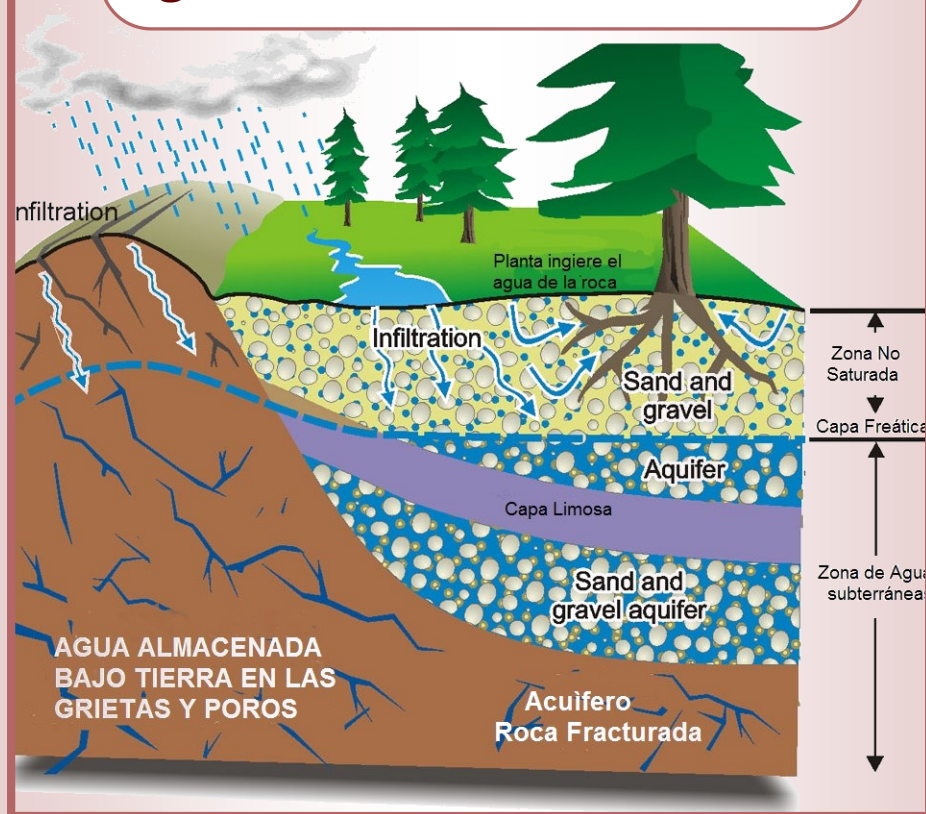




Sociedad Geográfica de Lima

Aguas Subterráneas—Acuíferos



CARTILLA TÉCNICA

**“Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y
la Gestión Integral de Recurso Hídrico”**

LIMA - PERÚ

2011

CARTILLA TÉCNICA: AGUAS SUBTERRÁNEAS - ACUÍFEROS

**Juan Julio Ordoñez Gálvez
SENAMHI**



Sociedad Geográfica de Lima



CARTILLA TÉCNICA: AGUAS SUBTERRÁNEAS-ACUÍFEROS

Editado por : Sociedad Geográfica de Lima

Dirección : Jr. Puno 450 - Lima

Editor : Zaniel I. Novoa Goicochea

Coeditor : Foro Peruano para el Agua - GWP Perú

Autor : Dr. Juan Julio Ordoñez Gálvez

Edición : Primera

Diseño : Juan Julio Ordoñez Gálvez, Miriam Rocío Casaverde Riveros

ISBN: 978-9972-602-78-8

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2012-13240

Esta Carpeta s publicado con el apoyo de la Sociedad Geográfica de Lima

CONTENIDO

- I.- Introducción**
- II.- Objetivo**
- III.- Antecedentes**
- IV.- Materiales y métodos**
 - 4.1 Definiciones**
 - 4.2 Materiales**
 - 4.3 Metodología**
- V.- Cuestionario práctico**
- VI.- Bibliografía**

Aguas Subterráneas—Acuíferos

Herramienta básica de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico

I.- INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico, a nivel nacional, está siendo altamente afectado por la presión humana, agravando cada vez más su disponibilidad (cantidad y calidad). Estos factores de presión son fundamentalmente la sobreexplotación de acuíferos, el vertimiento de sustancias contaminantes a los cuerpos de agua, los cambios en el uso del suelo tales como la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, el incremento de urbanizaciones en zonas de producción hídrica, entre otros.

Este decrecimiento en la disponibilidad hídrica aunando a un alto índice de crecimiento poblacional, generan conflictos los cuales están incrementando y que tienden a agravarse; si no se toman las medidas necesarias, como la regulación del uso del agua a través de mecanismos de planificación normativas y leyes que permitan su protección y su distribución en forma racional, que se refleja también en la sobreexplotación del recurso agua del subsuelo.

En ese sentido, es necesario conocer como es que se genera el agua subterránea en el subsuelo; por que es tan importante como reserva de agua dulce; si existe algún misterio en su origen magmático o profundo; o si es considerado más que una fase o etapa del ciclo del agua. A veces se olvida esta obviedad y se explotan las aguas de una región como si nada tuvieran que ver con las precipitaciones o la escorrentía superficial con resultados indeseables.

La GWP - Perú, con el apoyo de algunas de sus instituciones miembros presentan este documento técnico con información básica referente a las aguas subterráneas y los acuíferos; y algunos aspectos que se contemplan dentro de la hidrología subterránea.

II.- OBJETIVO

Dar a conocer los aspectos conceptuales y metodológicos de la Hidrología Subterránea, así como lo referente a las aguas subterráneas y acuíferos que desempeñan un papel estratégico, cada vez más importante para el desarrollo sostenible y la seguridad medioambiental.

III.- ANTECEDENTES

El ciclo del agua en la tierra o ciclo hidrológico, es la circulación continua del agua en sus diferentes estados en el planeta. No tiene principio ni fin, pero el concepto de ciclo hidrológico suele describirse normalmente comenzando desde los océanos porque éstos constituyen de lejos la fuente principal del agua en circulación.

La radiación solar evapora el agua de los océanos y en la atmósfera el vapor de agua asciende formando las nubes. Bajo ciertas condiciones, la humedad de éstas se condensa y cae a la superficie como lluvia, granizo o nieve, las diferentes formas de precipitación.

La precipitación que cae en tierra es el origen de prácticamente toda el agua dulce. Parte de esta precipitación, después de mojar las hojas y el suelo, corre por la superficie terrestre a los cursos de agua constituyendo el escurrimiento superficial y otra se infiltra en el suelo. Mucha de esta última es retenida en la zona de las raíces de las plantas y parte de ella vuelve a la atmósfera por la evapotranspiración. El excedente percola de la zona de raíces hacia abajo por la fuerza de gravedad y continúa su descenso hasta ingresar a un reservorio de agua subterránea.

El agua subterránea fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración y puede volver a surgir naturalmente como manantiales y caudal de base de los ríos. La mayoría de estos devuelve el agua a los mares o la lleva a cuencas cerradas donde se evapora.

De esta manera, el agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento en los continentes. Éstas están almacenadas en acuíferos, ubicados a diferentes niveles de profundidad, hasta sistemas confinados que están a varios kilómetros por debajo de la superficie. Se pueden encontrar aguas subterráneas en casi cualquier parte, trátase de zonas húmedas, áridas o semiáridas. El agua del subsuelo es un recurso importante, pero de difícil gestión, por su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación.

IV.- MATERIALES Y METODOS

4.1 Definiciones

Dentro de los términos que generalmente se utilizan, para definir e identificar los componentes que identifican las características de una cuenca tenemos:

- **Ciclo Hidrológico**

El ciclo hidrológico (Figura 1) es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación.

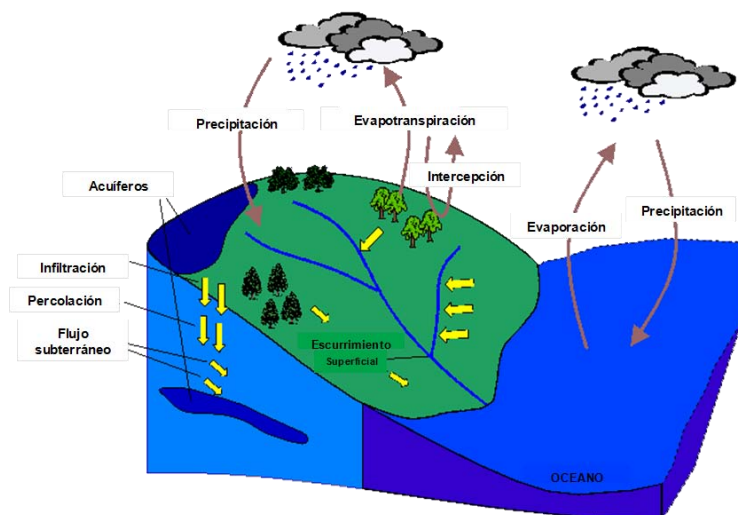


Figura 1. Representación del Ciclo Hidrológico
Fuente: Musy, André, 2001

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).

Chereque, 1989, se entiende como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso) como en su forma (superficial, sub-superficial, subterránea, etc.).

