

Formación Parángula - (Mioceno Temprano-Medio):

Referencia original de A. N. Mackenzie, 1937 y 1938. La localidad tipo se encuentra ubicada en la Quebrada Parángula, afluente del Río Santo Domingo, estado Barinas. En superficie, predominan los conglomerados lenticulares de grano grueso, de color gris a verdoso y pardo claro a blanco; areniscas de grano fino en capas masivas con estratificación cruzada, localmente glauconíticas; limonitas y lodolitas abigarradas en tonos rojos, morados, pardo rojizo y pardo claro. En el subsuelo, la litología es similar, pero con la ausencia de los conglomerados. El espesor de la formación en la sección tipo es de 550 m. Pierce (1960) nota que aumenta su espesor hacia el Sur y Oeste, estimando que llegue hasta 1400 m, e indica que se adelgaza rápidamente hacia el Noreste hasta los alrededores de Guanare. Von Der Osten (1966) reporta espesores de unos 850 m en el Campo Sinco, y Campos (1977) encontró espesores entre 800 m. y 1000 m. en la región de Calderas. Aguasuelos (*op. cit.*) midió un espesor de 1600 m. entre Barinitas y el Cerro de Paja.

En superficie, esta formación se conoce a lo largo del piedemonte Surandino desde el Río Portuguesa hasta las cercanías del Río Caparo. Está presente en los pozos más meridionales de la Cuenca de Barinas, llegando probablemente al límite Sureste de la cuenca (Figura II-10). Tanto en la superficie como en el subsuelo, Parángula es discordante, con angularidad en la mayoría de los afloramientos, sobre Pagüey y el Miembro Arauca. En Apure, la parte inferior de Parángula (Miembro Guardulio) descansa en discordancia paralela sobre el Miembro Arauca, y de igual forma por debajo de "Palmar" (Parángula superior). Pierce (1960) describe al contacto Parángula - Río Yuca como una discordancia angular en la mayoría de los ríos Surandinos. Solamente en el Río Canaguá, se presenta un contacto aparentemente normal y transicional, aunque Campos (1977) mencionó un contacto similar en la región de Calderas. En el Río Tucupido, la relación entre ambas formaciones es una discordancia angular, con solapamiento de Río Yuca sobre Parángula. En el subsuelo, el contacto Parángula - Río Yuca es normal y transicional.

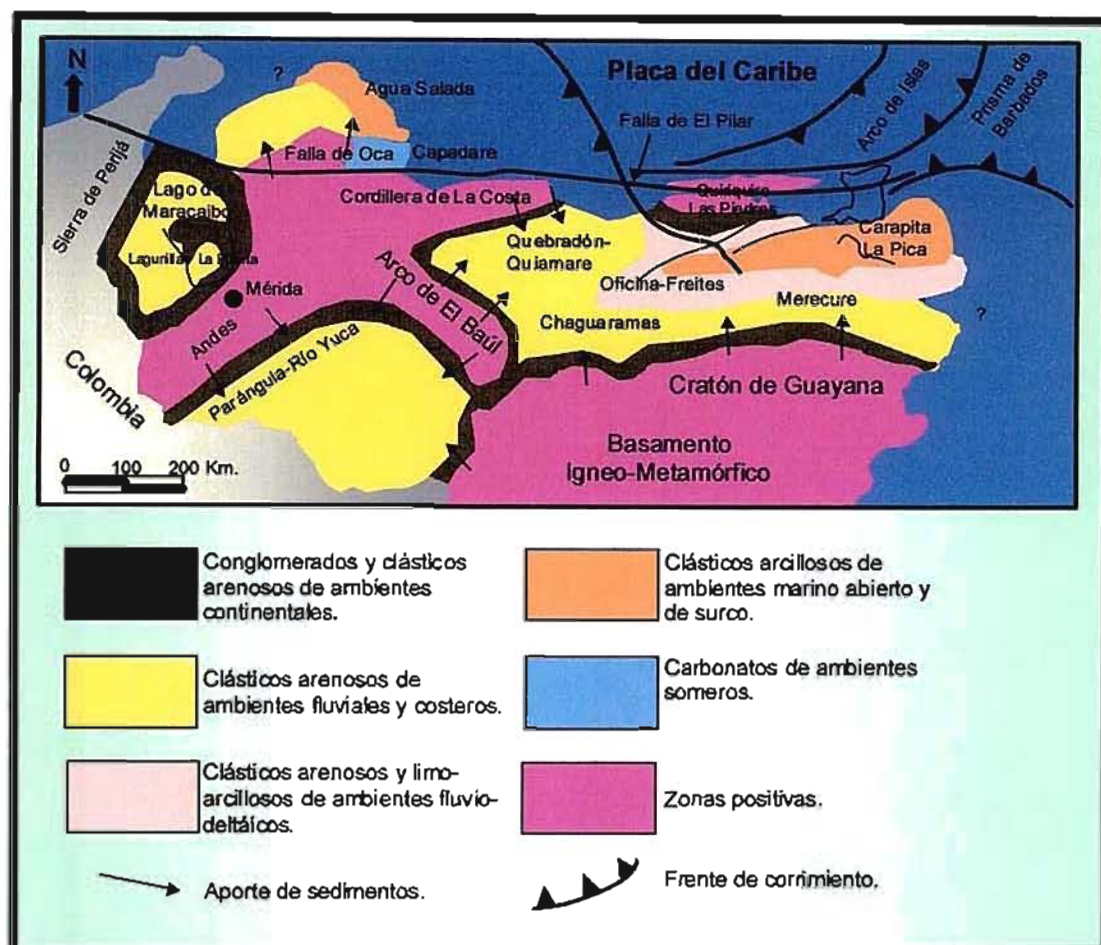


Figura II-10. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela (Cuencas de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental) durante el Mioceno-Plioceno. Las mayores acumulaciones de sedimentos se dan en los flancos de la Cadena Andina y la Cordillera de la Costa. Tomado del WEC, 1997.

