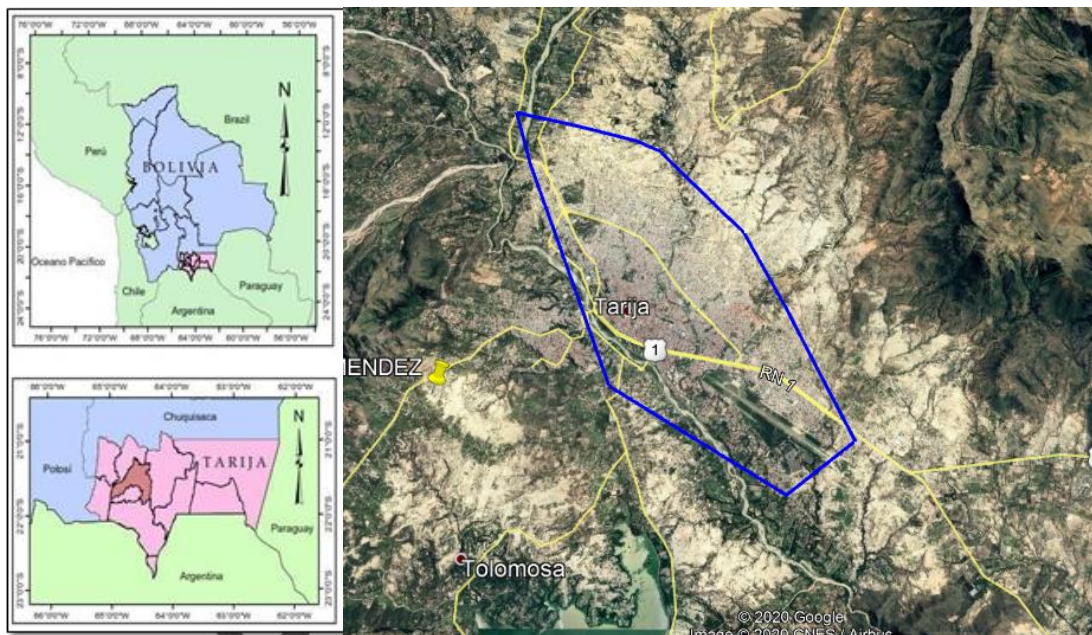


Figura 36. Identificación del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Vegetación, pisos ecológicos

La vegetación natural cumple funciones importantes en la disponibilidad de recursos hídricos como la estabilización de suelos, reducción del ingreso de sedimentos en los cuerpos de agua, incrementa la infiltración, reduce la escorrentía y almacenan el agua; su ausencia disminuye la disponibilidad y calidad de recursos hídricos, incrementa las amenazas, riesgo y vulnerabilidad a sufrir inundaciones y derrumbes (Ministerios de Medio Ambiente y Agua, 2017).

Las áreas recarga hídrica, además de albergar grupos importantes de biodiversidad de flora y fauna, contribuyen a la producción y conservación de los recursos hídricos, incorporan al suelo el agua de precipitación, las aguas superficiales, almacenándose en diversos acuíferos o manantiales, que posteriormente devuelven el agua a la superficie por procesos naturales o por la intervención del hombre.



La Reserva Biológica Cordillera de Sama tiene una gran diversidad de especies de plantas en sus diferentes ecorregiones. En la Puna se identificaron 254 especies, destacándose las familias de Asteraceae, Poaceae, Cactaceae y Solanaceae. El bosque de quewiña (*Polylepis tomentella*), yaretales (*Azorella compacta*) y los tólares son característicos de la cuenca de Tajzara.

En el piso superior de los bosques tucumanos – bolivianos se identificaron 140 especies, principalmente las familias de Gramineae, Asteraceae, Bromeliaceae, Solanaceae y Labiatae. Como también especies de quewiña (*Polylepis crista-galli*), aliso (*Alnus acuminata*), chirimolle (*Escallonia resinosa*) y pino del cerro.

Los bosques nativos de quewiña en la cuenca de Tajzara es una de las especies principales para la conservación, los mismos son utilizados como fuente de energía y en época seca es utilizado como forraje para ganado ovino y bovino. (Servicio Nacional de Áreas Protegidas, 2019)

### **3.4. Clima**

El clima es semiárido con un periodo de disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de plantas de 3 a 5 meses. El periodo libre de heladas es de 7 meses. Las granizadas son frecuentes en esta zona, siendo una causa importante de pérdida de cosechas.<sup>6</sup>

#### **3.4.1. Precipitaciones pluviales**

La distribución espacial y temporal de las lluvias, se caracteriza por presentar dos periodos marcados: el de precipitaciones, de noviembre a marzo, y el periodo seco de abril a octubre. De esta manera se observa que las actividades agrícolas se concentran en el periodo húmedo, aunque en muchas áreas estas actividades no son posibles sin riego.

---

<sup>6</sup> <http://sernap.gob.bo/sama/vegetacion-y-flora/>

Con cierta regularidad, la cantidad y frecuencia de las lluvias se reduce, generando sequías más fuertes donde se tiene una ocurrencia aproximada de una sequía sería cada 5 años.

A lo descrito anteriormente se suma una irregularidad de las precipitaciones. En algunos casos las lluvias se presentan tardíamente retrasando los cultivos y en otros casos llueve excesivamente al final del ciclo vegetativo de los mismos, siendo perjudicial para la actividad agrícola, especialmente en cultivos anuales (Amandes S.R.L., 2018).

### **3.5. Disponibilidad y consumo de agua potable**

a) Fuentes de agua superficiales: Rincón de la Victoria, río Erquis y río Guadalquivir

Las prestaciones de agua potable y saneamiento básico en Tarija se encuentran a cargo de COSAALT, la cual abastece con este servicio a la gran mayoría de los barrios de la ciudad de Tarija.

El agua potable es obtenida de dos fuentes principales: Una fuente de agua superficial que proviene del río La Victoria (de donde se extraen entre 342 l/s en las diferentes épocas del año), el río Erquis (con unos 40 l/s) y una toma de agua puntual sobre el río Guadalquivir (las Tipas) de unos 60 l/s con el funcionamiento de una bomba y 110 l/s con el funcionamiento de dos bombas (60 – 100 l/s).

b) Fuentes de agua subterránea: Pozos

Los pozos de producción son 53, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo del casco urbano y periurbano de Tarija. La variación en la producción de agua potable, las áreas o zonas de servicio son modificadas; por ejemplo, El río La Victoria reduce considerablemente su caudal en época de estiaje, COSAALT activa una serie de pozos para reforzar la dotación de agua a sus usuarios. En época húmeda, la cobertura desde La Victoria se amplía a un 60%.

Adicionalmente, hay pozos independientes denominados pozos S.A.R.H. (Sistemas de autoabastecimiento de recursos hídricos) que son aplicados para uso industrial.

En promedio COSAALT distribuye en Tarija unos 564 l/s de agua potable, lo cual representa una producción anual de uno  $17,9 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de agua. El consumo de agua por habitante al día es de unos 238 l/d lo cual representa para los actuales 205.000 habitantes del área urbana, un consumo anual de  $10,3 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de agua. (COSAALT, 2019).

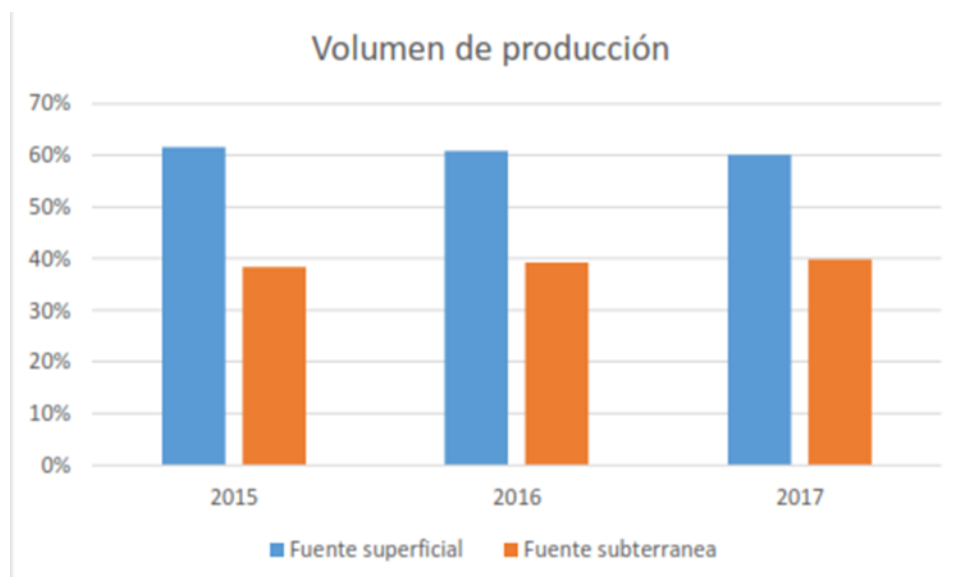


Figura 37. Relación entre el volumen de producción de fuentes superficiales y subterráneas (pozos de COSAALT.).

Fuente: PERIAGUA II - GIZ. 2014.

Ante la reducción drástica que se da en los caudales de las aguas superficiales, COSAALT hace uso de las aguas subterráneas mediante la explotación de 53 pozos que promedian un caudal cercano a los 180 l/s, con máximos hasta de 250 l/s en los meses más críticos. La capacidad instalada de los pozos es de 355 l/s (COSAALT, 2019).

### 3.6. Zonificación del área de recarga hídrica

Las áreas de recarga se encuentran mayormente en el sector de piedemonte de la Reserva Biológica del Sama (por ejemplo, sector del Rincón de La Victoria, San Andrés, etc.). En estos sectores, el agua que descende del área montañosa se infiltra y recarga los acuíferos. Mayormente son áreas de mayor permeabilidad y donde los materiales aluviales gruesos (en los sectores de los cauces superficiales) favorecen la infiltración del agua de lluvia y de los cauces superficiales.

La importancia del agua como recurso fundamental de protección y conservación está asociado a la presencia de los bosques nativos, que tienen que ver con la regulación de aguas a nivel de la cuenca, participando en la intercepción de la precipitación, mejoran los procesos de infiltración del agua hacia el interior del perfil del suelo y reducen la escorrentía, provocando la recarga de los acuíferos en la época húmeda. (Daniela Pelaez y Ronald Pasig, 2019).

#### **4.1. Antecedentes**

Los recursos hídricos del subsuelo de la cuenca de Tarija fueron explotados a partir de los años 70 con la perforación de los primeros pozos.

Posteriormente entre los años 70 y 80 se llevó a cabo el proyecto: “Investigación de las aguas subterráneas en el Valle Central de Tarija”, en este proyecto se perforaron 28 pozos de explotación de diferentes partes de la cuenca.

Posteriormente la Corporación Regional de Desarrollo de Tarija (CODETAR) y algunas empresas privadas perforaron pozos para fines de uso doméstico o para comunidades.

En los últimos años el gobierno chino otorgó al gobierno boliviano un crédito para la perforación de pozos en el departamento de Tarija; de esta misión 10 pozos fueron perforados en la cuenca de Tarija en una primera fase en 1994; posteriormente en la segunda fase se perforarán 9 pozos más en los años 96/97.