• Sistema hidrológico

Guevara y Cartaya, 1991: los fenómenos hidrológicos son muy complejos, por lo que nunca pueden ser totalmente conocidos. Sin embargo, a falta de una concepción perfecta, se pueden representar de una manera simplificada mediante el concepto de sistema. (Figura 2)

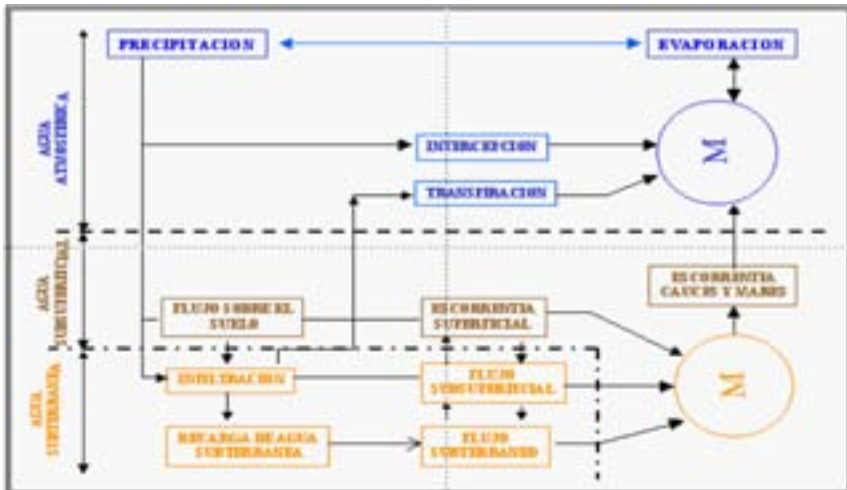


Figura 2. Representación del sistema hidrológico
Fuente: Estrela, 1992.

• Agua Subterránea

Es aquella parte del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Figura 3).

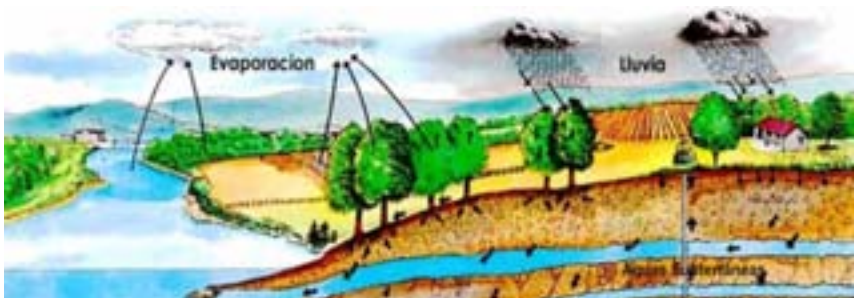


Figura 3. El agua subterránea como parte del ciclo hidrológico
Fuente: <http://www.madrimasd.org>, 2007.

• Acuífero

Un acuífero es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua. El agua subterránea que se halla almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico. Se han realizado estudios que permiten calcular que aproximadamente el 30 por ciento del caudal de superficie proviene de fuentes de agua subterránea (Figura 4).



Figura 4. Acuífero

Fuente: www.oldsaybrookct.org/Pages/OldSaybrookCT_APA/index

Los acuíferos los podemos clasificar en:

- ♦ **Acuíferos libres.** Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros. (Figura 5)
- ♦ **Acuíferos confinados.** Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos. (Figura 5)
- ♦ **Acuíferos semiconfinados.** Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua.

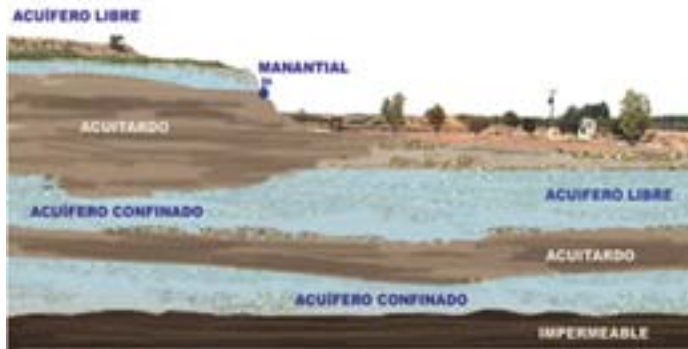


Figura 5. Tipos de acuíferos

Fuente: www.marm.es/sia/visualizacion/lda/fisico/hidrogeologia_acuiferos.jsp

- **Hidrogeología**

Estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en las zonas saturada y no 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.

- **Permeabilidad**

La permeabilidad de un material es la capacidad que este tiene de transmitir un fluido, en este caso agua. Un material será más permeable cuando sea poroso y estos poros sean de gran tamaño y estén conectados.

- **Poros**

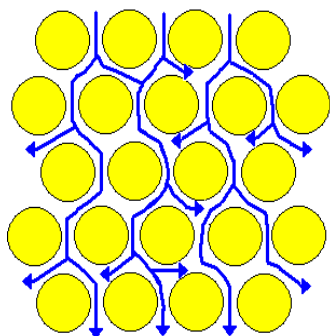
Se refiere a los espacios abiertos en los diferentes tipos de rocas:

En las Rocas Duras: Los espacios corresponden a fracturas, diaclasas, planos de estratificación y cavidades producto de la disolución. Estos espacios no tienen una distribución uniforme y se consideran como fenómenos localizados. Este tipo de porosidad se denomina “porosidad secundaria”

En las Rocas Blandas los poros están presentes entre los granos individuales y los minerales. La distribución de éstos poros es mucho mas homogénea que en las rocas consolidadas. Este tipo de porosidad se denomina Porosidad Primaria o Porosidad Intergranular.

- **Porosidad**

La porosidad de un material representa un porcentaje que relaciona el



volumen que ocupan los poros en un volumen unitario de roca; esto es si la porosidad es del 50 % significa que la mitad de la roca está constituida por poros y la otra mitad por partículas sólidas.

En la **Figura 6**, se representa a las partículas del suelo (círculos amarillos) y subterráneas (azul flechas). Es de esta manera como llega el agua superficial hacer parte del agua subterránea, que se almacena en suelo y forman los acuíferos.

Figura 6. Representación de los poros en le suelo.

Fuente: www.deh.enr.state.nc.us/osww_new/new1/images/wells/basic_groundwater_flow.pdf

• Pozo

Un pozo es un agujero, excavación o túnel vertical que perfora la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar lo que se busca, sea una reserva de agua subterránea del nivel freático o fluidos como el petróleo. Generalmente de forma cilíndrica, se suele tomar la precaución de asegurar sus paredes con ladrillo, piedra, cemento o madera, para evitar su deterioro y derrumbe (**Figura 7**).

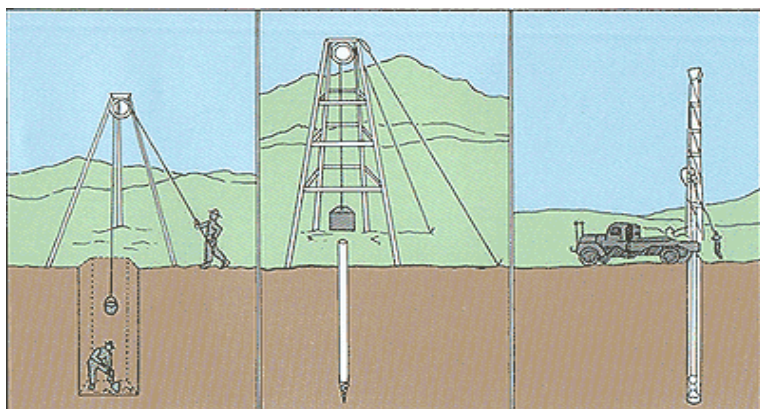


Figura 7. Construcción de un Pozo (excavación, propulsión, perforación)

Fuente: <http://water.usgs.gov>

• Unidad hidrogeológica

Es un conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico conviene considerar conjuntamente. Dentro de la unidad

podrá haber uno o varios acuíferos y quizás acuitardos o acuíclados entre ellos. Se consideran una unidad porque están conectados de modo que su funcionamiento (entradas, salidas, balance) hay que estudiarlo de un modo conjunto.

Esta agrupación de formaciones es relativamente subjetiva, depende de la escala y de los objetivos del trabajo. Una unidad puede subdividirse en unidades menores.

4.2 Aspectos conceptuales

Los conceptos de acuífero y de agua subterráneas pueden variar según se trate de sistemas en estado natural o de sistemas en explotación, de forma que se suele aceptar una definición más amplia en el caso de unidades no explotadas que cuando se ponen por medio intereses económicos, sin embargo la lógica parece indicar que dicha definición ha de ser independiente del uso del recurso.

Al margen de las consideraciones apuntadas anteriormente y, como punto de partida para el tema que vamos abordar, las diferentes formaciones geológicas se pueden clasificar en su función de su capacidad para almacenar y transmitir agua, existen otros tipos de acuíferos desde el punto de vista hidráulico, que abordaremos en esta sección:

a) Características de los Acuíferos

La propiedad de los acuíferos de contener agua, está gobernada por varios factores: Porosidad, Permeabilidad, Transmisibilidad Específica y Coeficiente de Almacenamiento.