La presencia en Parángula de abundantes microfósiles, retrabajados del Eoceno Medio, ha sido notada por varios autores (Pierce, 1960; Feo-Codecido; 1972; Campos, 1977). Como fósiles indígenas, Aguasuelos (1990) menciona a huesos de micromamalias, tortugas, quelonias y caimanos. Hunter (1972), en muestras del Terciario en el área de La Milla, de la ciudad de Mérida, identificó abundantes palinomorfos y dinoflagelados sin identificar.

Parángula conforma un típico depósito molásico que refleja la rápida acumulación de los detritos erosionados del levantamiento de Los Andes de Mérida y depositados en la anfiteatro adyacente. Representa un ciclo sedimentario transgresivo-regresivo sobre formaciones erosionadas del Eoceno Medio-Tardío y Oligoceno, que se inicia con un clástico basal y continua, en su parte inferior, con sedimentación de ambiente marino somero-salobre-continental y, en su parte superior, con sedimentos de ambiente netamente continental de corrientes fluviales entrelazadas y lacustre. Puede haber existido ambientes locales de pantano-manglar durante el período de transición al ambiente continental.

Formación Río Yuca - (Mioceno Tardío - Plioceno):

Nombre asignado por A. N. Mackenzie, 1937 y 1938, para describir una sección aflorante en el Río Yuca, cerca de la ciudad de Barinas, distrito Obispo del estado Barinas. Según este autor, la unidad consiste principalmente de conglomerados de grano grueso, areniscas macizas, con estratificación cruzada, de grano medio a grueso, localmente caoliniticas, blandas a duras, micáceas, arcillosas, de color típico verde grisáceo. Las arcillas son laminares, blandas, plásticas y micáceas, de color amarillento, gris claro y moteadas de rojo. En la parte media inferior se presentan colores azul-verdoso pálido y gris oscuro. Aguasuelos (1990) menciona intervalos arenáceos blandos de color gris, arenas de colores predominantemente verdes a verde azulados, arcillitas grises, arcillitas negras, arenas subconglomeradas y conglomerados de grano fino a grueso.

Mackenzie (*op. cit.*) estimó un espesor de unos 3000 m en la localidad tipo, que según Pierce (*op. cit.*), es de sólo 2300 m; en el subsuelo Von Der Osten (*op. cit.*) señaló un espesor promedio de 1200 m.

El contacto inferior con la Formación Parángula varía de discordante a concordante, de acuerdo al área. El contacto superior es una discordancia angular con rocas de la

Formación Guanapa o sedimentos recientes. En el subsuelo, no hay evidencia litológica ni estructural de discordancia con Parángula (Kiser, 1997).

Aguasuelos (*op. cit.*) identificó abundantes hongos, algas, esporas, polen y dinoflagelados que están obviamente retrabajados de varias formaciones más viejas. Además de estos, vieron hojas de *angiospermas*, el molar de un roedor y huesos de un mamífero grande. La Formación Río Yuca es una unidad de ambiente continental y constituye una molasa depositada, en su parte inferior, en un ambiente de marismas o lagunas costeras (Figura II-9); el resto de la formación se caracteriza por un ambiente continental de ríos meandrinicos y entrelazados de baja velocidad (Aguasuelos, *op. cit.*).

Cuaternario

El suelo de la vasta región de los Llanos venezolanos, está formada por depósitos aluviales recientes compuestos de arcilla, limos, arenas y gravas, discordantes por encima de rocas infrayacentes, que ocultan los posibles accidentes estructurales del Sub-suelo. Los aluviones recientes, se extienden horizontalmente en toda la cuenca, a manera de mantos relativamente delgados, de espesor irregular desde el borde inferior de las montañas circunvecinas (Feo Codecido, 1972). En la sub-cuenca de Barinas este período está representado por depósitos aluviales (arenas, gravas, limos y arcillas), que se presentan de manera discordante sobre la Formación Río Yuca; estos depósitos se consiguen con espesores irregulares a lo largo de toda la región.

Formación Guanapa - (Pleistoceno)

Referencia original de A. N. Mackenzie, 1937-a. Pese a que en Cartografía Nacional no aparece ninguna localidad con el nombre de Guanapa, se presume que la localidad tipo se encuentra en el borde de terraza al Norte de Barinitas, ribera derecha del Río Santo Domingo.

La descripción litológica más detallada hasta la fecha, fue hecha por Pierce (1960) y consiste de conglomerados, arenas y arcillas en estratos masivos, con estratificación cruzada, mal consolidado y con escogimiento y estratificación pobre. Los colores varían entre gris claro a pardo, a gris oscuro y gris-verdoso. El espesor de la formación es variable, entre 5 y 250 m (Pierce, 1960); en la región de Socopó (Río Socopó, al Sur de Barinas) alcanza un espesor de 579 m (Feo-Codecido, 1972). La Formación Guanapa aflora a lo largo del piedemonte andino, en el borde Noroeste de la Subcuenca de Barinas.

La Formación Guanapa es discordante sobre la Formación Río Yuca (Kiser 1997), sobre todas las unidades pre-cuaternarias y por debajo de los sedimentos holocenos. No se han hallado fósiles en esta formación. Aunque no se ha descrito específicamente, por la litología y la morfología, la Formación Guanapa probablemente se depositó como conos aluviales por los ríos que drenan la cordillera andina, sobre el piedemonte llanero occidental.

Bases Teóricas

2.2 Hidrogeología

El agua en la tierra aparece en muchas formas distintas: el agua salada de los océanos, el agua dulce de los lagos y ríos, el vapor de agua de la atmósfera, el agua de la lluvia y de la nieve, el agua de los glaciares y el agua que se encuentra por debajo de la superficie de la tierra. Toda el agua por debajo de la superficie (por ejemplo el vapor del agua, la humedad del suelo, el agua subterránea, el agua de las cuevas, etc.) forma el "agua del subsuelo".

La especialidad de la geología que se ocupa de la exploración y explotación del agua del subsuelo (especialmente el agua subterránea) es la hidrogeología. También puede definirse como "la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación". (Mijailov, L. 1989).