Muchos de estos pozos fueron entregados a COSAALT para el abastecimiento de agua potable para la ciudad. (Ramírez, 1997)

Los acuíferos cuaternarios que se ubican en la parte central de la cuenca Guadalquivir, de los cuales depósitos aluviales (terrazas, abanicos y cauces de ríos), depósitos coluviales y algunos depósitos fluviolacustres, son de interés hidrogeológico por su comportamiento como zonas de recarga y como formaciones acuíferas.

Condiciones hidrogeológicas favorables para el aprovechamiento de agua subterránea se encuentran en el acuífero libre común en las áreas de Erquiz, La Victoria y San Andrés.

En la parte central de la cuenca donde el acuífero es confinado, los recursos disponibles son escasos se recomienda impedir la perforación de nuevos pozos en toda esta zona para evitar la sobre-explotación del acuífero. (Naciones Unidas, 1980).

Los depósitos cuaternarios que rellenan el valle central de Tarija conforman dos tipos de acuíferos, cuyas características son las siguientes:

- Un acuífero confinado, conformado por lenguas y cuñas de arena y grava, intercaladas con depósitos limo-arcillosos lacustres que abarcan la parte central de la cuenca.
- Acuíferos freáticos someros, en los depósitos aluviales delgados a lo largo de los cauces, tales como el río Guadalquivir y sus afluentes principales.

En el sector de Tomatitas (al norte de la ciudad de Tarija) existe un cono de abatimiento y que es producto de una explotación excesiva de los pozos allí presentes, Los niveles estáticos de estos pozos han sufrido descensos de entre 10 y 13 metros en los últimos 20 años y se llega a la conclusión de que el agua subterránea extraída en este sector proviene de la cuenca del río del rincón de La Victoria.

La recarga se produce en la parte de piedemonte, pero del sector norte y circula desde ahí en dirección sur, en el sector die piedemonte de la serranía de Sama, sobre la margen oeste del río Guadalquivir, existe posiblemente un potencial de recarga de agua subterránea importante (delimitado con líneas punteadas azules en la Figura 38). (Daniela Pelaez y Ronald Pasig, 2019).

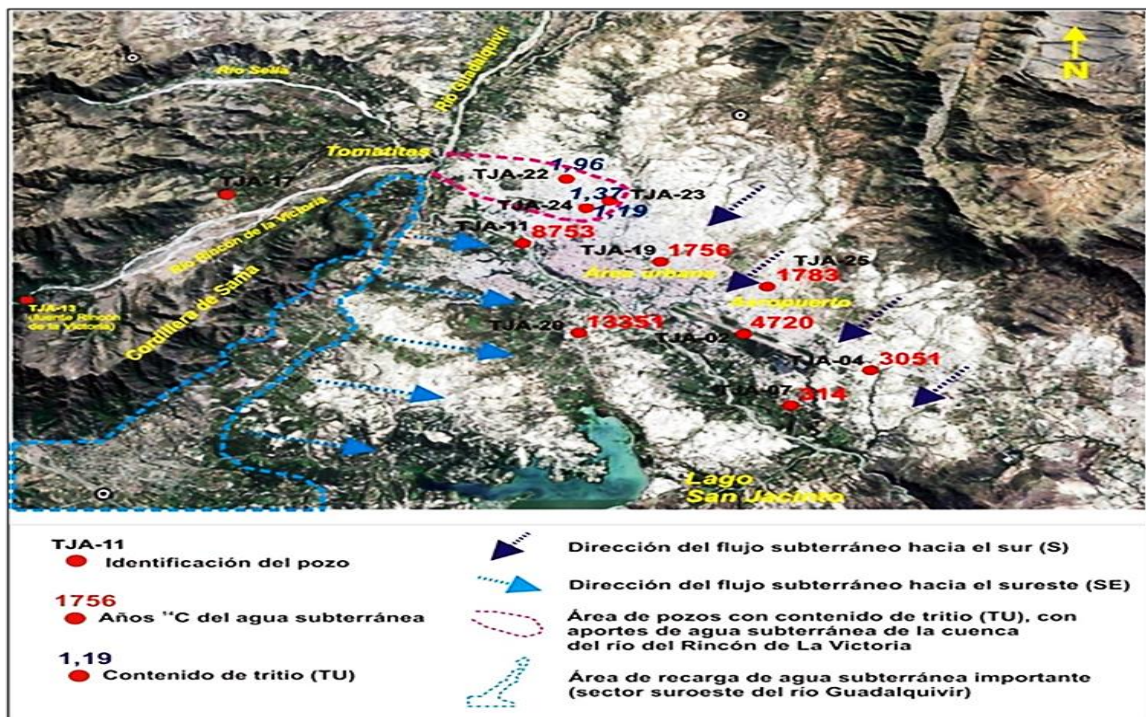


Figura 38. Direcciones de circulación del agua subterránea del sector norte y oeste, como así también áreas de recarga preferencial del área de Piedemonte

Fuente: PERIAGUA II - GIZ. 2014.

La recarga se produce en la cordillera de Sama debido a que las precipitaciones son altas y las formaciones tienen una buena permeabilidad secundaria.

Esta escorrentía subterránea del paleozoico es el origen de numerosos manantiales y del flujo base en el curso superior de todos los ríos perennes<sup>7</sup>.

Además parte de las aguas infiltradas siguen subterráneamente por conexión hidráulica directa hacia los acuíferos de los depósitos cuaternarios.

La recarga del acuífero libre del cuaternario al igual de aquella de las rocas paleozoicas, se produce por infiltración directa del agua de lluvia y por infiltración de la escorrentía durante la época lluviosa.

Los ríos recargan los acuíferos durante la época de lluvia y los drenan durante la época seca, en consecuencia los niveles se mantienen en ambos aproximadamente a la misma altura.

La elevación del nivel como consecuencia de carga del acuífero empieza generalmente en el mes de noviembre con poco desfase después de las primeras lluvias y crecidas importantes.

La recesión tiene lugar durante la época seca al producirse la fuga lateral de la recarga anterior a partir de abril. (Naciones Unidas, 1980).

---

<sup>7</sup> Los ríos perennes tienen un flujo ininterrumpido de agua durante todo el año, independientemente de la temporada.

## 4.2. Ubicación de los pozos del área urbana de la ciudad de Tarija

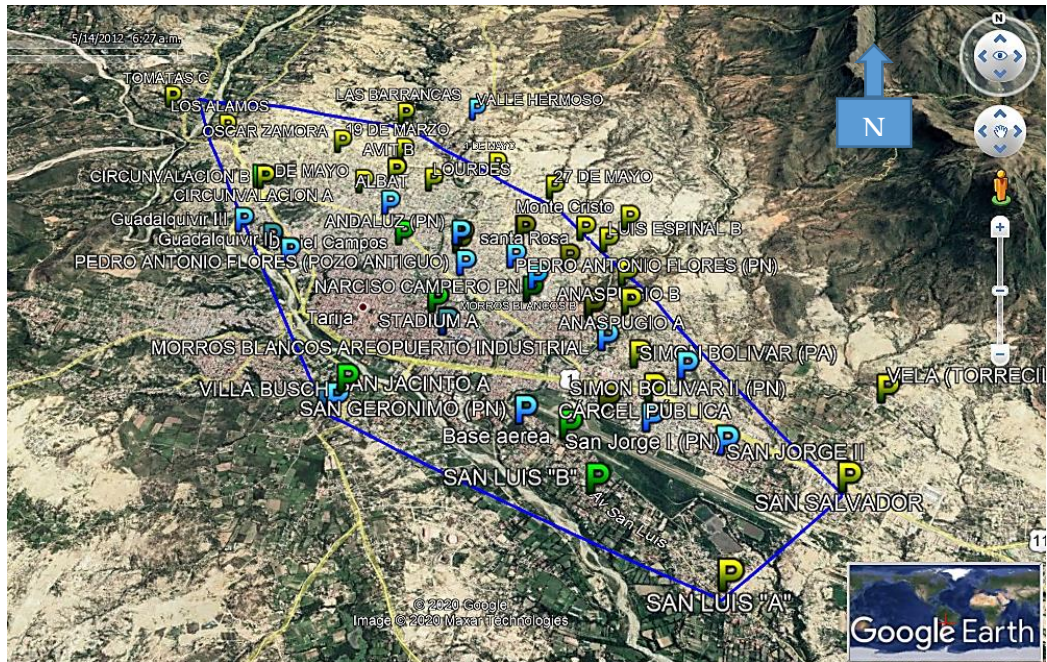


Figura 39. Ubicación de los cuarenta pozos del área urbana de la ciudad de Tarija.  
Fuente: Elaboración propia.

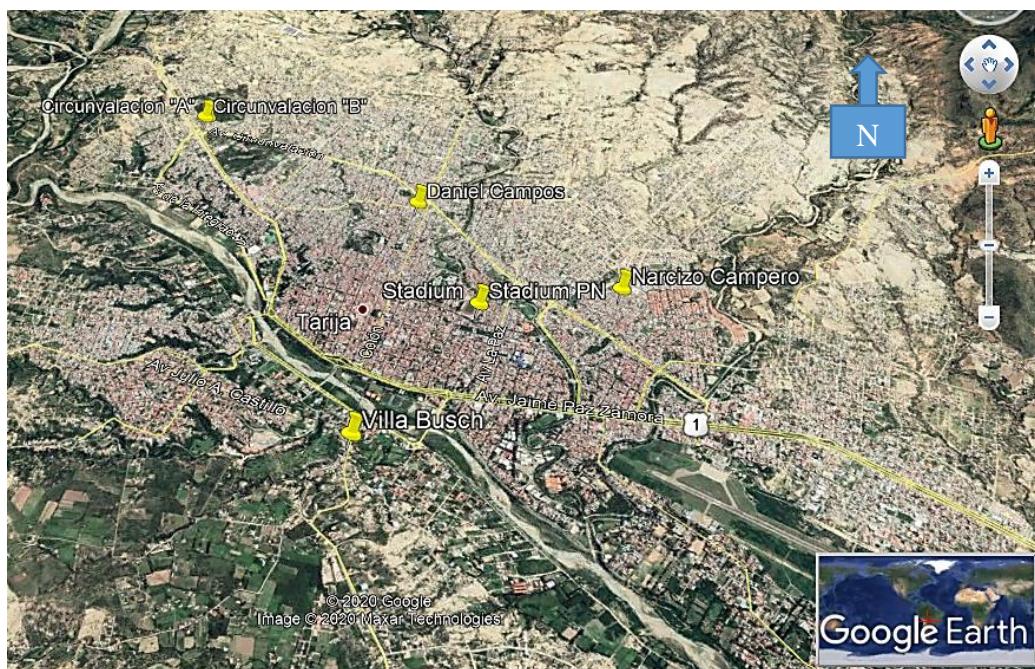


Figura 40. Ubicación de los 8 pozos que son solo de observación del área urbana de la ciudad de Tarija.  
Fuente: Elaboración propia.