Conocer estas características permite evaluar la magnitud del recurso y su aprovechamiento racional sin peligro a agotarlo (Arocha, 1980).

• Porosidad (n)

Como las rocas no son completamente sólidas (poseen grietas o espacios intergranulares), y al conjunto de estas aberturas o intersticios se le llama porosidad. La porosidad no define la existencia del acuífero, sino que además se requiere de estos estén interconectados; característica que se ve afectada por los factores siguientes:

Grado de comparación del material, forma y arreglo de las partículas y su gradación, las cuales son independientes del tamaño de las mismas. El valor de “n”, varía de 0 a 50%, dependiendo de los factores mencionados.

• **Permeabilidad (K)**

Es la propiedad de las rocas de permitir o no el flujo del agua; es decir, un estrato geológico siendo poroso puede contener agua, pero si los espacios vacíos no se interconectan, el agua no circula.

Esta libertad de movimiento depende de: Tamaño y forma de las partículas, gradación del material y viscosidad del agua. El coeficiente de permeabilidad de un material, se define como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una sección de acuífero de área unitaria (1 m^2), cuando el gradiente hidráulico es unitario y la temperatura este en promedio de 15°C .

La Permeabilidad tiene dimensiones de velocidad m/día ó $\text{m}^3/\text{día}/\text{m}^2$ (Arocha, 1980).

Para su determinación, en forma practica, se indica a continuación los materiales y procedimientos siguientes:

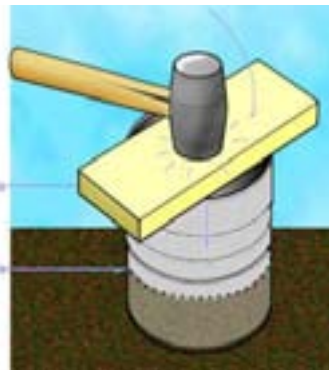
- Una lata con capacidad de 1,5 litros o más, sin tapa ni base
- Un martillo
- Una tabla de madera
- Una regla
- Un balde, un frasco o una botella para colocar de 1 a 2 litros de agua
- Un reloj
- Un trozo de 10 cm de cinta adhesiva o cinta aisladora
- Un lápiz y papel o una computadora portátil para anotar tus observaciones y los resultados.

Con estos materiales e procede a realizar la prueba para la determinación dela permeabilidad de la manera siguiente:

- Primero describir la zona, donde se realizara a prueba, teniendo en consideración: La ubicación (si es una pradera, rívera de un río y otras), la cobertura vegetal existente en la zona (pastos, musgos, hojas secas y otras) y la condición del suelo (seco, húmedo, arenoso, granulado, suelto, arcilla dura y otras).

Figura 8 Fase 1 de la prueba

Fuente: www.planetseed.com/es/node/19975



- Colocar la lata en el suelo y luego encima de la misma, poner el trozo de madera, con el fin de procede a golpear con un martillo para la lata se hunda en le suelo entre unos 5 a 10 centímetros (**Figura 8**).
- Colocar un trozo de cinta en la parte interna de la lata, cerca del borde superior, en forma paralela (**Figura 8**).
- Medir la distancia que existe entre la parte inferior de la cinta hasta el suelo y anótala.
- Vierta el agua dentro de la lata hasta que llegue al borde inferior de la cinta, que se encuentra ubicada en el interior del recipiente. (**Figura 9**).
- Proceda a registrar el tiempo, que demora el agua en ingresar al suelo, en forma tabular que permita tener los pares de valores de las variables tiempo y distancia.

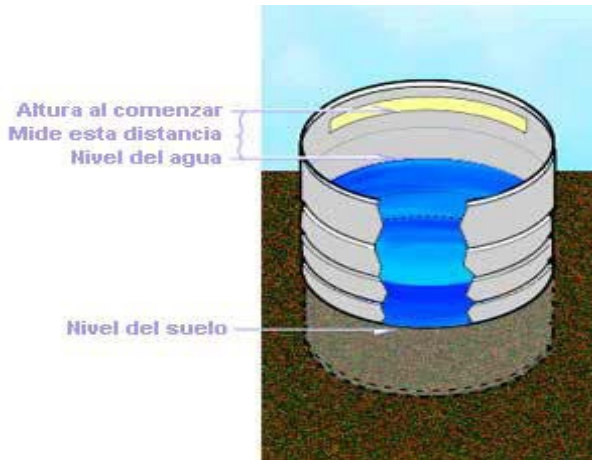


Figura 9. Prueba de permeabilidad

Fuente: www.planetseed.com/es/node/19975

- Si el agua es absorbida durante el curso del experimento, llena la lata nuevamente de inmediato hasta la marca de la cinta. Las mediciones que hagas a partir de este momento deberán anotarse como la distancia total desde el suelo hasta la cinta más la distancia que hay desde el nivel del agua hasta la cinta.
- Si tienes que llenar nuevamente la lata, asegúrate de agregar la distancia que hay desde el suelo a la cinta en tus mediciones nuevamente.
- Divide la cantidad de agua absorbida en una hora por 60 para obtener la permeabilidad en centímetros por minuto en una hora.
- Divide la cantidad de agua absorbida en 30 minutos por 30 para obtener la permeabilidad en centímetros por minuto para la primera media hora. ¿Es la misma velocidad que para una hora completa?.

• **Transmisibilidad o Transmisividad (T)**

Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, definiéndose como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario, extendida en todo el espesor saturado, cuando el gradiente hidráulico es unitario y a una temperatura de 15°C (Arocha 1980).

La transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero:

$$T = b * K \quad (1)$$

Donde:

- T —> Transmisividad (L²/T),
- b —> Espesor saturado del acuífero (L)
- K —> Conductividad hidráulica (L/T).

Para un acuífero compuesto de muchos estratos la transmisividad total es la suma de las transmisividades de cada estrato:

$$T = \sum T_i \quad (2)$$

Donde:

- n —> Número total de estratos y
- T_i —> Transmisividad del estrato i .

La transmisividad de un acuífero es un concepto que asume que flujo a través de él es horizontal. En algunos casos este supuesto es válido, pero en otros no. También nos indica la posibilidad que ofrece un acuífero de cara a su explotación.

Su determinación, a veces puede hallarse mediante prueba de bombeo; así como también, deducirla conociendo los valores de b y K (Figura 10).

Figura 10. Prueba de bombeo
Fuente: www.estudioshidrologicos.com



- **Coeficiente de Almacenamiento (S)**

Es adimensional. Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión) (**Figura 11**). Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico.

En acuíferos confinados los valores típicos se encuentran entre 0.00005 y 0.005, mucho menores que la porosidad eficaz de un acuífero libre (ver abajo). Esto se debe a que en un acuífero confinado el agua no es liberada por el drenaje de los intersticios sino por la compresión del acuífero, en particular de las capas de arcillas y limos intercaladas, (por eso también denominado coeficiente de almacenamiento elástico), y todo el material acuífero permanece saturado.

En un acuífero libre: $S = 0.05 - 0.03$

En acuíferos confinados: $S = 10^{-3} - 10^{-5}$

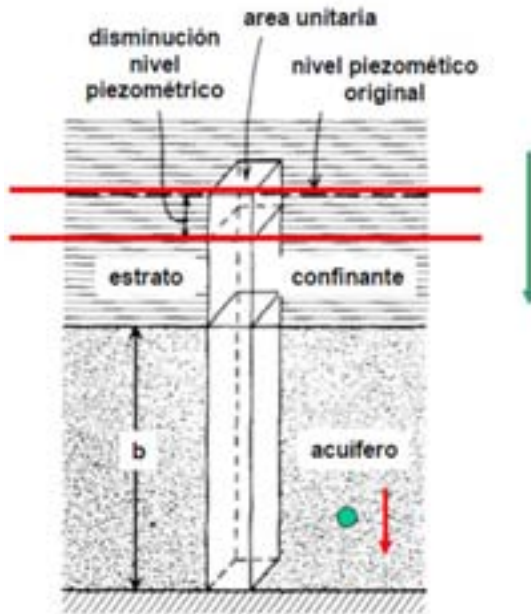


Figura 11. Coeficiente de Almacenamiento
Fuente: www.fcfm.cl

4.3 Aspectos Metodológicos

Para la evaluación y caracterización de las aguas subterráneas, asociado a la explotación de las aguas contenidas en los acuíferos, se muestran los aspectos conceptuales siguientes:

a) Origen de las aguas subterráneas

Se llaman aguas subterráneas a las existentes entre los intersticios del terreno, bajo su superficie. La aparente falta de regularidad en la aparición de afloramientos de aguas subterráneas y la dificultad de su previsión, unido a la enorme importancia que en algunas regiones ha representado su existencia para la vida de los pueblos, han dado siempre un carácter curiosamente misterioso a los estudios que se les han dedicado desde la antigüedad más remota (Figura 12).