Tomado de <http://www.udep.edu.pe/recursoshidricos/hidrogeologia.pdf>

El agua subterránea se mueve según las fuerzas de la gravitación, pero más lento que el agua superficial. La velocidad y los movimientos dependen de la porosidad y permeabilidad del substrato (la roca o el suelo). La investigación de los movimientos del agua subterránea y de las propiedades hidrológicas del subterráneo es una tarea importante de la hidrogeología.

Para asegurar la disponibilidad de agua de buena calidad para satisfacer las necesidades de los consumidores (agricultura, industria, minería, uso doméstico y alimento básico de cada individuo) la hidrogeología tiene que encontrar métodos de

explotación del agua subterránea para solucionar problemas, tanto cuantitativos como problemas cualitativos del suministro del agua.

Así pues, la metodología hidrogeológica es la disciplina que contempla los métodos y procedimientos del estudio de las condiciones hidrogeológicas, del descubrimiento de los yacimientos de aguas subterráneas y de la evaluación de sus recursos, reservas, régimen, calidad y particularidades del movimiento de dichas aguas.

Un estudio hidrogeológico abarca la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen pluviométrico, la composición química del agua, las características de las rocas como permeabilidad, porosidad, figuración, su composición química, los rasgos geológicos y geotectónicos. Es así que la investigación hidrogeológica implica, entre otras, tres temáticas principales:

- El estudio de las relaciones entre la geología y las aguas subterráneas.
- El estudio de los procesos que rigen los movimientos de las aguas subterráneas en el interior de las rocas y de los sedimentos.
- El estudio de la química de las aguas subterráneas (hidroquímica e hidrogeoquímica)

2.3 Ciclo Hidrológico

El agua existe en la Tierra en tres estados: sólido (hielo, nieve), líquido y gas (vapor de agua). Océanos, ríos, nubes y lluvia están en constante cambio: el agua de la superficie se evapora, el agua de las nubes precipita, la lluvia se filtra por la tierra, etc. Sin embargo, la cantidad total de agua en el planeta no cambia. La circulación y conservación de agua en la Tierra se llama **ciclo hidrológico, o ciclo del agua**. Cuando se formó, hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, la Tierra ya tenía en su interior vapor de agua. En un principio, era una enorme bola en constante fusión con cientos de volcanes activos en su superficie. El magma, cargado de gases con vapor de agua, emergió a la superficie gracias a las constantes

erupciones. Luego la Tierra se enfrió, el vapor de agua se condensó y cayó nuevamente al suelo en forma de lluvia. (Fig. II-11).



Figura II-11. Ciclo Hidrológico.
Tomado de <http://www.explora.cl/otros/agua/ciclo2.html>

El ciclo hidrológico comienza con la evaporación del agua desde la superficie del océano. A medida que se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua: es la condensación. Las gotas se juntan y forman una nube. Luego, caen por su propio peso: es la precipitación. Si en la atmósfera hace mucho frío, el agua cae como nieve o granizo. Si es más cálida, caerán gotas de lluvia. Una parte del agua que llega a la tierra será aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como escorrentía. Otro poco del agua se filtrará a través del suelo, formando capas de agua subterránea. Este proceso es la percolación. Más tarde o más temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación. Al

evaporarse, el agua deja atrás todos los elementos que la contaminan o la hacen no apta para beber (sales minerales, químicos, desechos).

Por eso el ciclo del agua nos entrega un elemento puro. Pero hay otro proceso que también purifica el agua, y es parte del ciclo: la transpiración de las plantas. Las raíces de las plantas absorben el agua, la cual se desplaza hacia arriba a través de los tallos o troncos, movilizándolo consigo a los elementos que necesita la planta para nutrirse. Al llegar a las hojas y flores, se evapora hacia el aire en forma de vapor de agua. Este fenómeno es la transpiración. De tal manera, que el ciclo hidrológico es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimientos de la hidrosfera. Se trata de un ciclo biogeoquímico en el que hay una intervención mínima de reacciones químicas, y el agua solamente se traslada de unos lugares a otros o cambia de estado físico. Es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano vuelve al océano después de pasar por las etapas de precipitación, escorrentía superficial y/o escorrentía subterránea.

El concepto de ciclo se basa en el permanente movimiento o transferencia de las masas de agua, tanto de un punto del planeta a otro, como entre sus diferentes estados (líquido, sólido y gaseoso). Este flujo de agua se produce por dos causas principales: la energía solar y la gravedad.

2.3.1 Fases del Ciclo Hidrológico

2.3.1.1 Precipitación:

Es la caída del agua desde la atmósfera hacia la superficie de la tierra. Este fenómeno se inicia cuando se dan ciertas condiciones de temperatura en la atmósfera (básicamente enfriamiento), entonces, la humedad contenida en las nubes se condensa, se forman las gotas y por gravedad se precipitan hacia la tierra en forma de lluvia o granizo, la cual puede caer sobre los océanos o sobre la tierra.

2.3.1.2 Evaporación:

Es un fenómeno de la naturaleza que ocurre cuando la radiación solar hace subir el agua en forma de vapor o humedad desde el mar hasta la atmósfera. Aunque la mayor cantidad de evaporación sale del mar, también se da en toda la superficie de la tierra donde haya agua estancada, por ejemplo, los lagos, lagunas, ríos y embalses. Toda el agua que es evaporada y llevada hacia arriba en forma de humedad se aglomera y forma las nubes.

2.3.1.3 Evapotranspiración:

Es el proceso que explica la evaporación del agua contenida en las plantas. Se inicia cuando las raíces de las plantas absorben el agua del suelo, luego la transportan por el tronco hasta llegar por las ramas a las hojas, donde se evapora hacia la atmósfera.

2.3.1.4 Retención o Intercepción:

Es el fenómeno que se da cuando el agua que viene de la atmósfera en forma de lluvia no llega a la superficie de la tierra, sino que es interceptada por la vegetación, edificios u otros objetos, y vuelve a evaporarse.