### 4.3. Tabla de resumen de los pozos

Tabla 1. Función, barrio de abastecimiento y fecha de inicio de operación de los pozos del área urbana de la ciudad de Tarija.

Nº	POZOS	COORDENADAS UTM			Función	Barrio de abastecimiento	Inicio de Operación
		X	Y	Z			
1	Daniel Campos	320961,16	7619054,44	1891	observación	---	22/03/1977
2	Villa Busch	320344,05	7616470,36	1860	observación	---	---
3	Stadium (Pozo Antiguo)	321402,14	7617806,33	1825	observación	---	---
4	Stadium (Pozo Nuevo)	321403	7617802	1872	operación	La Pampa	27/06/1987
5	Circunvalación "A" (Jardinera afuera)	318991,63	7620301	1864	observación	---	25/09/1992
6	Circunvalación "B" (Con bomba y tanque elevado)	318968,78	7620296,84	1864	operación	Los Chapacos	19/02/2000
7	Narciso Campero (Pozo antiguo)	322595,01	7617928,86	1889	operación	Narciso Campero	---
8	San Luis "B"(kiosco y tapon)	323082	7614988	1847	observación	---	---
9	San Luis "A"(Pozo con Bomba y tanque)	324237,37	7613758,3	1830	operación	San Luis	25/02/1997
10	Villa Fatima Pozo "A"	321537,45	7617399,85	1863	operación	Villa Fatima	---
11	Villa Fatima Pozo "B"	321532,3	7617386,16	1864	operación	Villa Fatima	---
12	San Jacinto A	320256,63	7616126,51	1890	operación	Miraflores	31/09/2006
13	San Jacinto B	320161,09	7616098,17	1880	operación	Miraflores	05/12/2006
14	Guadalquivir	319217,78	7619071,7	1933	operación	Guadalquivir	29/09/1992
15	Guadalquivir II (PN)	319474	7618751	1882	operación	Guadalquivir	19/09/2014
16	Tomatas C	317545	7622830	1935	operación	Tomatitas	---
17	Los Alamos	318287,51	7621558,92	1969	operación	Los Alamos	04/09/2004
18	Avit Pozo A	321035	7620850	1916	operación	La Florida	---
19	Avit Pozo B	320840,32	7620439,66	1916	operación	La Florida	20/07/1987
20	Albat	320768,15	7619703,28	1915	operación	12 de Octubre	---
21	19 de Marzo	320952,89	7620963,84	1940	operación	19 de Marzo	---
22	Lourdes	321369,48	7620240,29	1945	operación	Lourdes	---
23	San Bernardo "A"	321725,86	7618900,31	1937	operación	San Bernardo	---
24	El Constructor "A"	322583,6	7619098,05	1959	operación	El Constructor	10/10/1992
25	El Constructor "B"	322575,8	7619097,21	1957	operación	El Constructor	---
26	Pedro Antonio Flores (Pozo Antiguo)	321775,63	7618460,83	1890	operación	Pedro Antonio Flores	---
27	Luis Espinal B	323683,95	7618820,7	1907	operación	Luis Espinal	12/03/2003
28	Morros Blancos "A"	323338,81	7617564,32	1903	operación	Bartolomé Attard	17/03/1987
29	Morros Blancos "B"	323345,69	7617601,71	1902	operación	Bartolomé Attard	22/01/1997
30	Aeropuerto "A"	323338,81	7617564,32	1878	operación	Aeropuerto	---
31	Anaspugio "A"	323809,49	7617642,77	1894	operación	Juan Nicolai	05/10/2004
32	Simón Bolívar (Pozo Antiguo)	323787,56	7616733,01	1890	operación	Aeropuerto	22/01/1997
33	Oscar Zamora M.	320031,44	7621140,15	1922	operación	Los Chapacos	30/02/1997
34	3 de mayo	320390,21	7620205,91	1911	operación	3 de mayo	09/10/1992
35	Las Barrancas	320954	7621913	1855	operación	sin Barrio	25/02/2003
36	27 de Mayo	323063	7619947	1927	operación	sin Barrio	13/07/2012
37	1ro de Mayo	322296,99	7620602,96	1845	operación	sin Barrio	19/10/2002
38	San Salvador	325742,9	7614909,12	1868	operación	San Salvador	---
39	Vela (Torrecillas)	321155	7619485	1892	operación	sin Barrio	02/04/2012
40	San Jorge II	324551,64	7615445,49	1870	operación	San Jorge II	10/09/1992

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4. Mapas de Isolíneas mensuales y dirección de flujo subterráneo

Mapas de isolíneas mensuales en (Anexo b).

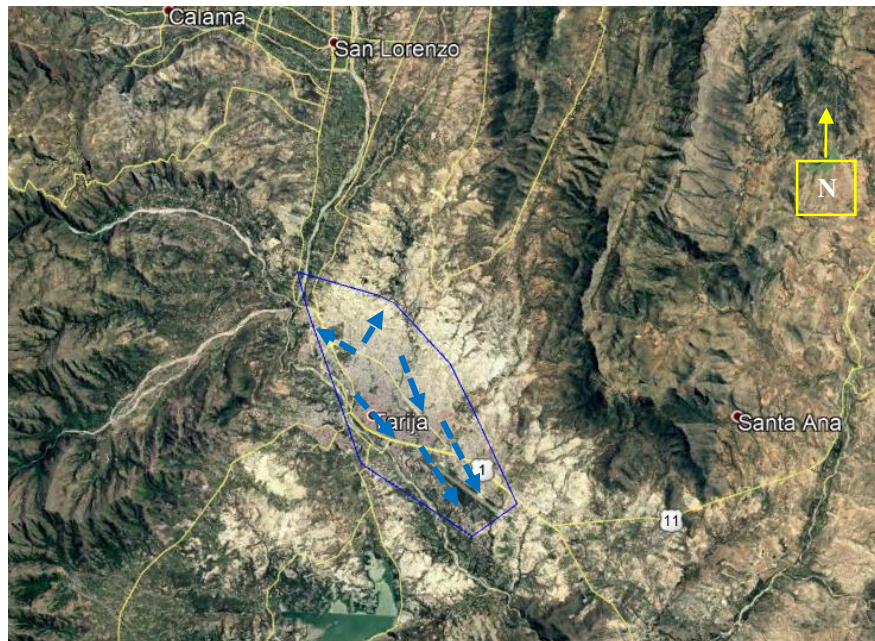


Figura 41. Dirección del flujo de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

En la zona urbana de la ciudad de Tarija las líneas del flujo de las aguas subterráneas están en dirección sureste como se muestra en la figura 41 que en relación a la figura 38 muestran la misma dirección que el área de mayor recarga desde la cordillera de Sama.

El sentido de flujo de las aguas subterráneas tiene similitud en todos los meses estudiados (abril-diciembre 2019).

Por otro lado las direcciones de flujo siguen un sentido en dirección al noreste debido a que existe una quebrada y el agua drena hasta ese sector.

También podemos observar que el sentido del flujo cambia hacia la dirección noroeste debido a los niveles freáticos bajos en la zona norte.

#### 4.5. Variación anual del nivel freático del área urbana de la ciudad de Tarija

La variación anual se calculó con la diferencia del nivel freático estático al inicio de su operación con el nivel freático de la gestión 2019 dividiendo los años de operación de cada pozo.

En la tabla 2 se presentan los resultados.

Tabla 2. Variación anual del nivel freático.

POZOS	COORDENADAS UTM			Inicio de su operación				Años de operación	Operación en 2019			m/año
	X	Y	Z	Fecha de operación	Mes	Año	Nivel freático (m)		Mes	Año	Nivel freático (m)	
Daniel Campos	320961,16	7619054,4	1891	22/03/1977	marzo	1977	14	42	abril	2019	29,47	0,70
Stadium (Pozo Nuevo)	321403	7617802	1872	27/06/1987	julio	1987	3,8	32	julio	2019	16,3	0,39
Circunvalación "A" (Jardinera afuera)	318991,63	7620301	1864	25/09/1992	septiembre	1992	30,54	27	septiembre	2019	38,87	0,31
Circunvalación "B" (Con bomba y tanque elevado)	318968,78	7620296,8	1864	19/02/2000	febrero	2000	40,5	19	abril	2019	34,66	-0,31
San Luis "A"(Pozo con Bomba y tanque)	324237,37	7613758,3	1830	25/02/1997	febrero	1997	0,5	22	abril	2019	1,69	0,05
San Jacinto A	320256,63	7616126,5	1890	31/09/2006	septiembre	2006	53,75	13	septiembre	2019	66,33	0,97
San Jacinto B	320161,09	7616098,2	1880	05/12/2006	diciembre	2006	50,2	13	diciembre	2019	57,34	0,55
Guadalquivir	319217,78	7619071,7	1933	29/09/1992	septiembre	1992	1	27	septiembre	2019	19,45	0,68
Guadalquivir II (PN)	319474	7618751	1882	19/09/2014	septiembre	2014	9,85	5	septiembre	2019	3	-1,37
Los Alamos	318287,51	7621558,9	1969	04/09/2004	septiembre	2004	26,06	15	septiembre	2019	26,94	0,06
Avit Pozo B	320840,32	7620439,7	1916	20/07/1987	julio	1987	18,2	32	julio	2019	29,71	0,36
El Constructor "A"	322583,6	7619098,1	1959	10/10/1992	octubre	1992	39,5	27	octubre	2019	50,45	0,41
Luis Espinal B	323683,95	7618820,7	1907	12/03/2003	marzo	2003	26,2	16	abril	2019	51,85	1,60
Morros Blancos "A"	323338,81	7617564,3	1903	17/03/1987	marzo	1987	33	32	abril	2019	51,45	0,58
Morros Blancos "B"	323345,69	7617601,7	1902	22/01/1997	enero	1997	23,5	22	abril	2019	50,7	1,24
Anaspugio "A"	323809,49	7617642,8	1894	05/10/2004	octubre	2004	27,8	15	octubre	2019	43,52	1,05
Simón Bolívar (Pozo Antiguo)	323787,56	7616733	1890	22/01/1997	enero	1997	23,5	22	abril	2019	43,22	0,90
Oscar Zamora M.	320031,44	7621140,2	1922	30/02/1997	febrero	1997	8,73	22	abril	2019	11,52	0,13
3 de mayo	320390,21	7620205,9	1911	09/10/1992	octubre	1992	18,5	27	octubre	2019	28,93	0,39
Las Barrancas	320954	7621913	1855	25/02/2003	febrero	2003	0	16	abril	2019	22,08	1,38
27 de Mayo	323063	7619947	1927	13/07/2012	julio	2012	58,03	7	julio	2019	61,3	0,47
1ro de Mayo	322296,99	7620603	1845	19/10/2002	octubre	2002	26,75	17	octubre	2019	47,5	1,22
Vela (Torrecillas)	321155	7619485	1892	02/04/2012	abril	2012	37,8	7	abril	2019	62,4	3,51
San Jorge II	324551,64	7615445,5	1870	10/09/1992	septiembre	1992	6	27	septiembre	2019	26,3	0,75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Rango de variación anual del nivel freático.