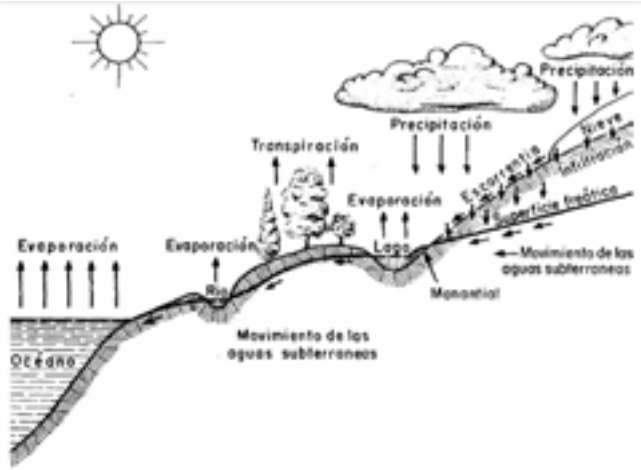


Figura 12. Ciclo Hidrológico

Fuente: Espinoza, 2004

El origen de las aguas subterráneas es uno de los problemas que más han preocupado al hombre desde los tiempos más remotos. La teoría de la infiltración, que supone que todas las aguas subterráneas provienen bien de infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirecta de ríos o lagos, no ha sido aceptada universalmente, sino desde tiempos relativamente recientes (Figura 13).



Figura 13. Flujo de agua subterránea

Fuente: www.wikipedia.com

Entre las teorías más conocidas están las siguientes:

- **Infiltración del agua marina**

Platón (427-347 a. de J.C.) habla de una gran caverna adonde vuelve el agua del océano a través de los conductos subterráneos, aunque no nos aclara mediante qué mecanismo. Aristóteles (384-322 a. de J.C.), aunque discípulo de Platón, modificó algo su teoría en el sentido de que en los pasajes subterráneos donde se infiltraba el agua del mar en la tierra se desprendía vapor de agua que contribuía a la mayor parte del agua de los manantiales. Esta parece ser una teoría intermedia entre la filtración del agua marina y la teoría de la condensación. Tales de Mileto (640-546 a. de J.C.) nos dice que el agua del mar era empujada por el viento, filtrada por la tierra, donde de nuevo emergía como agua dulce. Lucrecio (94?-55 a. de J.C.) habla del agua del mar infiltrándose en la tierra, donde deja su “amargor” o salinidad, saliendo al exterior en forma de manantiales.

- **Condensación del agua marina**

Un paso más en la teoría de Aristóteles y nos encontramos con que el agua de mar se evapora en grandes cavernas subterráneas, se condensa en su parte superior como agua dulce que sale a la superficie en forma de manantiales. Parece que incluso Descartes (1596-1650) y Nicolás Papín propugnaron esta idea. Es ingeniosa esta inversión del ciclo natural del agua, ya que explica a la vez la pérdida de salinidad del agua marina y el hecho de que las fuentes de agua dulce se encuentren a nivel superior al del mar.

- **Condensación del vapor de agua en el aire.**

Esta teoría propugna que el vapor de agua que contiene el aire se condensa en las rocas y da origen de nuevo a los manantiales. No cabe duda de que esta teoría es parcialmente correcta, aunque, en general, las cantidades de agua así condensadas son una minúscula parte de la aportación que reciben manantiales y pozos.

Como es bien sabido, en algunas zonas de la tierra, y un ejemplo de ello son algunas de las islas Canarias, prosperan cultivos de regadío con esta fuente de humedad en zonas de precipitación muy escasa o incluso nula.

- **Teoría de la infiltración de las precipitaciones.**

Ya los romanos empezaron a pensar que las precipitaciones en forma

de nieve y agua eran suficientes para alimentar los depósitos y manantiales de agua subterránea. Marco Vitrubio (15 a. de J.C.) comenzó a propugnar esta teoría y a entrever la existencia del ciclo hidrológico como se contempla actualmente. En cambio, Lucio Anneo Séneca (4 a. de J.C.-65 d. de J.C.) vuelve a la teoría aristotélica concluyendo que el agua de lluvia no es suficiente para alimentar las fuentes subterráneas.

La teoría de la infiltración es, desde el siglo XVI, la única firme y universalmente aceptada en la actualidad. Bernard Palissy (1509-1589), filósofo francés, parece ser el primero en establecer las teorías modernas sobre el origen de las aguas subterráneas (**Figura 14**).



Figura 14. Flujo de agua en le suelo

Fuente: www.geotecnia-sor.blogspot.com/2010/

La comprobación de la teoría mediante, por fin, medidas experimentales directas parece haber sido debida a Pierre Perrault (1608-1680) y Edmé Mariotte (1620-1684), que midieron la precipitación en la cuenca del Sena durante los años 1668 a 1670 y observaron que la escorrentía de la cuenca era solamente un sexto de la precipitación total, deduciendo, por tanto, que casi la totalidad del resto alimentaba los depósitos y fuentes subterráneos. (**Figura 15**) .



Figura 15. Perfil del suelo

Fuente: www.users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra/apuntes/unidad4.pdf

b) Alimentación de las napas subterráneas

- **Infiltración Natural**

La infiltración se produce en el terreno por la acción conjunta de dos fuerzas, a saber la gravedad y la atracción molecular, las que pueden actuar en un mismo sentido o bien en forma opuesta, según las circunstancias. La magnitud de la infiltración y por lo tanto de la alimentación de las napas subterráneas, se ve influenciada por dos tipos de condiciones; la Precipitaciones y las condiciones del terreno.

- **Infiltración de las Corrientes Superficiales**

Las corrientes se clasifican en general en dos categorías: corrientes influentes y corrientes efluentes. En las primeras, el nivel de las aguas superficiales está por encima de la superficie freática libre y el agua pasa desde la corriente superficial a la zona de saturación.

Por el contrario, una corriente se llama efluente si su nivel está por debajo del nivel freático y, por tanto, recibe aportaciones de agua subterránea de los mantos de la laderas.

- **Recarga Proveniente de Regadíos**

Es interesante considerar que por efecto de regadío aplicado a los terrenos de cultivo, se produce en ellos una infiltración de una cierta parte del agua aplicada que pasa a constituir una nueva fuente de alimentación para las napas subterráneas. Del total del agua que se aplica en riegos en una zona, una parte normalmente importante se gasta en lo que se designa como “consumo evapotranspirativo” o “tasa neta” (agua transpirada por la planta y retenida en su tejido durante su crecimiento, más la evaporada desde la superficie del terreno), otra parte escurre superficialmente mientras que el saldo resultante se infiltra hacia las capas del subsuelo constituyendo la recarga ya referida de las napas.

- **Alimentación Artificial**

Otro factor de recarga que en algunos casos puede aplicarse con éxito es la “recarga artificial”. Consiste esencialmente en facilitar la infiltración de agua superficial hacia el subsuelo en los lugares apropiados para el objeto.

c) Influencia de factores Meteorológicos sobre las Napas Subterráneas

Tres factores: la Temperatura, la Presión Atmosférica y las Mareas, pueden tener influencia sobre las napas subterráneas.

La temperatura puede hacer sentir su efecto sobre napas libres a través de la variación en el contenido de agua del suelo no saturado situado inmediatamente por encima de su nivel freático. Dado que las variaciones de la temperatura exterior se propagan muy lentamente al interior de los terrenos, este efecto prácticamente carece de importancia salvo en caso de estudios de muy larga duración. Cabe señalar por ejemplo que las oscilaciones diurnas de temperatura en general no se detectan más allá de 1 m de profundidad bajo la superficie del terreno.

Las variaciones de la presión atmosférica repercuten muy rápidamente sobre los niveles de agua que se encuentran en pozos y sondajes en napas artesianas.

Un aumento de la presión atmosférica produce los siguientes efectos sobre una napa confinada o artesiana:

- Se transmite en forma total y directamente sobre los espejos de agua que puedan existir en pozos y sondajes.*
- Se transmite, a través de la capa impermeable que limita superiormente la napa, a los materiales permeables que constituyen el acuífero y al agua contenida en él. Parte del aumento de presión es tomado por los materiales permeables y parte por el agua.*

La superposición de estos dos efectos hace bajar el nivel de agua que se observa en un pozo en una cantidad menor que el correspondiente aumento de presión debido a que si bien el agua contenida en el acuífero también aumenta de presión, lo hace en una cantidad menor.

El efecto de los cambios de presión no se hace sentir sobre napas libres debido a que ellas en todos sus puntos se encuentran sometidas a la presión atmosférica, no produciéndose por lo tanto movimientos diferenciales entre el agua contenida en el acuífero y la que se encuentra en pozos y sondajes.