2.3.1.5 Infiltración:

Se le llama así al paso del agua que cae de las lluvias y penetra entre la superficie y las capas del suelo, a través de los poros y aberturas que se encuentran entre las rocas del suelo. El agua que se infiltra puede seguir tres caminos: puede ser devuelta a la superficie y evaporada hacia la atmósfera, puede ser absorbida por las raíces de las plantas y regresada por la evapotranspiración, y por último, puede percolarse profundamente en el suelo, formando corrientes subterráneas.

2.4 Distribución Global del Agua

Del total de agua de la Tierra, 1.386 millones de Kilómetros cúbicos (332.5 millones de Millas cúbicas), alrededor de un 97 por ciento, es agua salada. Del agua dulce total, un 68 por ciento está confinada en los glaciares y la nieve. Un 30 por ciento del agua dulce está en el suelo. Las fuentes superficiales de agua dulce, como lagos y ríos, solamente corresponden a unos 93,100 Kilómetros cúbicos (22,300 Millas cúbicas), siendo la principal fuente de agua que la población usa a diario. (Fig. II-12).

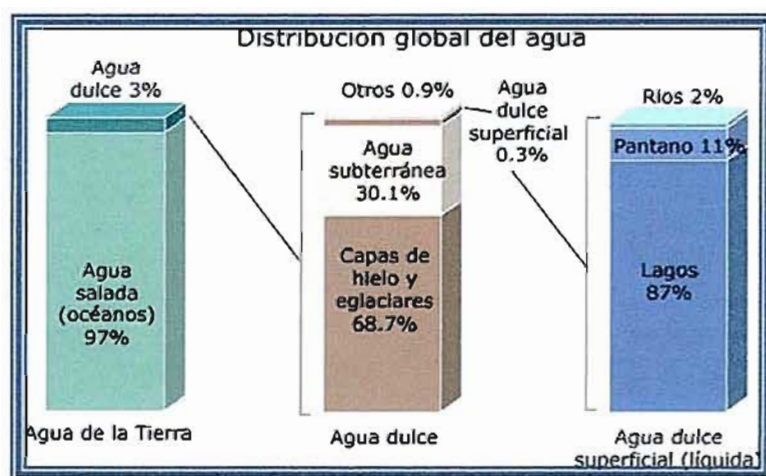


Figura II-12. Distribución Global del Agua.
Tomado de: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

2.5 Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas son uno de los recursos más importantes y ampliamente distribuidos de la tierra. Se encuentran bajo la superficie del terreno o dentro de los poros, fisuras o fracturas de las rocas, o dentro de las masas de regolito; en zonas húmedas a metros de profundidad, y en desiertos a cientos de metros. La cantidad de agua que se infiltra debe ser suficiente para saturar un espesor de roca apreciable, y pasar a ser un recurso aprovechable.

En otras palabras, el agua subterránea, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros y fisuras del terreno (Figura II-13). Esta agua fluye a la superficie de forma natural a través de manantiales, cauces fluviales, o bien directamente al mar. Puede también dirigirse artificialmente a pozos, galerías y otros tipos de captaciones. Se renueva de modo constante por la naturaleza, a merced de la recarga, la cual procede principalmente de las precipitaciones, pero también puede producirse a partir de escorrentía superficial y cursos superficiales de agua (sobre todo en climas áridos), de acuíferos próximos o de retorno de ciertos usos (destacan los retornos de los regadíos).

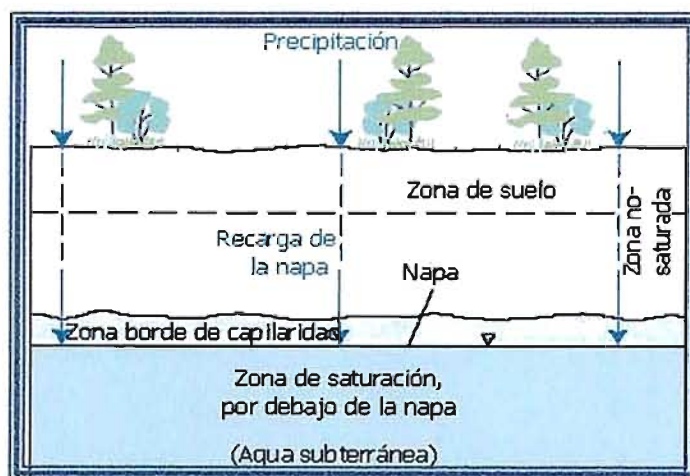


Figura II-13. Agua Subterránea.

Tomado de <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

2.5.1 División de las Formaciones Geológicas Según su Comportamiento Hidrológico

Existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua. Desde el punto de vista hidrogeológico, estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales: Acuíferos, Acuitardos, Acuicludos y Acuífugos.

2.5.1.1 Acuíferos

Son unidades o formaciones geológicas subterráneas compuesta de grava, arena o piedra porosa, capaces de almacenar, transportar y transmitir el agua; son formaciones con capacidad de drenaje alta en las que se pueden perforar pozos o realizar sondeos con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento, agricultura, industria y ganadería, etc. (Figura II-14).

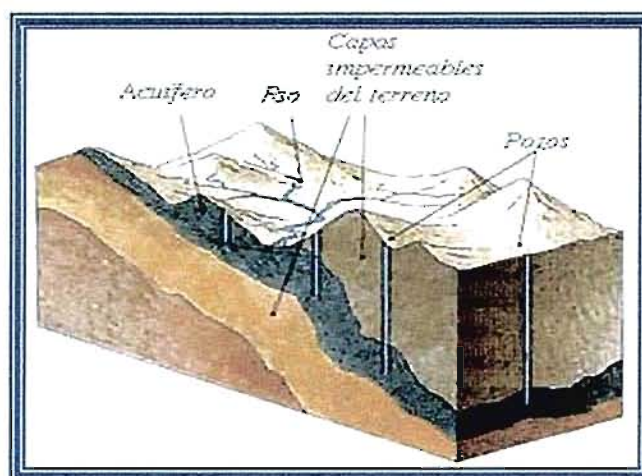


Figura II-14. Acuífero

Tomado de: <http://www.teorema.com.mx/images/upload/>

2.5.1.2 Acuitardos

Capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten muy lentamente; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.), y su capacidad de drenaje es media a baja; no son de interés para la obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel muy importantes como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.