Rango de variación (m/año)	
Índice	colores
de 1 a 3.5 m/año	rojo
de 0,5 a 1 m/año	naranja
de 0 a 0,5 m/año	verde

Fuente: Elaboración propia.

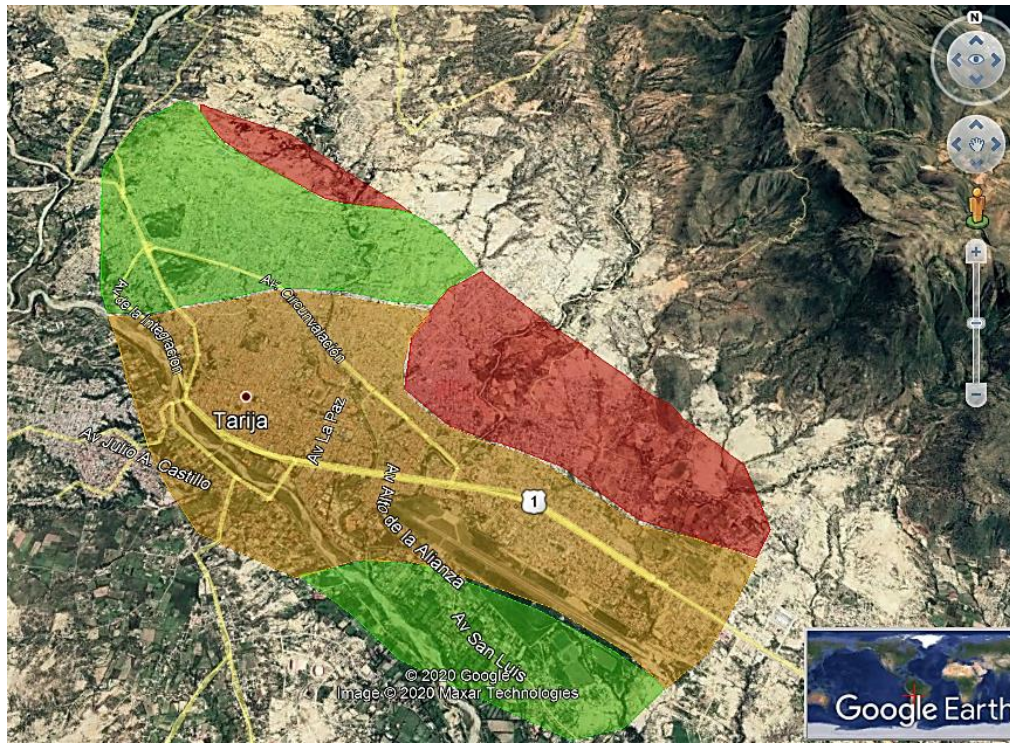


Figura 42. Zonificación del área urbana de la ciudad de Tarija de acuerdo al rango de variación anual del nivel freático.

Fuente: Elaboración propia.

En la zona roja tiene un descenso de nivel freático de 1 a 3.5 m cada año.

La zona naranja en la que mayor área tiene y está distribuida por la mitad de la zona urbana de Tarija tiene un descenso de 0.5 a 1 m de nivel freático cada año.

Las zonas verdes donde los valores de descenso del nivel freático son menores a 0.5 m por cada año de operación, siendo la zona con mayor recarga y recuperación del área de estudio.

#### 4.6. Diagnóstico del comportamiento de la recarga del nivel freático

Tabla 4. Datos de precipitación y nivel freático (pozo DANIEL CAMPOS).

<b>DANIEL CAMPOS</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
320961,16	7619054,44	1891		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	30,74	1860,26	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	31,42	1859,58	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	31,37	1859,63	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	31,32	1859,68	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	30,72	1860,28	126,8
	<b>FEBRERO</b>	30,77	1860,23	116,5
	<b>MARZO</b>	30,52	1860,48	58,3
	<b>ABRIL</b>	29,92	1861,08	68,0
	<b>MAYO</b>	29,82	1861,18	1,2
	<b>JUNIO</b>	31,82	1859,18	0,0
	<b>JULIO</b>	31,42	1859,58	18,0
	<b>AGOSTO</b>	30,22	1860,78	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	30,74	1860,26	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	32,02	1858,98	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	31,37	1859,63	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	31,57	1859,43	63,4

Fuente: Elaboración propia.

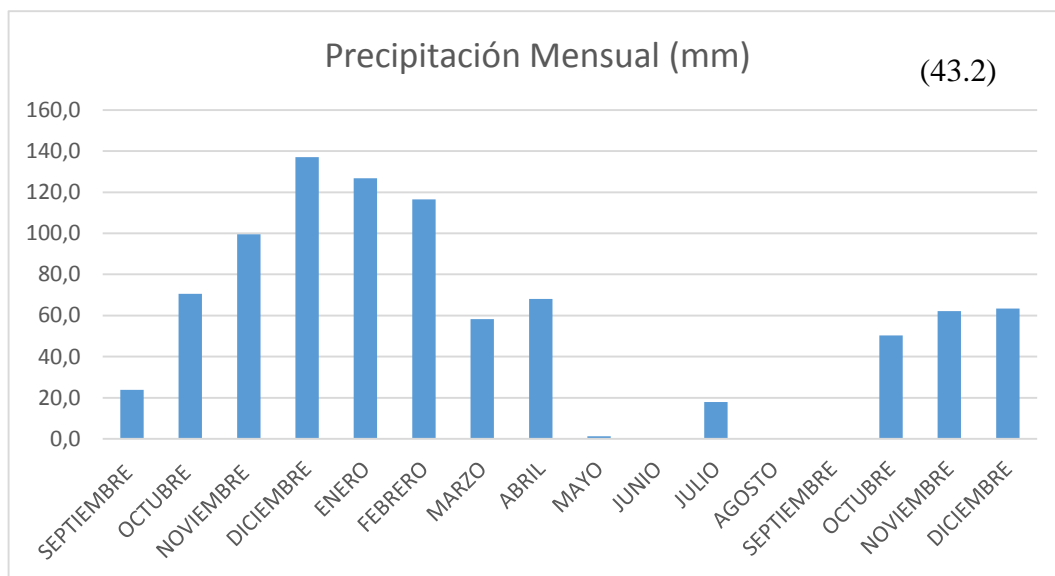
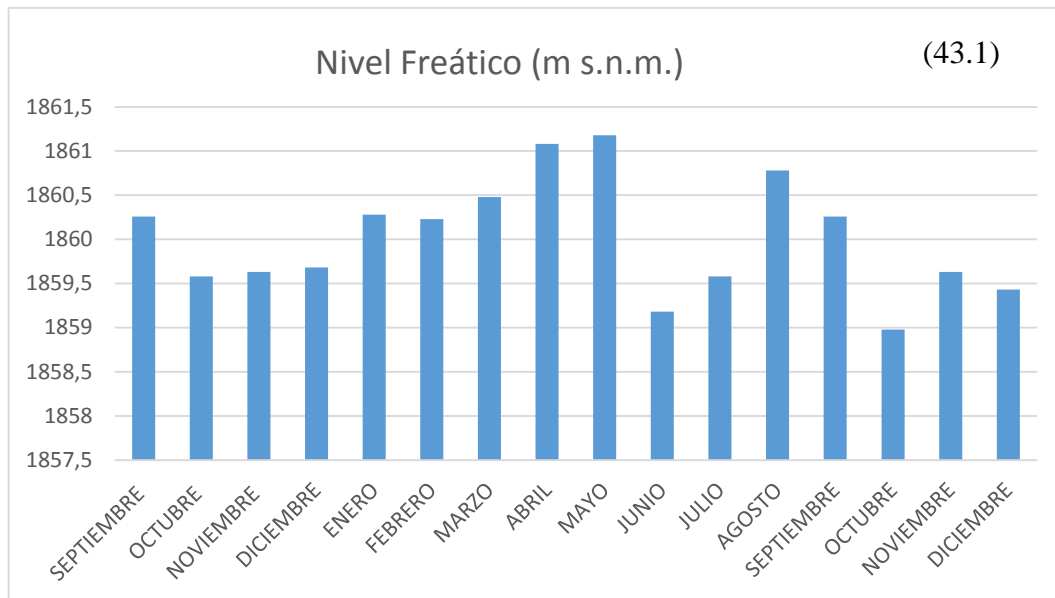


Figura 43. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo DANIEL CAMPOS).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 43.1) se encuentra en el mes de mayo de 2019 con una cota de 1867.18 m s.n.m.

**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 43.1) se encuentra en el mes de octubre de 2019 con una cota de 1858,98 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre de 2018 con una altura de 137 mm (figura 43.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático asciende desde el mes de enero de 2019 llegando a su nivel más alto en el mes de mayo de 2019 y posteriormente descendiendo en junio de 2019 y octubre de 2019.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018 y posteriormente recargando en el acuífero en el mes de enero de 2019.

En los meses de octubre noviembre y diciembre (2018 y 2019) se observa que los niveles son más bajos debido a la época de estiaje que se presenta anterior a estos meses.

Podemos observar del hidrograma (figura 43.1) que en el mes de junio de 2019 su nivel desciende 2 m y volviendo a su recuperación en el mes de agosto de 2019.

Observamos que el acuífero es semiconfinado debido a que su recarga por parte de la precipitación no es directa y basándonos en antecedentes de investigaciones anteriores confirmamos que el comportamiento del acuífero no sería de tipo libre o común.

Tabla 5. Datos de precipitación y nivel freático (pozo VILLA BUSCH).

<b>VILLA BUSCH</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
320344,05	7616470,36	1860		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	16,93	1843,07	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	18,45	1841,55	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	18,62	1841,38	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	19,03	1840,97	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	17,4	1842,6	126,8
	<b>FEBRERO</b>	16,55	1843,45	116,5
	<b>MARZO</b>	16,75	1843,25	58,3
	<b>ABRIL</b>	15,935	1844,065	68,0
	<b>MAYO</b>	17,25	1842,75	1,2
	<b>JUNIO</b>	16,2	1843,8	0,0
	<b>JULIO</b>	16,2	1843,8	18,0
	<b>AGOSTO</b>	17,03	1842,97	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	16,93	1843,07	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	18,5	1841,5	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	18,75	1841,25	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	18,47	1841,53	63,4

Fuente: Elaboración propia.