Las mareas ejercen influencia sobre los niveles piezométricos de napas artesianas ubicadas próximas a la costa.

d) Ventajas de las captaciones subterráneas

Las principales ventajas de las captaciones de aguas subterráneas por pozos, según sus distintos tipos de uso, pueden resumirse en:

- **Utilización de agua potable**

- * *Exige pequeñas inversiones iniciales en comparación con las de plantas de filtros para tratamiento de aguas superficiales (gran importancia cuando los capitales son escasos).*
- * *Los problemas de abastecimiento en grandes ciudades pueden ir solucionándose paulatinamente junto con el crecimiento del consumo sin necesidad de abordar grandes soluciones para un futuro a largo plazo.*
- * *Las captaciones pueden ubicarse muy próximas al consumo con lo que se economiza en aducciones (**Figura 16**).*
- * *Por lo general no necesita tratamiento especial. Basta con una pequeña cloración antes de entregar al consumo.*
- * *Permite solucionar problemas de abastecimiento en forma muy rápida dado el corto tiempo que en general se requiere para la construcción de este tipo de obras.*
- * *En muchas zonas es el único recurso disponible.*

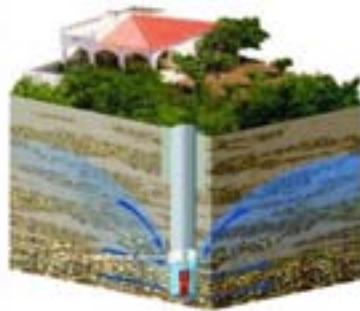


Figura 16. Captación Subterránea
Fuente: www.termodomo.com/

- **Utilización de industrias**

- * *Permite disponer de una fuente propia que la libera de depender, para la seguridad y suficiencia del abastecimiento, de otra fuente mucho más sujeta a variaciones con la red de agua potable (si existe).*
- * *Permite obtener agua de calidad para procesos industriales.*
- * *Permite ubicar la captación dentro del recinto de la misma industria.*
- * *Para muchas industrias resulta el único recurso económicamente disponible.*

- **Utilización en agricultura**

- * *Permite solucionar problemas locales de regadío sin tener que esperar para acogerse a las grandes soluciones propiciadas por el estado (Figura 17).*
- * *Las captaciones pueden ubicarse muy próximas al consumo sin que se requieran por lo tanto grandes obras tanto de aducción como de distribución interna.*
- * *Permiten disponer del agua justo en el momento que se requiera.*
- * *Utilizada como complemento de recursos superficiales existentes puede ser de gran valor, aún cuando sólo se haga funcionar eventualmente (incidencia fundamental sobre seguridad de riego).*
- * *Los recursos de agua subterránea se ven poco afectados por años secos individuales (gran capacidad de regulación).*
- * *Permite reducir las dotaciones por hectárea ya que se tienen menos pérdidas en la conducción y se hacen regadíos más cuidadosos. Estas economías de agua pueden ser del orden de 30%.*
- * *En muchas zonas constituye el único recurso económicamente disponible.*
- * *Constituye una posibilidad para los agricultores para aumentar individualmente sus recursos de agua ya que los recursos fáciles y económicamente utilizables en forma particular, están en su mayoría agotados.*



Figura 17. Agua subterránea para uso agrícola

Fuente: www.milagro.empleo.com.ec/perforaciones-de-pozos

e) Factores del movimiento de aguas subterráneas

Los factores del movimiento son porosidad, permeabilidad y filtración.

• Porosidad

Alude a la cantidad de espacios vacíos dentro de la masa rocosa; la arcilla y la arena son porosas, igualmente una arenisca mal cementada o una roca fracturada o con planos de disolución, porque hay volumen de espacios vacíos en el seno de la roca. (**Figura 18**)

• Permeabilidad

La permeabilidad alude a la capacidad que tiene un material de permitir que se establezca el flujo de aguas subterráneas -o cualquier fluido- a través suyo. Ello dependerá de la porosidad y de la conexión entre las aberturas e intersticios, y del tamaño y forma de tales conductos. En otras palabras la permeabilidad depende no sólo de la porosidad de la roca, sino del tamaño de los poros (**Figura 18**).

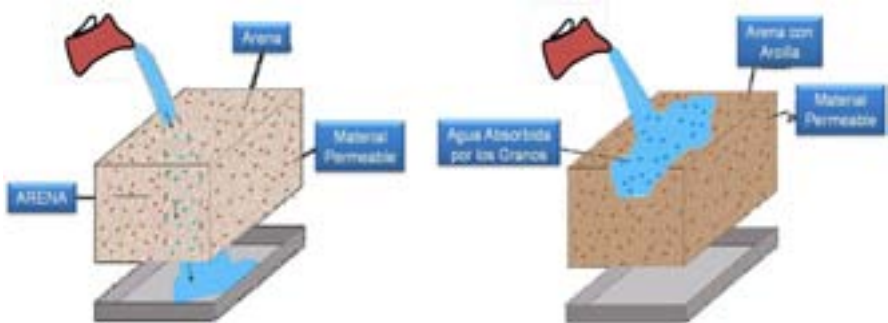


Figura 18. Porosidad y permeabilidad

Fuente: www.fcfm.cl

• Filtración

La filtración varía mucho, según la naturaleza del suelo, la vegetación y la estación.

Un suelo arenoso y desnudo puede absorber del 30 al 60 % del agua lluvia caída. El mismo terreno arenoso recubierto de vegetación, sólo deja filtrar un 10 %, exclusivamente durante el otoño y el invierno.

f) Movimiento de las aguas subterráneas

La dinámica del flujo en un medio poroso saturado se describe mediante la ley de Darcy. Esta ley fue obtenida por Darcy usando un aparato similar al mostrado en la **Figura. 19**. Allí, se tiene un flujo constante de agua a través de un medio poroso de longitud l , manteniendo constante el nivel de agua sobre el mismo. Darcy encontró que el volumen V de agua que atraviesa el sistema en un tiempo t , viene dado por:

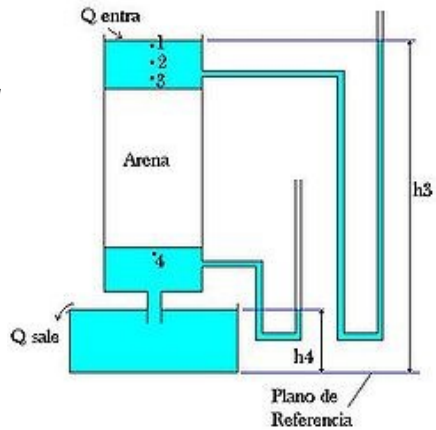


Figura 19. Ley de Darcy
Fuente: Wikipedia, 2012

$$V = K * A * \frac{(H5 - h4)}{l} * t \quad (I)$$

Donde:

- A → es el área de la sección transversal del medio poroso y
 K → Constante de proporcionalidad, denominada **conductividad hidráulica o permeabilidad**.

La velocidad promedio del flujo a través de la sección es entonces,

$$q = K * \frac{(H5 - h4)}{l} \quad (II)$$

Más generalmente, la ley de Darcy dice que la velocidad del flujo a través del medio poroso es directamente proporcional a la gradiente de **presión piezométrica o carga hidráulica** h :

$$q = -K * \frac{dh}{dl} = z + \frac{p}{\rho g} \quad (III)$$

Aquí, “ z ” es la altura del punto en cuestión (entrada, salida o cualquier punto intermedio en el medio poroso) respecto de un cierto nivel de referencia, p la presión hidrostática en dicho punto, ρ la densidad del agua y g la aceleración de la gravedad.

Finalmente, en la **Figura 20** se aprecia el esquema conceptual práctico de la aplicación de la Ley de Darcy.

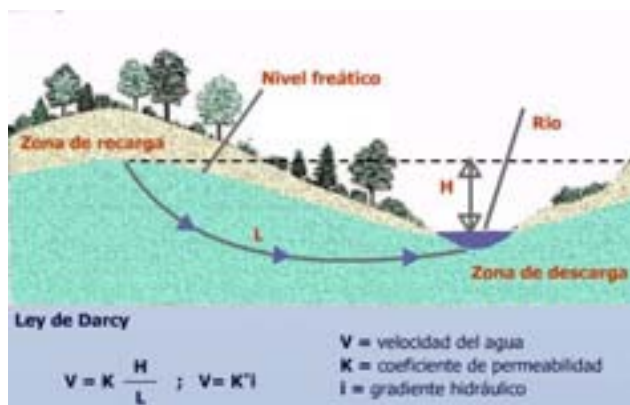


Figura 20. Ley de Darcy

Fuente: www.ucm.esw

El flujo natural del agua subterránea se puede esquematizar mediante redes de flujo. En la **Figura 21**, se muestra el esquema del flujo subterráneo teniendo en cuenta las características de un suelo homogéneo e isótropo.

En la **Figura 21**, se aprecia las características siguientes:

- Área de recarga, son aquellas en las que el flujo subterráneo presenta una componente vertical descendente,
- Área de descarga, el flujo subterráneo presenta una componente ascendente.

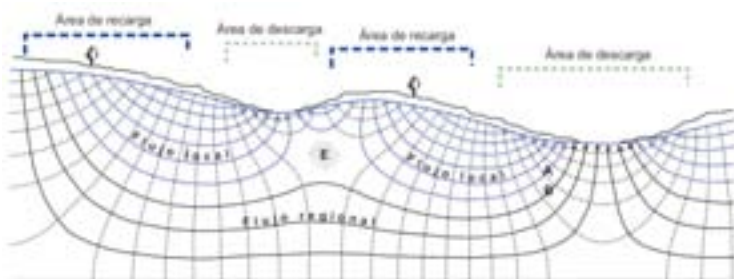


Figura 21. Redes de flujo de agua subterránea

Fuente: www.usal.es

4.4 Modelamiento hidrológico

Para la evaluación y caracterización de las aguas subterráneas, otra de las herramientas que se utiliza es el modelamiento hidrológico, que permite desarrollar simulación del comportamiento asociado a su explotación y manejo sostenible.

a) Modelamiento de acuíferos

Los modelos matemáticos de sistemas de aguas subterráneas son representaciones matemáticas de los mismos que incluyen asunciones y simplificaciones, por lo que la validez de sus resultados está directamente relacionada con la efectividad con la que el modelo representa dichos sistemas (California Environmental Protection Agency, 2002).