2.5.1.3 Acuicludos

Son aquellas formaciones geológicas que pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.); en hidrogeología clásica se asumen como impermeables.

2.5.1.4 Acuifugos

Formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar, se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujo.

2.5.2 Clasificación de los Acuíferos según las Circunstancias Hidráulicas y Estructurales.

2.5.2.1 Acuíferos Libres, Freáticos o No Confinados

Son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. La superficie del agua será el nivel freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no, pero lo importante es que no tenga por encima ningún material impermeable. En estos acuíferos, al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente, el agua alcanza un nivel que sería el mismo que tendría dentro de la formación geológica, es decir, el nivel freático (nivel real), y coincide con el nivel piezométrico (nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica). (Figura II-15).

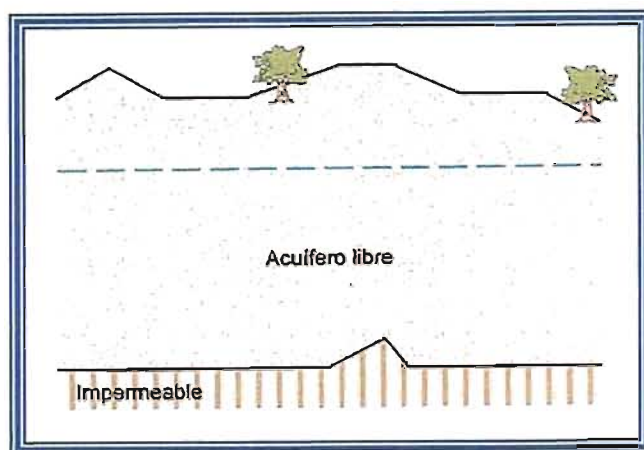


Figura II-15. Esquema de Acuífero Libre.
Tomado de: González de Vallejo L. Ingeniería Geológica. 2003

2.5.2.2 Acuíferos Cautivos o Confinados

Son aquellos acuíferos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua está por encima del techo del material del acuífero, encontrándose a presión o en carga debido al peso de los materiales superiores. El agua que ceden procede de la descompresión de estos niveles superiores, cuando se produce la depresión en el acuífero (Fig. II-16). En rigor, no existe en la naturaleza acuíferos cautivos puros, dado que no existen materiales absolutamente impermeables capaces de aislarlos, aunque a efectos prácticos muchos se pueden considerar como tales, entre otros aquellas formaciones permeables que permanecen cautivas en una gran extensión y afloran en superficie por algunos de sus extremos. Son acuíferos rápidos, con muy poca inercia debido a su baja capacidad de almacenar agua, que reaccionan o transmiten enseguida las influencias de un bombeo puntual; los conos de bombeo suelen ser de menor que en los libres, pero son radios de influencia largos.

El agua contenida en un acuífero confinado, está sometida a cierta presión, superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Están sellados por materiales impermeables que no permiten

que el agua ascienda hasta igualar su presión a la atmosférica. Por este motivo, al perforar pozos que atraviesen el límite superior del material que constituye el acuífero, se observará que el nivel del agua asciende muy rápido hasta que se estabiliza en el nivel piezométrico. Podrán darse pozos surgentes, si el nivel del agua queda por encima del nivel topográfico y pozos artesianos si el nivel se estabiliza por debajo de la cota del terreno. De esta manera, si se imagina una serie de pozos atravesando un acuífero de este tipo, y se unen los niveles que alcanza el agua en cada uno, se obtendría una superficie piezométrica que no coincide con el nivel freático que tendría el acuífero en estado natural.

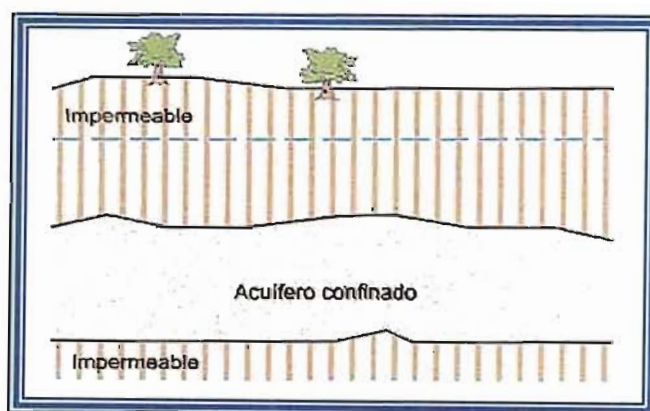


Figura II-16. Esquema de Acuífero Confinado.
Tomado de: González de Vallejo L. Ingeniería Geológica. 2003

2.5.2.3 Acuífero Semiconfinado.

Constituye una variedad de los confinados, y se caracteriza por tener el techo (parte superior) y/o el muro (parte inferior), sellado por materiales que no son totalmente impermeables, sino que constituyen un acuitardo, es decir, un material que permite una filtración vertical que alimenta muy lentamente al acuífero principal. En estos casos, habrá situaciones en los que la recarga podrá hacerse en ambos sentidos en

función de la diferencia de potencial. En realidad un acuífero semiconfinado es un sistema físico integrado por un acuífero superior bien alimentado, un estrato semipermeable o acuitardo y un acuífero inferior semiconfinado; la diferencias de niveles entre el acuífero superior e inferior acarrea una transferencia de agua vertical que alimenta el acuífero inferior (Figura II-17). 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 los libres y los cautivos.