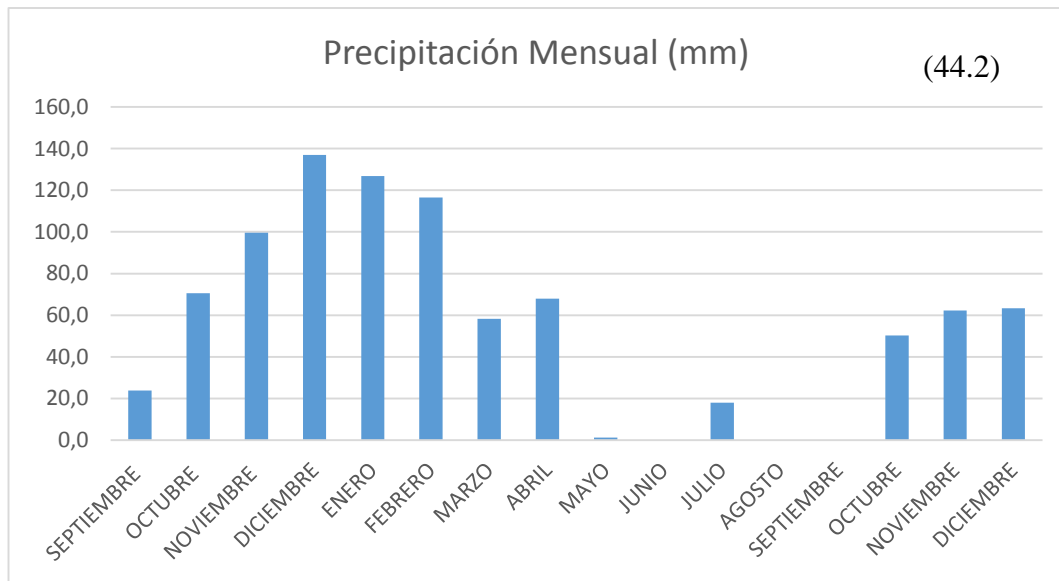
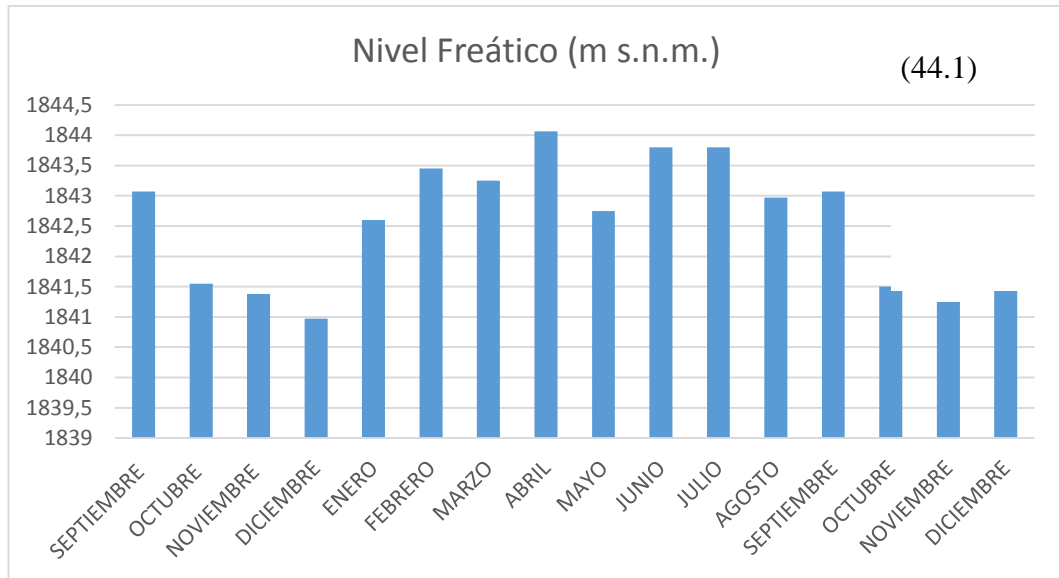


Figura 44. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo VILLA BUSCH).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 44.1) se encuentra en el mes de abril de 2019 con una cota de 1844,07 m s.n.m.

**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 44.1) se encuentra en el mes de diciembre de 2018 con una cota de 1840,97 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre con una altura de 137 mm (figura 44.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático asciende desde el mes de enero de 2019 llegando a su nivel más alto en el mes de abril de 2019 y posteriormente descendiendo en mayo de 2019 de una manera irregular.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018 y recargando el acuífero posteriormente en el mes de enero de 2019.

En los meses de octubre noviembre y diciembre (2018 y 2019) se observa que los niveles son más bajos debido a la época de estiaje que se presenta anterior a estos meses.

Podemos observar del hidrograma (figura 44.1) que en el mes de mayo de 2019 su nivel desciende 1,32 m y volviendo a su recuperación en el mes de junio de 2019.

Observamos que el acuífero es semiconfinado debido a que su recarga por parte de la precipitación no es directa y basándonos en antecedentes de investigaciones anteriores confirmamos que el comportamiento del acuífero no sería de tipo libre o común.

Tabla 6. Datos de precipitación y nivel freático (pozo CIRCUNVALACIÓN "A").

<b>CIRCUNVALACIÓN "A" JARDINERA</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
318991,63	7620301	1864		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	40,060	1823,940	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	40,440	1823,560	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	40,640	1823,360	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	40,120	1823,880	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	39,720	1824,280	126,8
	<b>FEBRERO</b>	39,450	1824,550	116,5
	<b>MARZO</b>	38,870	1825,130	58,3
	<b>ABRIL</b>	38,220	1825,780	68,0
	<b>MAYO</b>	38,070	1825,930	1,2
	<b>JUNIO</b>	37,97	1826,030	0,0
	<b>JULIO</b>	37,87	1826,130	18,0
	<b>AGOSTO</b>	38,57	1825,430	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	38,97	1825,030	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	39,57	1824,430	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	40,47	1823,530	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	40,15	1823,850	63,4

Fuente: Elaboración propia.

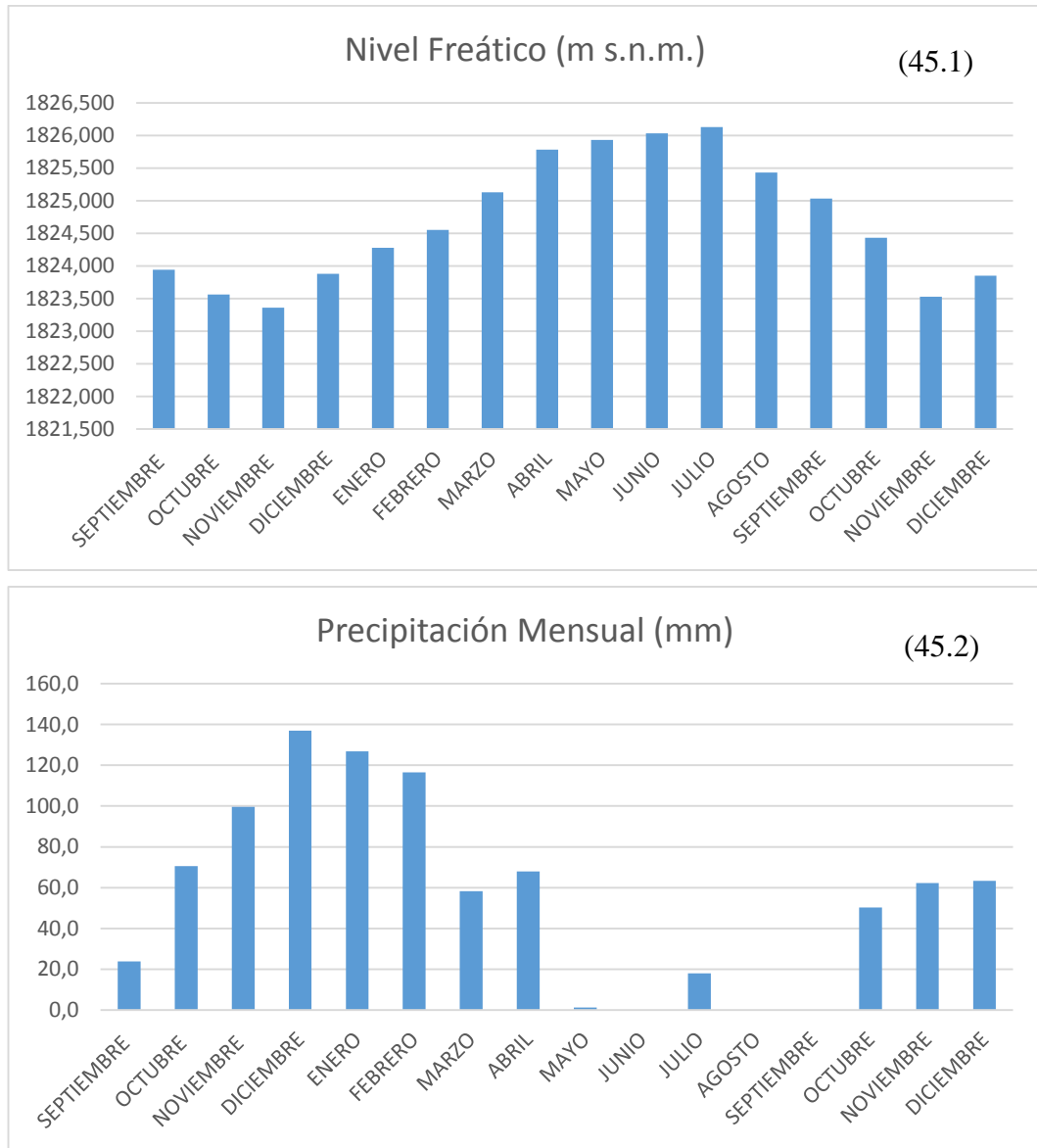


Figura 45. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo CIRCUNVALACIÓN “A”).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 45.1) se encuentra en el mes de julio de 2019 con una cota de 1826,13 m s.n.m.

**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 45.1) se encuentra en el mes de noviembre de 2018 con una cota de 1823,36 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre con una altura de 137 mm (figura 45.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático asciende desde el mes de diciembre de 2018 llegando a su nivel más alto en el mes de julio de 2019 y posteriormente descendiendo en agosto de 2018 de manera regular.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018 y recargando el acuífero en el mes de diciembre debido a las precipitaciones de octubre en ambos años (2018 y 2019).

En los meses noviembre y diciembre de ambos años (2018 y 2019) se observa que los niveles son más bajos debido a que la recarga no es directa y tardará en recuperar su nivel freático.

Tabla 7. Datos de precipitación y nivel freático (pozo CIRCUNVALACIÓN "B").

<b>CIRCUNVALACIÓN "B" Bomba</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
318968,78	7620296,84	1864		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	33,14	1830,86	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	33,46	1830,54	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	33,33	1830,67	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	35,81	1828,19	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	36,41	1827,59	126,8
	<b>FEBRERO</b>	36,31	1827,69	116,5
	<b>MARZO</b>	36,46	1827,54	58,3
	<b>ABRIL</b>	35,46	1828,54	68,0
	<b>MAYO</b>	34,81	1829,19	1,2
	<b>JUNIO</b>	34,66	1829,34	0,0
	<b>JULIO</b>	34,66	1829,34	18,0
	<b>AGOSTO</b>	34,06	1829,94	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	34,16	1829,84	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	34,36	1829,64	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	34,56	1829,44	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	34,19	1829,81	63,4

Fuente: Elaboración propia.