*En la **Figura 22**, se esquematizan los aspectos a considerar en la aplicación de un modelo, tanto en el proceso de diseño del software como en su aplicación para un propósito específico.*

Para el desarrollo del modelo requiere (California Environmental Protection Agency, 2002), se requiere seguir los pasos siguientes:

- *En primer lugar, analizar los procesos hidrogeológicos que afectan al flujo de agua subterránea y al transporte de contaminantes en la misma (**Figura 23**).*
- *En segundo lugar, hay que determinar qué leyes y formulaciones pueden representar matemáticamente un fenómeno hidrogeológico. Así expresiones generales como la Ley de Darcy para flujo laminar de agua subterránea o las leyes de Fick para transporte dispersivo y las funciones de Monod para transformación de contaminantes por biodegradación, permiten representar un área infinitesimal de un sistema dado bajo condiciones ideales.*

Estos modelos requieren asignar valores de los parámetros específicos para cada unidad geométrica (celda) requiriéndose una elevada cantidad de datos. Entre estos modelos tenemos:

◦ **Modelos analíticos**

Son apropiados para aproximaciones simplificadas a las ecuaciones diferenciales, para efectuar simulaciones de sistemas simples, sin complejidad espacial ni temporal. Estos modelos resuelven analíticamente las ecuaciones diferenciales para obtener ecuaciones simples para el flujo y el transporte de contaminantes, proporcionando soluciones exactas a las mismas para lo que requieren que se asuman diversas simplificaciones.

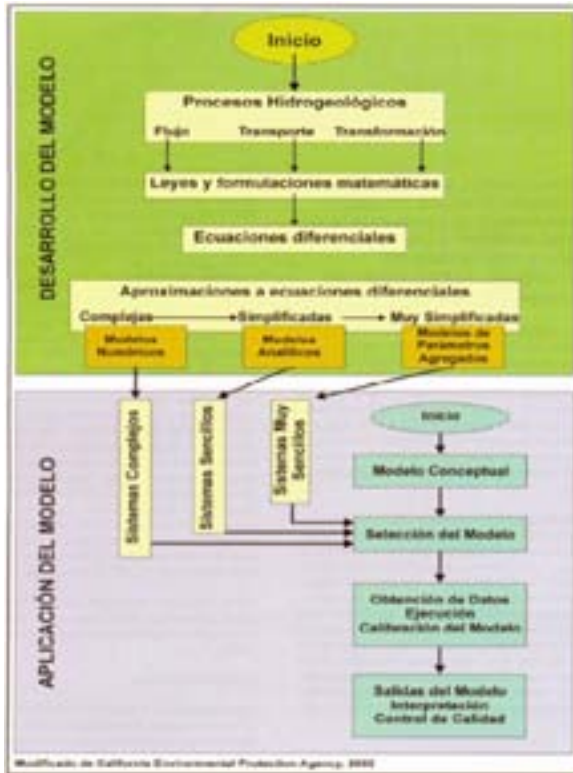


Figura 22. Esquema de Modelamiento de acuíferos.

Fuente: www.aguas.igme.es



Figura 23. Procesos hidro-Geológicos, que afectan a las aguas subterráneas.

Fuente: www.aguas.igme.es

◦ **Modelos de parámetros agregados:**

Consideran que el sistema a simular está compuesto por diversos elementos. Cada uno, incluyendo el agua subterránea existente en el mismo, se considera que es homogéneo e isótropo y puede simularse mediante una ecuación simple. Las variaciones temporales pueden simularse solamente entre compartimentos, no dentro de ellos.

*La aplicación del modelo a un sistema de agua subterránea específico (**Figura 24**) requiere, en primer lugar, desarrollar un modelo conceptual. La formulación de un modelo conceptual aceptable y realista es la etapa más importante en la aplicación de un modelo. Debe incluir, además de las simplificaciones del medio físico y condiciones de contorno, el objetivo del modelo y como alcanzarlo.*

La siguiente etapa consiste en seleccionar de los diferentes modelos existentes, públicos y comerciales (numéricos, analíticos o de parámetros agregados), cuyas principales características han sido descritas previamente, el que se ajuste mejor al modelo conceptual y complejidad del sistema en lugar de seleccionarlo en base a la disponibilidad de datos.

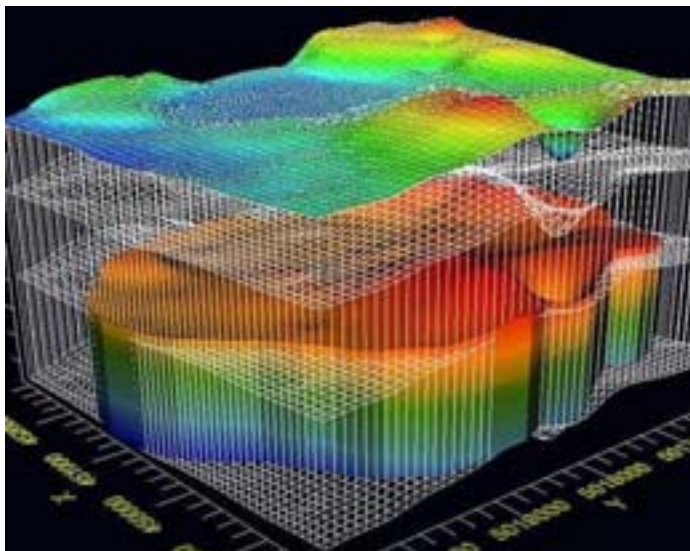


Figura 24. Modelamiento de acuífero con Mod-Flow

Fuente: www.taringa.net/posts/downloads/10465658/Visual-ModFlow-4_5.html

4.5 Explotación de las aguas subterráneas

El volumen mundial de las aguas subterráneas representa el 96% del agua dulce líquida del planeta. Las aguas subterráneas (AS) proporcionan útiles funciones y servicios a los seres humanos y al medio ambiente.

- 60% del agua extraída se utiliza para la agricultura en zonas de clima árido y semiárido
- 25-40% del agua potable del mundo proviene de las AS
- 50% de las megaciudades y cientos de otras ciudades importantes depender de manera significativa el uso de las AS

El AS es, a escala global, la fuente más importante de agua dulce para la sociedad, el AS es un recurso estratégico que puede conseguir "el alivio de la pobreza" y "la seguridad alimentaria", en especial en las zonas áridas y semiáridas.

Para el proceso de la explotación de las AS, se debe tener en consideración los aspectos siguientes.

- **Certeza de la existencia de un acuífero**

Profundidades: *se deben conocer las profundidades del techo y piso del acuífero. Resulta también importante conocer el espesor de los estratos confinantes.*

Tipo de acuífero: *situación (presencia de estratos confinantes, material que lo constituye, granulometría, estabilidad de las distintas formaciones, etc.).*

Calidad de agua: *del acuífero a explotar y de otros acuíferos supra o subyacentes que eventualmente deban aislarse.*

- **Parámetros hidráulicos del acuífero a explotar**

- **Transmisividad y coeficiente de almacenamiento.**

Resulta esencial conocer cuál será el rendimiento estimado del pozo en función de las características hidrogeológicas mencionadas. Un parámetro manejado a menudo por los perforistas es la capacidad específica que les permite estimar el descenso o depresión que sufrirá la perforación a partir del caudal requerido. Este descenso está limitado por varios factores y preferentemente debe evitarse que el cono de

depresión alcance a la unidad de filtrado o rejilla, para evitar que parte de la misma, al quedar descubierta, deje de actuar como superficie de aporte de agua a la captación.

- **Nivel piezométrico estático**

Permite estimar, conjuntamente con las consideraciones planteadas en el punto anterior el nivel dinámico, parámetro para definir la bomba y los diámetros de los entubados.

- **Dimensiones del pozo**

Se completa su definición a partir de los datos anteriores con (Figura 25):

- **Caudal + elevación: permiten la elección de la bomba**

El caudal y la altura manométrica total AMT (suma de la profundidad del nivel dinámico de bombeo más la elevación y las pérdidas de carga), permiten seleccionar la bomba. Sus dimensiones condicionan al pozo, al establecer un diámetro mínimo (y para algunas bombas un diámetro máximo también) de la tubería en cuyo interior se instalará la bomba.

- **Diámetro y longitud del filtro y diseño del prefiltro**

El filtro se define en función del caudal, pero también del espesor de la capa o manto del acuífero. En el filtro se dan dos fenómenos contrapuestos: por un lado la corrosión que tiende a aumentar el área libre, y por el otro la incrustación que disminuye el área libre o abierta.

- **Diámetro y longitud de ademe o camisa**

La longitud estará definida en, por el perfil litológico. En otros casos se establecerá en función del nivel dinámico de bombeo y la consecuente profundidad de instalación del equipo de bombeo.

Para establecer el diámetro interior habrá que tener en cuenta el tamaño de las tuberías que deban bajarse por su interior y el de la propia bomba.