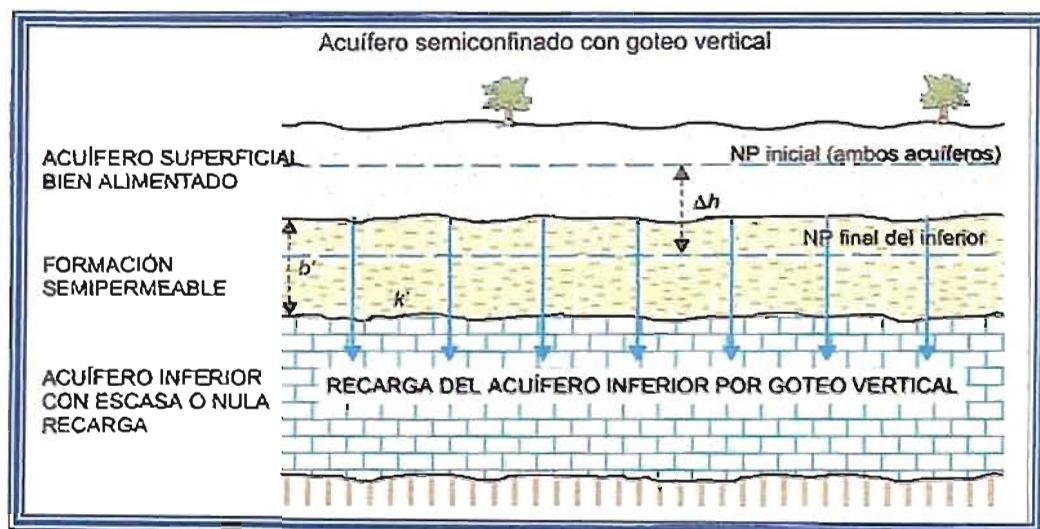


Figura II-17. Esquema de acuífero semiconfinado.
Tomado de: González de Vallejo L. Ingeniería Geológica, 2003

2.5.2.4 Acuíferos Semilibres

Representan una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que la componente horizontal del flujo no puede ignorarse (Figura II-18)

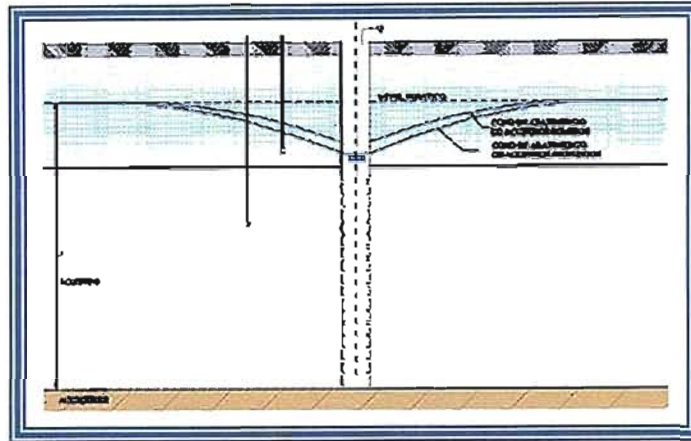


Figura II-18. Representación esquemática de un pozo en Acuífero Semilibre (adaptado de Kruseman).
Tomado de: www.unesco.org.uy/phi/libros/libroPIEB/3-5.html

2.5.2.5 Acuíferos Colgados

Son aquellos donde algunas veces se da una capa de material más o menos impermeable por encima del nivel freático. El agua que se infiltra queda atrapada en esta capa para formar un lentejón, que normalmente tiene una extensión limitada sobre la zona saturada más próxima (Figura II-19). Los acuíferos colgados son más comunes de lo que se pueda suponer, aunque quizá solo ocupan unos pocos centímetros de espesor, o solo se alimentan después de una recarga muy excepcional.

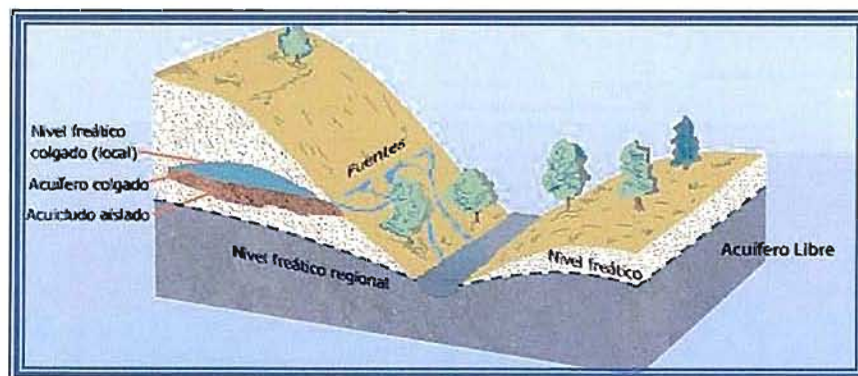


Figura II-19. Representación esquemática de un Acuífero Colgado.
Tomado de: www.ucm.es/.../esc_sub_acuifero_central.html

2.5.3 Clasificación de los Acuíferos según la Textura de los Materiales que lo Conforman

2.5.3.1 Acuíferos Detríticos o Sedimentarios

Su permeabilidad es debida a su porosidad intergranular; entre ellos se encuentran las gravas, arenas, arcosas. La textura del medio esta constituida por granos, permitiendo que el agua se almacene y circule por los huecos intergranulares; dichos huecos pueden estar rellenos de material granular fino, disminuyendo las características del medio para el almacenamiento y transporte de agua, o incluso estar rellenos de materiales arcillosos, dejando prácticamente anuladas estas características. En ocasiones, los mismos granos están constituidos por material poroso que les aporta, incluso, mejores propiedades como almacén de agua (Figura II-20). Los medios granulares, dada su génesis, suelen ser muy homogéneos a escalas reducidas.



Figura II-20. Representación esquemática de un Acuífero Detrítico.
Tomado de: <http://www.fortunecity.com/.../195/hidro/detriti.htm>

2.5.3.2 Acuíferos Fisurados y Kársticos

Son aquellos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras tanto de origen mecánico como por disolución. Entre ellos se encuentra calizas, dolomías, granitos.

basaltos, etc. Son los tipos de acuíferos más conocidos por todos. Las cuevas de estalactitas son un ejemplo muy conocido de este tipo de acuíferos que son los karstificados. A través de estas cuevas circula el agua siendo muchas veces auténticos ríos. La carstificación es un proceso de disolución por acción del agua en formaciones carbonatadas previamente fisuradas; los acuíferos kársticos son poco homogéneos a pequeña escala, pero suelen presentarse más homogéneos si la escala de trabajo es suficientemente amplia (Figura II-21).