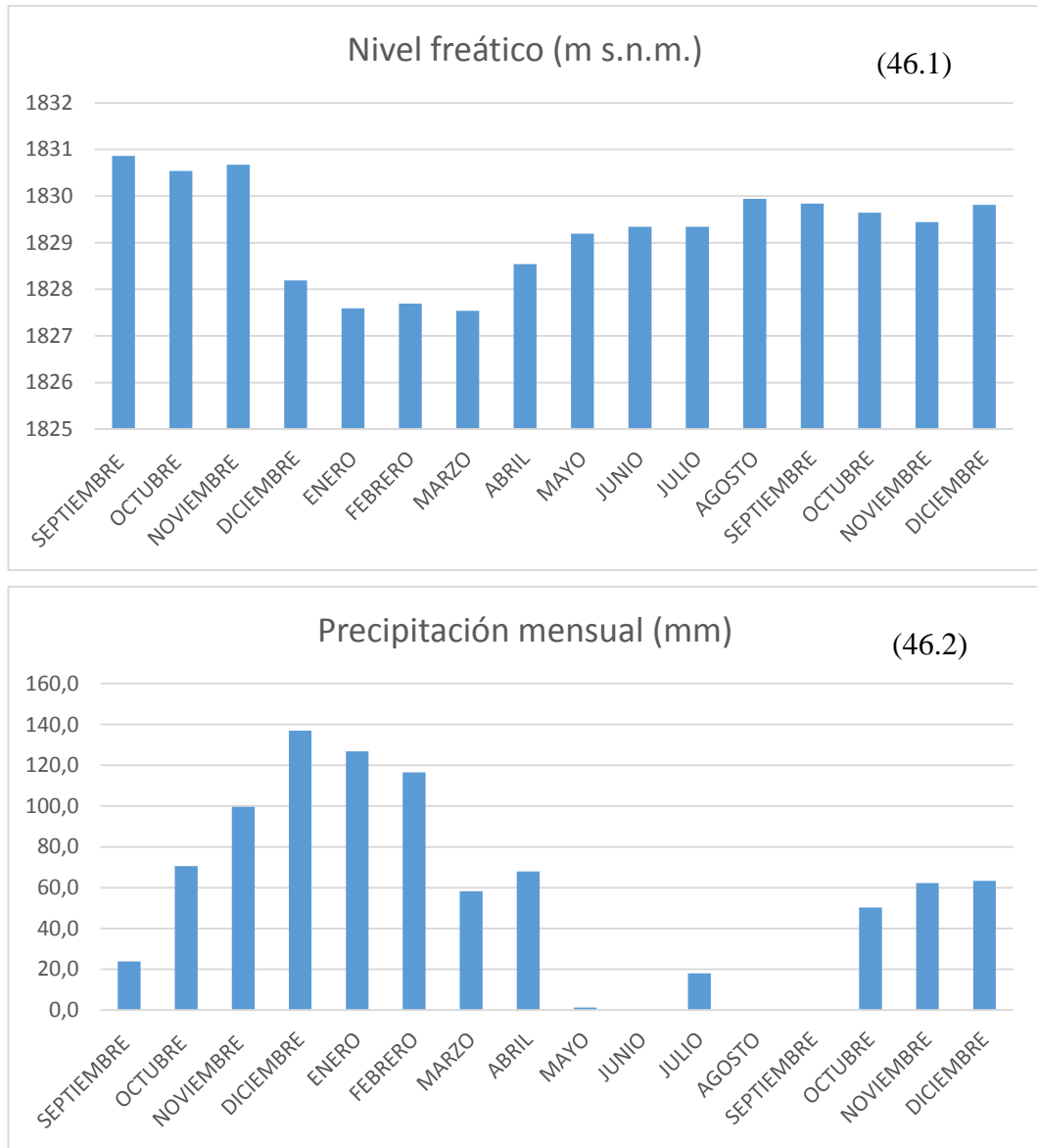


Figura 46. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo CIRCUNVALACIÓN “B”).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 46.1) se encuentra en el mes de septiembre de 2018 con una cota de 1830,86 m s.n.m.

**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 46.1) se encuentra en el mes de marzo de 2019 con una cota de 1827,54 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre de 2018 con una altura de 137 mm (figura 46.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático desciende en el mes de diciembre de 2018 y posteriormente ascendiendo en el mes de abril de 2019 manteniendo un nivel alto hasta diciembre de 2019, en comparación a los niveles freáticos del anterior año son menores.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018 y posteriormente recargando el acuífero en el mes de abril de 2019.

Entre los meses de diciembre de 2018 y marzo de 2019 se observa que los niveles son más bajos debido a que su recarga no es directa y tardando más en la recuperación de su nivel.

Se analiza que en los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2018 los niveles son mayores a los mismos meses del siguiente año (2019), debido a que no se tiene una recuperación del nivel freático.



Tabla 8. Datos de precipitación y nivel freático (pozo NARCISO CAMPERO).

<b>NARCISO CAMPERO</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
322595,01	7617928,86	1889		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	35,39	1853,61	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	36,2	1852,8	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	36,8	1852,2	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	35,35	1853,65	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	33,45	1855,55	126,8
	<b>FEBRERO</b>	33,3	1855,7	116,5
	<b>MARZO</b>	32,41	1856,59	58,3
	<b>ABRIL</b>	31,55	1857,45	68,0
	<b>MAYO</b>	31,6	1857,4	1,2
	<b>JUNIO</b>	32,2	1856,8	0,0
	<b>JULIO</b>	33,1	1855,9	18,0
	<b>AGOSTO</b>	33,55	1855,45	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	34,73	1854,27	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	36,25	1852,75	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	36,22	1852,78	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	34,51	1854,49	63,4

Fuente: Elaboración propia.

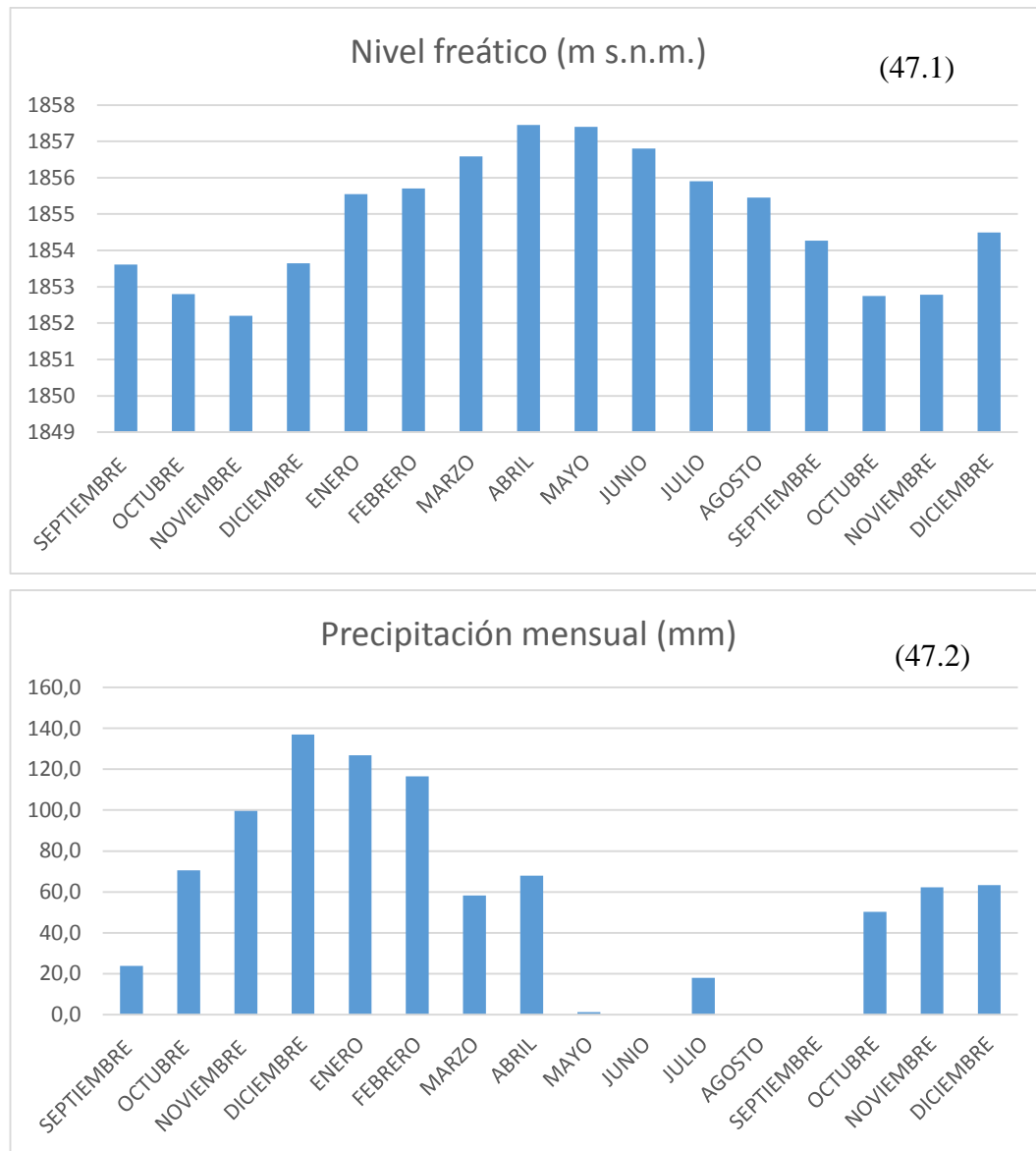


Figura 47. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo NARCISO CAMPERO).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 47.1) se encuentra en los meses de abril y mayo de 2019 con una cota de 1857,45 y 1857.4 m s.n.m. respectivamente.

**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 47.1) se encuentra en el mes de noviembre de 2018 con una cota de 1852,2 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre de 2018 con una altura de 137 mm (figura 47.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático asciende en el mes de diciembre de 2018 hasta llegar a su pico en los meses de abril y mayo de 2019, posteriormente desciende su nivel hasta el mes de noviembre de 2019.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018 recargando el acuífero en el mes de diciembre debido a las precipitaciones de octubre en ambos años (2018 y 2019).

Entre los meses de octubre y noviembre de ambos años se observa que los niveles son más bajos.

Se examina en la variación del nivel freático que se presenta una debida recuperación del nivel freático.

Observamos que el acuífero es confinado debido a que su recarga por parte de la precipitación no es directa y basándonos en antecedentes de investigaciones anteriores confirmamos que el comportamiento del acuífero no sería de tipo libre o común.

Tabla 9. Datos de precipitación y nivel freático (pozo SAN LUIS).

<b>SAN LUIS</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
323082.00	7614988.00	1847		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	3,3	1843,7	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	3,28	1843,72	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	3,25	1843,75	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	3,2	1843,8	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	2,33	1844,67	126,8
	<b>FEBRERO</b>	1,75	1845,25	116,5
	<b>MARZO</b>	1,25	1845,75	58,3
	<b>ABRIL</b>	0,95	1846,05	68,0
	<b>MAYO</b>	0,85	1846,15	1,2
	<b>JUNIO</b>	0,75	1846,25	0,0
	<b>JULIO</b>	1,4	1845,6	18,0
	<b>AGOSTO</b>	1,46	1845,54	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	3,3	1843,7	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	3,3	1843,7	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	3,55	1843,45	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	3,315	1843,685	63,4

Fuente: Elaboración propia.