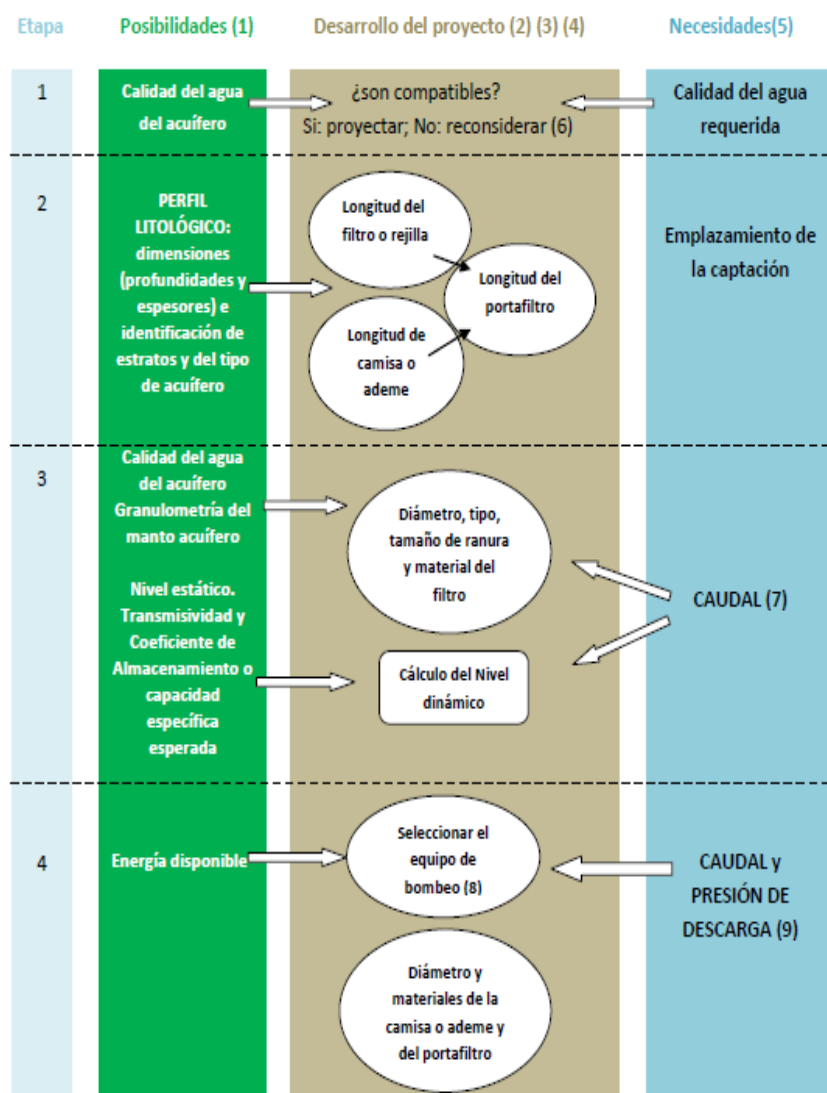


Figura 25. Esquema de diseño de Pozo
Fuente: Bellino, 2012.

En la **Figura 26**, se muestra el perfil de un pozo artesianos telescópico, con cada una de sus componentes principales a tener en consideración para su construcción y puesta en operación.

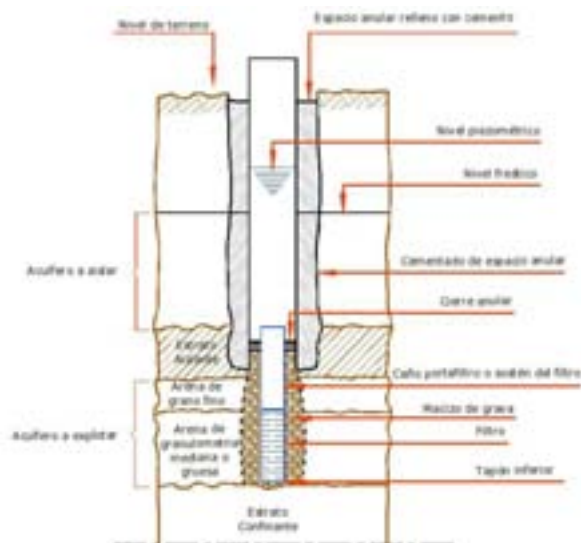


Figura 26. Perfil de un pozo artesiano
Fuente: Bellino, 2012

- **Como se definen las dimensiones del pozo**

Profundidad total del pozo: depende del perfil litológico del terreno (corte del terreno que permite la identificación de las diferentes rocas o estratos constitutivos) en el lugar de emplazamiento. Si está explotando un acuífero confinado o semiconfinado podrá alcanzar como máximo la profundidad del piso de ese acuífero o comienzo del estrato confinante inferior (**Figura 27**).

Entubado, ademe o encamisado: depende del perfil litológico del terreno. Si se desea explotar un acuífero confinado o semiconfinado que posee por encima otra acuífero que carezca de interés o bien deba aislarse en razón de la calidad inadecuada del agua que posee, deberá entubarse o encamisarse (con un tubo o ademe) la totalidad del mismo y gran parte del estrato aislante que exista entre ambos (**Figura 28**).

Diámetro y longitud del filtro: la longitud del filtro guarda relación con el tipo y granulometría del material que conforma el acuífero y con el caudal a extraer. Un factor importante que pesa a la hora de la decisión es el costo, ya que la rejilla suele ser el elemento comparativamente más costoso de los que componen el pozo, si se excluye el equipo de bombeo.

Selección de la abertura del filtro: el tamaño de la abertura de filtro se selecciona en función de la granulometría del material que compone el acuífero y en su caso, de la granulometría del filtro o prefiltro de grava o gravilla que eventualmente se emplee. En este último caso la rejilla debe contener al material artificialmente agregado y no al que constituye el acuífero.

Figura 27. Diseño de pozos de Agua
Fuente: Bellino, 2012.

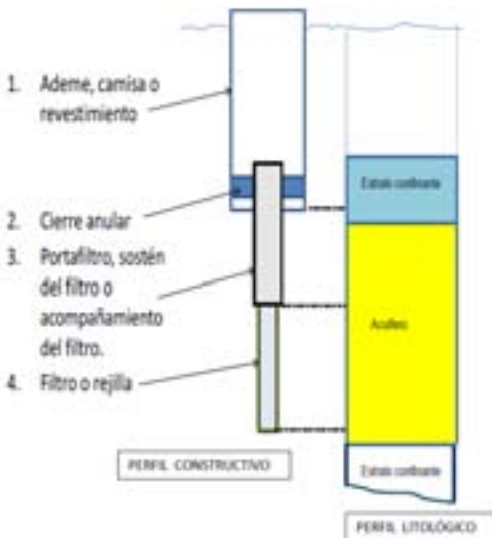
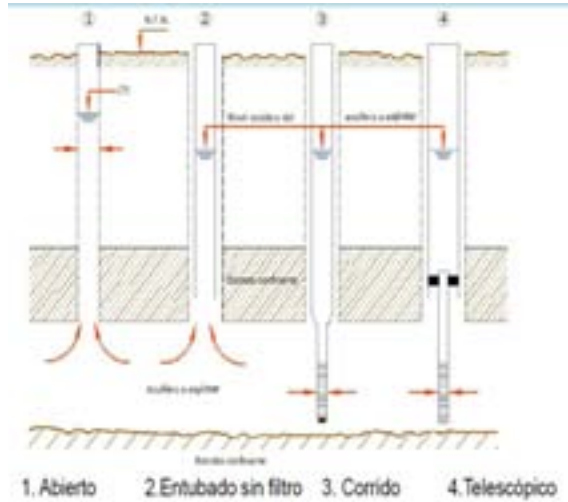


Figura 28. Diseño de pozos de Agua, consideraciones
Fuente: Bellino, 2012

- ***Ejemplo de un programa de evaluación de los acuíferos de una región***

1. Recopilación y evaluación de antecedentes

- 1.1 *Cartografía.*
- 1.2 *Información disponible sobre aspectos hidrogeológicos y de ingeniería sanitaria.*
- 1.3 *Fotografías aéreas e imágenes satelitales.*
- 1.4 *Información censal demográfica.*
- 1.5 *Información censal económica industrial.*
- 1.6 *Infraestructura urbana (obras hidráulicas, caminos, etc.).*

2. Relevamiento Hidrogeológico

- 2.1 *Estudio fotogeológico, determinación de la red de drenaje (natural y artificial).*
- 2.2 *Inventario hidrogeológico (censo de pozos con mediciones in situ y georeferenciación).*
- 2.3 *Identificación de captaciones principales (industriales, abastecimiento público, etc.).*
- 2.4 *Relevamiento geológico – geomorfológico (rasgos geológicos de superficie).*
- 2.5 *Caracterización de suelos por su permeabilidad y aptitud hídrica.*
- 2.6 *Selección de análisis de agua representativos o extracción y análisis de nuevas muestras de agua.*