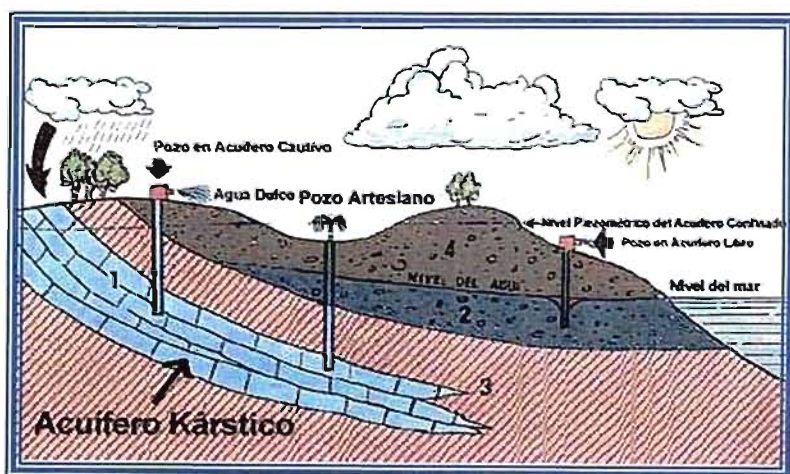


Figura II-21. Representación esquemática de un Acuífero Kárstico.
Tomado de: <http://www.fortunecity.com/.../195/hidro/fisu.htm>

2.5.3.3 Acuíferos Kársticos y Porosos

Son aquellos acuíferos cuya permeabilidad es debida a un conjunto de las dos anteriores causas, teniendo así los acuíferos cársticos y porosos. Son típicas las calcarenitas (Figura II-22, recuadro 7).

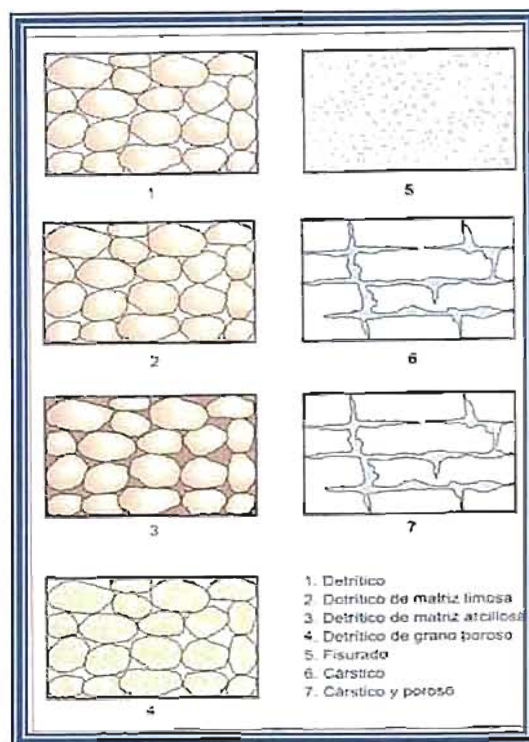


Figura II-22. Tipos de acuíferos según su textura.

El recuadro 7 muestra un ejemplo de la permeabilidad de un Acuífero Kárstico y Poroso.

Tomado de: González de Vallejo L. Ingeniería Geológica, 2003

2.5.4 Zonas de un Acuífero

Si se admite que los acuíferos reciben agua de la precipitación (aunque puede recibirla por otras vías), se definen tres zonas: zona de recarga o alimentación, zona de circulación y zona de descarga (Figura II-23).

La zona de alimentación es aquella donde el agua de precipitación se infiltra. La zona de circulación es la parte comprendida entre la zona de alimentación y la zona de descarga. La zona de descarga es la zona donde el agua sale del acuífero, como puede ser un manantial o la descarga al mar o a un río.

2.5.4.1 Recarga de Acuíferos

Las recargas se efectúan de dos formas:

- **Recargas Naturales:** se llama así, todo aquel acuífero cuya recarga se realiza por infiltración del agua procedente de las precipitaciones, de las escorrentías superficiales o del flujo subterráneo.
- **Recargas Artificiales:** se realiza en los acuíferos sobreexplotados. Durante los periodos excedentarios, se toman aguas de los cauces fluviales y se inyectan (pozos de inyección) o se estancan para que pasen posteriormente al acuífero (estanques de infiltración).

El agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie. Esta renovación se produce lentamente cuando se compara con la de los depósitos superficiales, como los lagos, y los cursos de agua. El tiempo de residencia (el periodo necesario para renovar por completo un depósito a su tasa de renovación normal) es muy largo. En algunos casos la renovación está interrumpida, por la impermeabilidad de las formaciones geológicas superiores (acuitardos), o por circunstancias climáticas sobrevenidas de aridez.

El agua de las precipitaciones (lluvia, nieve, etc.) puede tener distintos destinos una vez alcanza el suelo, pudiéndose repartir en tres fracciones. Se llama escorrentía a la parte que se desliza por la superficie del terreno, primero como arroyada difusa y luego como agua encauzada, formando arroyos y ríos. Otra parte del agua se evapora desde las capas superficiales del suelo o pasa a la atmósfera con la transpiración de los organismos, especialmente las plantas; nos referimos a esta parte como evapotranspiración. Por último, otra parte se infiltra en el terreno y pasa a ser agua subterránea.