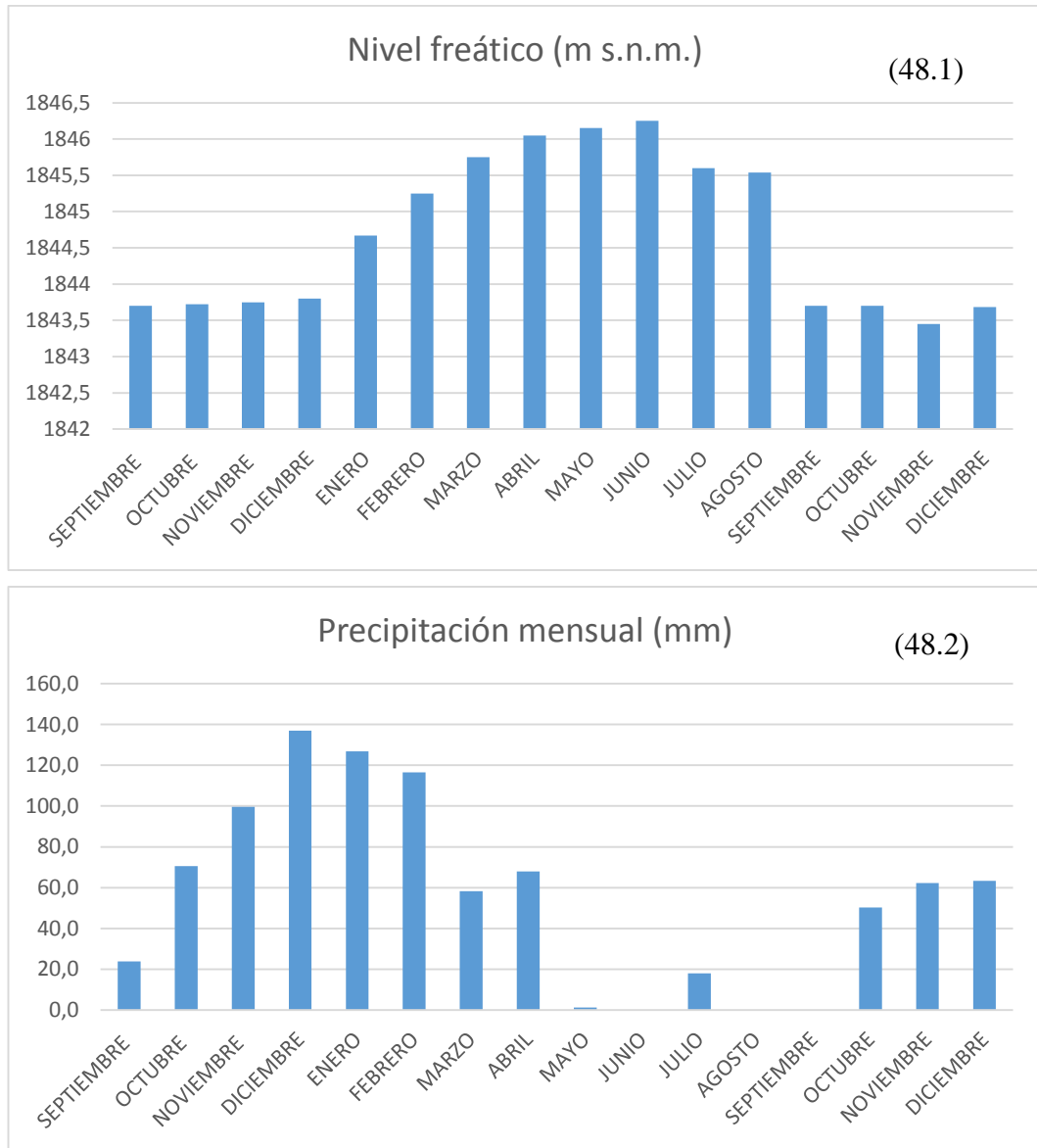


Figura 48. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo SAN LUIS).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 48.1) se encuentra en el mes de junio de 2019 con una cota de 1846,25 m s.n.m.

**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 48.1) se encuentra en el mes de noviembre de 2019 con una cota de 1843,45 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre de 2018 con una altura de 137 mm (figura 48.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático asciende en el mes de enero de 2019 hasta llegar a su pico en el mes de junio de 2019, posteriormente desciende su nivel hasta el mes de noviembre de 2019.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018 y posteriormente recargando el acuífero en el mes de enero de 2019.

En el mes de septiembre de 2019 el nivel freático desciende de manera brusca y mantienen los niveles freáticos bajos en octubre, noviembre y diciembre de 2019.

Tabla 10. Datos de precipitación y nivel freático (pozo STADIUM).

<b>STADIUM</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
321402,14	7617806,33	1825		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	20,89	1804,11	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	20,87	1804,13	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	19,43	1805,57	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	19,39	1805,61	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	17,45	1807,55	126,8
	<b>FEBRERO</b>	16,94	1808,06	116,5
	<b>MARZO</b>	16,23	1808,77	58,3
	<b>ABRIL</b>	15,49	1809,51	68,0
	<b>MAYO</b>	15,54	1809,46	1,2
	<b>JUNIO</b>	15,59	1809,41	0,0
	<b>JULIO</b>	16,19	1808,81	18,0
	<b>AGOSTO</b>	18,29	1806,71	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	20,09	1804,91	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	21,19	1803,81	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	20,39	1804,61	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	18,35	1806,65	63,4

Fuente: Elaboración propia.

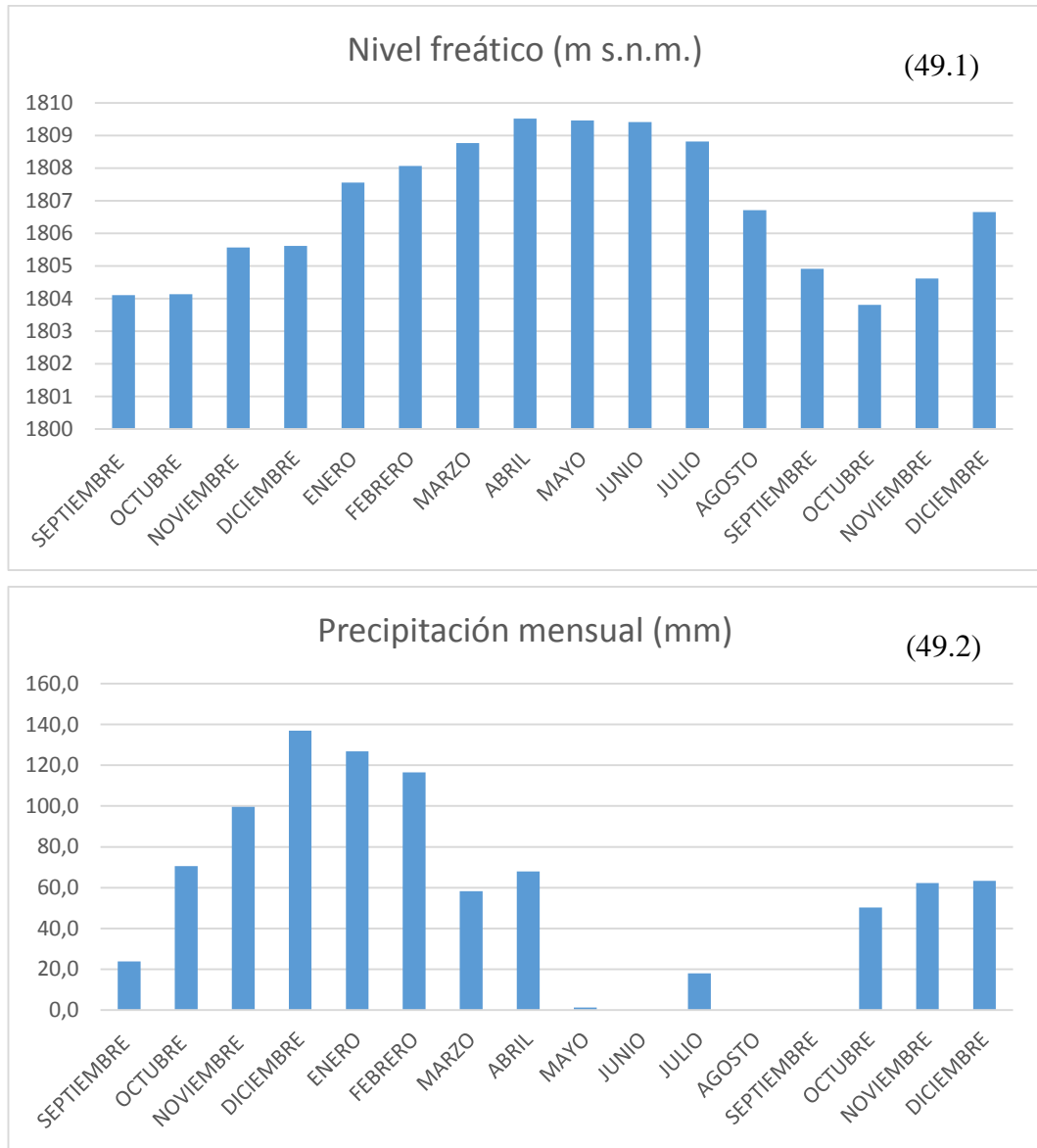


Figura 49. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo STADIUM).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 49.1) se encuentra en el mes de abril de 2019 con una cota de 1809,51 m s.n.m.



**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 49.1) se encuentra en el mes de octubre de 2019 con una cota de 1803,81 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre de 2018 con una altura de 137 mm (figura 49.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático asciende en el mes de noviembre de 2018 hasta llegar a su pico en el mes de abril de 2019 manteniéndose hasta junio de 2019, posteriormente desciende su nivel hasta el mes de octubre de 2019 y volviendo a ascender en noviembre de 2019.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018, el acuífero comienza a recargarse un mes antes en noviembre de 2018 por las precipitaciones de octubre y septiembre de 2018.

Examinando la variación del nivel freático determinamos que existe una debida recuperación de agua subterránea en este acuífero por el comportamiento similar en ambos años.

Observamos que el acuífero es semiconfinado debido a que su recarga por parte de la precipitación no es directa y basándonos en antecedentes de investigaciones anteriores confirmamos que el comportamiento del acuífero no sería de tipo libre o común.

Tabla 11. Datos de precipitación y nivel freático (pozo STADIUM PN).

<b>STADIUM PN</b>				
<b>COORDENADAS DE UBICACIÓN UTM</b>				
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
321403	7617802	1872		
<b>AÑO</b>	<b>MESES</b>	<b>Nivel freático (m)</b>	<b>Nivel freático (m s.n.m.)</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
<b>2018</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	20,5	1851,5	23,9
	<b>OCTUBRE</b>	20,85	1851,15	70,5
	<b>NOVIEMBRE</b>	19,2	1852,8	99,6
	<b>DICIEMBRE</b>	18,94	1853,06	137,0
<b>2019</b>	<b>ENERO</b>	17,49	1854,51	126,8
	<b>FEBRERO</b>	16,9	1855,1	116,5
	<b>MARZO</b>	16,2	1855,8	58,3
	<b>ABRIL</b>	15,45	1856,55	68,0
	<b>MAYO</b>	15,5	1856,5	1,2
	<b>JUNIO</b>	15,55	1856,45	0,0
	<b>JULIO</b>	16,3	1855,7	18,0
	<b>AGOSTO</b>	18,3	1853,7	0,0
	<b>SEPTIEMBRE</b>	20,09	1851,91	0,0
	<b>OCTUBRE</b>	21,85	1850,15	50,3
	<b>NOVIEMBRE</b>	20,65	1851,35	62,2
	<b>DICIEMBRE</b>	18,4	1853,6	63,4

Fuente: Elaboración propia.