3. Análisis Hidrogeológico e Hidroquímico

- 3.1 *Mapa de curvas piezométricas / freáticas.*
- 3.2 *Aplicación de modelos matemáticos para simulación de flujo.*
- 3.3 *Definición de las condiciones de flujo en el sistema acuífero.*
- 3.4 *Definición de las condiciones de borde en el sistema acuífero.*
- 3.5 *Tablas con los resultados analíticos de las muestras de agua.*
- 3.7 *Mapas de isosalinidad (conductividad o residuo seco).*

- 3.8 *Graficación de los resultados químicos.*
- 3.9 *Mapas hidrogeoquímicos (distribución de contenido iónico).*
- 3.10 *Mapa de anomalías en los contenidos químicos.*
- 3.11 *Identificación de zonas con probables contaminación-contaminaciones.*

4. Exploración del subsuelo

- 4.1 *Definición de la traza de perfiles geoeléctricos.*
- 4.2 *Mediciones de campo e interpretación de resultados.*
- 4.3 *Determinación de los puntos a perforar.*
- 4.4 *Metodología de sondeos de investigación (perforaciones con muestreo y perfilaje geofísico)..*
- 4.5 *Selección de pozos para ensayos de recuperación (proc. Según Theis).*
- 4.6 *Diseño tipo de la captación de producción.*
- 4.7 *Diseño de la batería de pozos.*
- 4.8 *Modalidad de explotación de la captación proyectada al caudal de diseño.*
- 4.9 *Modalidad de explotación de la batería de pozos y proyección de explotación continua.*

V.- CUESTIONARIO PRÁCTICO

¿Qué es la Hidrogeología?

- a) *Es el movimiento de las aguas subterráneas*
- b) *Ciencia que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su circulación, sus condicionamientos geológicos y su captación.*
- c) *Es la ciencia que se encarga de estudiar la hidráulica de los pozos.*
- d) *Ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas.*
- e) *N/A*

¿En que fase del ciclo hidrológico interviene el agua subterránea?

- a) *Precipitación*
- b) *Evaporación*
- c) *Condensación*
- d) *Escurrimiento*
- e) *N/A*

¿A que factores se debe el movimiento de las aguas subterráneas?

- a) *Al movimiento de rotación y traslación de la tierra.*
- b) *A la evaporación y transmisividad*
- c) *A la energía solar y la gravedad terrestre*
- d) *A la porosidad, permeabilidad y filtración*
- e) *N/A*

¿Qué es un acuífero?

- a) *Es una formación geológica.*
- b) *Un acuífero es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua.*
- c) *Herramienta para conocer el estado de permeabilidad de una roca.*
- d) *Es la disponibilidad de agua subterránea en circulación.*
- e) *N/A*

¿Cuáles son los tipos de acuíferos?

- a) *Acuífero y acuícludo*
- b) *Libre, semiconfinado y confinado*
- c) *Cerrado y abierto*
- d) *Colgado y confinado*
- e) *N/A*

¿Propiedad de un material de permitir el flujo del agua?

- a) *Condensación*
- b) *Transpiración*
- c) *Infiltración*
- d) *Permeabilidad*
- e) *Porosidad*

¿En que consiste la Porosidad?

- a) *Son las grietas y fisuras que presenta una roca.*
- b) *Es la capacidad del agua de poder filtrarse en los poros*
- c) *Es la evaporación través de las hojas de las plantas*
- d) *Es la relación (%) entre el volumen de huecos y el volumen total del terreno*
- e) *N/A*

¿De donde se originan las aguas subterráneas?

- a) *De la infiltración de las aguas superficiales y las superficiales.*
- b) *De la continua recarga de los regadíos.*
- c) *De la condensación del agua marina.*
- d) *a y b*
- e) *b y c*

¿A que se denomina napa freática o napa subterránea?

- a) *Límite entre agua superficial y agua subterránea*
- b) *Límite superior del acuífero.*
- c) *Lugar donde se encuentra un acuífero*
- d) *Profundidad donde se encuentra el agua subterránea*
- e) *N/A*

¿Qué factores presionan el uso del agua subterránea?

- a) *Sobreexplotación*
- b) *Contaminación*
- c) *Cambio Climático*
- d) *Deterioro de la calidad de agua*
- e) *Todas*

¿El límite inferior como el superior de un acuífero varían en función de las recargas por lluvias?

- a) *Solo el nivel freático varía en función de las recargas del acuífero.*
- b) *Solo varía el límite inferior.*
- c) *Ambos varían con las recargas de acuíferos.*
- d) *El límite inferior es fijo.*
- e) *No varían.*

¿El agua subterránea sale a la superficie por?

- a) *Grietas y fisuras*
- b) *Poros y Fallas*
- c) *Manantiales y pozos*
- d) *Fuentes y Grietas*
- e) *Poros y Pozos*

VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arocha R (1980) *Abastecimiento de agua (Teoría y Diseño)*. Editorial Vegas. Caracas, Venezuela. 284 pp.
- Arreola Muñoz, A. (s/f) *El Manejo integral de cuencas: limitaciones de una política sectorial para la gestión territorial del agua*. Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica, A.C. (IDESMAC).
- Bellino, Norberto O. *Aguas subterráneas. Conocimiento y explotación*. Instituto de Ingeniería Sanitaria. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.
- Bruijnzeel, L.A. (1990) *Hydrology of moist tropical Forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. UNESCO, IAHS, Free University Amsterdam, 224pp.
- Bruijnzeel, L.A. (1991) *Hydrological impacts of tropical forest conversion*. *Nature & Resources* 27 (2):36-45.
- Chereque W. (1989). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*. Pontifica Universidad Católica del Perú.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. "Hidrogeología Subterránea". Volumen II. Omega. Barcelona. España.
- Duque G., (1995) *Manual de Geología para Ingenieros*. Cap 18 Aguas Subterráneas, 399-424.
- Espinoza, C. (2004). *Apuntes de hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento*. Universidad de Chile. 18 pp.
- Estrela, T., 1992. *Metodología y Recomendaciones para la Evaluación de Recursos Hídricos*. Centro de Estudios Hidrográficos.- Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación, Madrid, España. 52 p.
- Guevara E. y Cartaa, H. 1991. *Hidrología. Una introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada*. GUECA EDICIONES. Valencia, Venezuela, 358 p
- Heras, R. (1983). *Recursos Hídricos Síntesis Metodología y Normas*. Edita Cooperativa de Publicaciones del colegio de Ingenieros de Caminos, canales y Puertos. Almagro, 42 –Madrid. 4361 p.
- Molinero, J. 2005. *Clase de Hidrogeología: Tipos de Acuíferos*. Maestría de las Américas en Ingeniería del Agua. Universidad de Santiago de Compostela

Rendón, Luis. 2003. *La cuenca: sistema hidrológico o curso de agua natural*. IM-TA. Documento electrónico.

Sánchez San Roman, J. (2001), *El agua en el suelo.. Apuntes editados por el Dpto. de Geología de la Universidad de Salamanca (España)*.
Web.usual.es/~javisan/hidro/temas/T040

Páginas Web:

<http://water.usgs.gov/gotita/earthgwwells.html>

www.fcfm.cl Modelación de aguas subterráneas

<http://www.madrimasd.org>, 2007 . El agua subterránea como parte del ciclo hidrológico

<http://water.usgs.gov> Construcción de un Pozo

www.planetseed.com/es/node/19975 Prueba de permeabilidad

www..estudioshidrologicos.com Prueba de Bombeo

www.fcfm.cl Coeficiente de Almacenamiento

www.wikipedia.com Flujo de agua subterránea

www.geotecnia-sor.blogspot.com/2010/ Flujo de agua en le suelo

www.users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra/apuntes/unidad4.pdf Perfil del suelo

www.termodomo.com/ Captación Subterránea

www.milagro.empleo.com.ec/perforaciones-de-pozos Agua subterránea para uso agrícola

www.wikipedia.com Ley de Darcy
www.ucm.esw

www.aguas.igme.es Esquema de Modelamiento de acuíferos
 Procesos hidrogeológicos, que afectan a las aguas subterráneas.

www.oldsaybrookct.org/Pages/OldSaybrookCT_APA/index Acuífero

www.marm.es/sia/visualizacion/lda/fisico/hidrogeologia_acuiferos.jsp Tipos de acuíferos

www.deh.enr.state.nc.us/osww_new/new1/images/wells/basic_groundwater_flow.pdf Representación de los poros en le suelo.

www.taringa.net/posts/downloads/10465658/Visual-ModFlow-4_5.html Modelamiento de acuífero con Modflow

Esta Cartilla se terminó de imprimir en el mes de
Setiembre 2012 en la imprenta IBEGRAF
Jr. Cangallo N° 217 Int. 5
Lima-Perú

CONSEJO DIRECTIVO

Juan Julio Ordoñez Gálvez
SENAMHI

Karen Kraft
Asociación Especializada para el Desarrollo Sostenible—AEDES

German Torre Villafane
Centro de Estudios Solidaridad - CESS SOLIDARIDAD

Elder Gustavo Palacios Salazar
Asociación de Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento - ANEPSSA

Marco Antonio Nuñez de del Prado Coll
Autoridad Nacional del Agua - ANA

Nicole Bernex Weiss
Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP



*Pozo para aprovechar los acuíferos en Nazca, Cultura Nazca, Perú.
Fuente: National Geographic ; marzo 2010 (Fotografía Robert Clark).*