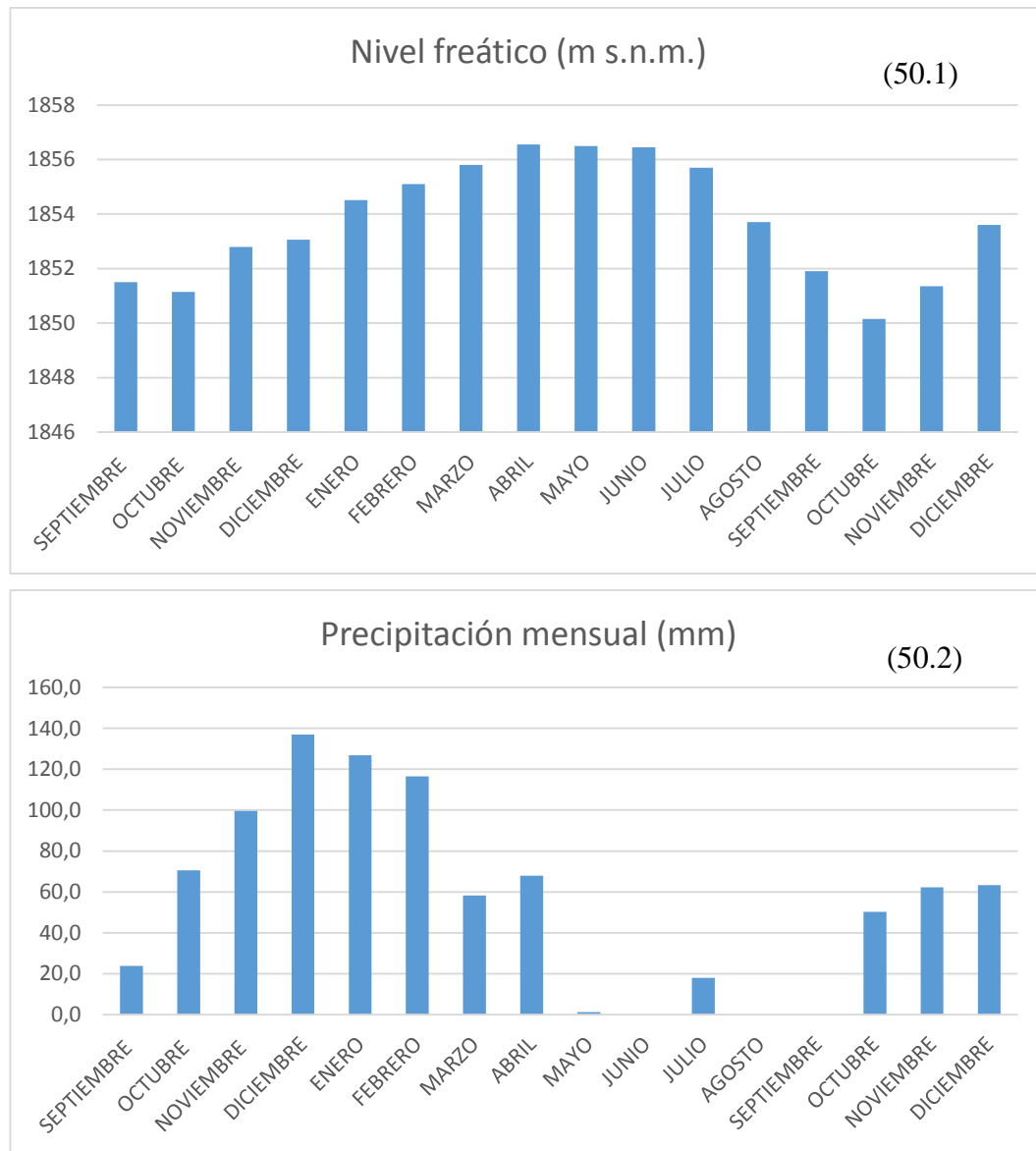


Figura 50. Hidrograma de nivel freático y precipitación (pozo STADIUM PN).  
Fuente: Elaboración propia.

**Nivel freático máximo mensual:**

El nivel freático máximo mensual del hidrograma (figura 50.1) se encuentra en el mes de abril de 2019 con una cota de 1856,55 m s.n.m.

**Nivel freático mínimo mensual:**

El nivel freático mínimo mensual del hidrograma (figura 50.1) se encuentra en el mes de octubre de 2019 con una cota de 1850,15 m s.n.m.

**Precipitación máxima mensual:**

La precipitación máxima mensual del periodo de estudio se encuentra en el mes de diciembre de 2018 con una altura de 137 mm (figura 50.2).

**Diagnóstico general:**

Le nivel freático asciende en el mes de noviembre de 2018 hasta llegar a su pico en el mes de abril de 2019 manteniéndose hasta junio de 2019, posteriormente desciende su nivel hasta el mes de octubre de 2019 y volviendo a ascender en noviembre de 2019.

El ciclo hidrológico comienza en octubre presentando una precipitación máxima en el mes de diciembre de 2018, el acuífero comienza a recargarse un mes antes en noviembre de 2018 por las precipitaciones de octubre y septiembre de 2018.

Examinando la variación del nivel freático determinamos que existe una debida recuperación de agua subterránea en este acuífero por el comportamiento similar en ambos años.

Observamos que el acuífero es semiconfinado debido a que su recarga por parte de la precipitación no es directa y basándonos en antecedentes de investigaciones anteriores confirmamos que el comportamiento del acuífero no sería de tipo libre o común.

Se comporta de manera similar al pozo “STADIUM” debido a que se encuentran a una distancia cercana.

## 5.1. Conclusiones

- Se cumplió la hipótesis realizando el diagnóstico del comportamiento del nivel freático evaluando los mapas isofreáticos, zonificando el área de estudio de acuerdo a su variación anual del nivel freático y comparando los hidrogramas del nivel freático y la precipitación mensual.
- En una tabla se registró la función, el barrio de abastecimiento y la fecha de inicio de operación de los cuarenta pozos de la zona urbana de la ciudad de Tarija y se identificó que 5 pozos (Daniel Campos, Villa Busch, Stadium, Circunvalacion A y San Luis) no están en servicio para el abastecimiento del agua potable porque han concluido su vida útil, solo son utilizados para la observación del nivel freático.
- Se señaló la dirección del flujo en el mapa de isolíneas que se elaboró con una equidistancia de 10 m tomando en cuenta los datos mensuales del mes de abril hasta diciembre del 2019.
- La dirección del flujo de acuerdo a los mapas de isolíneas realizados en esta investigación señalan que la recarga en el área urbana de la ciudad de Tarija proviene principalmente de la cordillera de Sama.
- Al norte y al este de la zona urbana de Tarija se presentan los índices más altos de variación anual del nivel freático que están entre los valores de 1 a 3,5 m/año debido a que el acuífero es confinado y la recuperación de su nivel freático es lenta.
- En la zona central del área urbana de Tarija se presentan valores de variación anual del nivel freático de 0,5 a 1 m/año por cada año de operación debido a que el acuífero es semiconfinado y la recuperación de su nivel freático es lenta.
- Al sur y al norte de la zona urbana de Tarija se presentan índices de variación anual del nivel freático menores a 0,5 m/año debido a que el acuífero es libre y la recuperación de su nivel freático es rápida.

- Los pozos Guadalquivir II y Circunvalación “B” donde el acuífero es libre han tenido un aumento de nivel freático de 1,40 m/año y 0,30 m/año respectivamente debido a una recuperación rápida del nivel freático de estos pozos.
- De acuerdo a la comparación del hidrograma del nivel freático de los ocho pozos (Daniel Campos, Villa Busch, Stadium, Stadium Pn, Circunvalacion A, Circunvalacion B, Narciso Campero y San Luis) con el hidrograma de la precipitación mensual de la estación Aeropuerto de Tarija se observa que los niveles descienden al inicio del ciclo hidrológico en el mes de octubre y posteriormente al final de la época de lluvias los pozos obtienen su máximo nivel freático en el mes de abril.
- En el pozo Daniel Campos se observa un descenso brusco del nivel freático de 2 m en el mes de junio de 2019 debido al funcionamiento de la red de abastecimiento de agua subterránea que se encuentra en operación en esta época de estiaje donde el agua superficial no abastece la demanda y la recuperación del nivel freático es lenta porque el acuífero es de tipo semiconfinado.
- En el pozo Villa Busch se observa un descenso brusco del nivel freático de 1,32 m en el mes de mayo de 2019 debido al funcionamiento de la red de abastecimiento de agua subterránea que se encuentra en operación en esta época de estiaje donde el agua superficial no abastece la demanda y la recuperación del nivel freático es lenta porque el acuífero es de tipo semiconfinado.

## 5.2. Recomendaciones

- Continuar con el monitoreo permanente de los pozos de observación para obtener un registro de datos completo y constante de los niveles freáticos estáticos en toda la red que maneja COSAALT, para así llegar a una mayor precisión en el comportamiento de los recursos del agua subterránea.
- Implementar nuevos puntos de monitoreo para mejorar el registro de datos, pozos perforados solo de observación, así se podrá realizar un mejor control del nivel freático estático, COSAALT cuenta con 5 pozos destinados solo a la observación en el área urbana de la ciudad de Tarija.
- Preservar y cuidar la cordillera de Sama debido a que la recarga del agua subterránea proviene de esa zona como se refleja en la dirección del flujo del mapa de isolíneas, con este fin se podrá garantizar una debida recuperación del nivel freático en los pozos que conforman la red de abastecimiento del área urbana de la ciudad de Tarija.
- Tomar en cuenta el mapa de isolíneas que representa la dirección del flujo y altura de los niveles estáticos para identificar la ubicación nuevos puntos para la explotación del agua subterránea.
- Considerar la delimitación representada en la zonificación del área urbana de la ciudad de Tarija (figura 42), para la implementación de nuevos pozos de operación.
- Crear conciencia en la población mediante planes de cuidado y preservación del agua potable para racionar el consumo y evitar el mal uso en los meses de octubre, noviembre y diciembre donde se presentan bajos niveles freáticos, como se observa en los hidrogramas presentados en este trabajo de los pozos que maneja COSAALT.

- Se debe realizar un control minucioso de los niveles freáticos debido a que las variaciones indican que la recuperación del nivel freático es lenta en los acuíferos confinados y semiconfinados.
- Controlar la explotación de agua subterránea en el valle central de Tarija implementando una normativa que regule la perforación de pozos y sancione la operación de pozos clandestinos.