La proporción de infiltración respecto al total de las precipitaciones depende de varios factores. La litología (la naturaleza del material geológico que aflora en la

superficie) influye a través de su permeabilidad, la cual depende de la porosidad, del diaclasamiento (agrietamiento) y de la mineralogía del sustrato. Por ejemplo, los minerales arcillosos se hidratan fácilmente, hinchándose siempre en algún grado, lo que da lugar a una reducción de la porosidad que termina por hacer al sustrato impermeable. Otro factor desfavorable para la infiltración es una pendiente marcada. La presencia de vegetación densa influye de forma compleja, porque reduce el agua que llega al suelo (interceptación), pero extiende en el tiempo el efecto de las precipitaciones, desprendiendo poco a poco el agua que moja el follaje, reduciendo así la fracción de escorrentía y aumentando la de infiltración. Otro efecto favorable de la vegetación tiene que ver con las raíces, especialmente las raíces densas y superficiales de muchas plantas herbáceas, y con la formación de suelo, generalmente más permeable que la mayoría de las rocas frescas.

2.5.4.2 Descarga de Acuíferos

El agua subterránea mana (brota) de forma natural en distintas clases de surgencias en las laderas (manantiales) y a veces en fondos del relieve, siempre allí donde el nivel freático intercepta la superficie. Cuando no hay surgencias naturales, al agua subterránea se puede acceder a través de pozos, perforaciones que llegan hasta el acuífero y se llenan parcialmente con el agua subterránea, siempre por debajo del nivel freático, en el que provoca además una depresión local. El agua se puede extraer por medio de bombas.

Otras veces, se puede hablar de una descarga debida a un flujo hipodérmico o interflujo, que es aquel que circula de modo somero y rápido por ciertas formaciones permeables de escasa profundidad, por lo general, ligada a álveos fluviales (acuíferos subálveos); que proceden de una rápida infiltración, alta velocidad de transmisión, y escaso recorrido, que hacen que pronto vuelvan al exterior, representando ser formaciones de escaso o nulo almacenamiento.

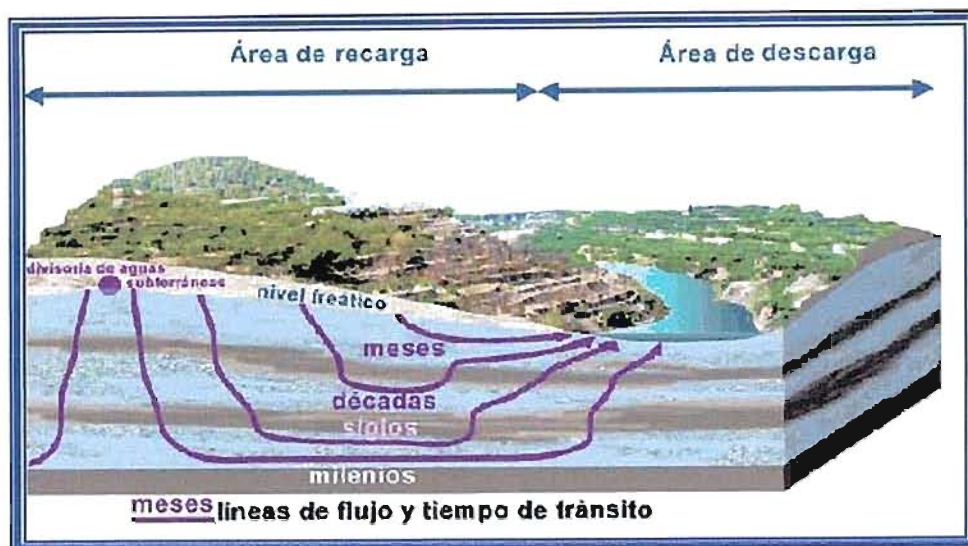


Figura II-23. Áreas de recarga y descarga, líneas de flujo y tiempo de desplazamiento del agua en un acuífero. Tomado de: http://aguas.igme.es/igme/educacion_ambiental/libro_aguas_sub/

2.6 Características Hidrogeológicas del Acuífero

La productividad de un acuífero es función, además de sus características geológicas, de sus características hidrogeológicas y de los factores del flujo de las aguas subterráneas. Las características hidrogeológicas, ligadas esencialmente a las propiedades físicas de la roca-almacén, determinan junto con la porosidad eficaz y, en cierto modo, el coeficiente de almacenamiento, el volumen de agua gravífica que puede ser liberado por los medios normales de captación y, con la permeabilidad o transmisividad, el caudal útil que se puede obtener. Dentro de éstas características o parámetros hidrogeológicos se encuentran:

2.6.1 Porosidad

Es la fracción del volumen total de la roca no ocupada por el esqueleto mineral de la misma, es decir, se refiere a la medida del espacio intersticial entre grano y grano, por lo que define la posibilidad de la roca de almacenar más o menos cierta cantidad de

fluido. Se expresa por el porcentaje de volumen de poros respecto al volumen total de la roca.

2.6.1.1 Tipos de Porosidad

- **Porosidad Total (ϕ_T)**, definida como la relación entre el volumen de poros que se hallan interconectados y el volumen total de la roca. Esta propiedad le permite a la roca tener capacidad para almacenar fluidos por medio de sus poros. Cada material posee su valor de porosidad (Tabla II-1)

La ecuación que describe este comportamiento es la siguiente:

$$\phi_T (\%) = (V_p/V_t) \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

V_p: Volumen poroso

V_t: Volumen total de la roca

- **Porosidad Eficaz (ϕ_{ef})**, diferenciada de la anterior en que su valor expresa en términos porcentuales el volumen de agua capaz de ser drenable o movable a través de los espacios que se encuentran interconectados en la roca-almacén.

La ecuación de porosidad eficaz es la siguiente:

$$\phi_{ef} (\%) = (V_g/V_t) \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

V_G = Volumen ocupado por el agua gravitaria

V_t = Volumen total de la roca

Tabla II-1. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales según Johnson (1967), Davis (1969), Schoeller (1962) y Ward (1967). Tomado de: Guerrero, Y. y Mejías, L., 2000

MATERIAL		POROSIDAD TOTAL (%)			POROSIDAD EFICAZ (%)		
Tipo	Descripción	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.
Rocas Masivas	Granito	0,3	4	0,2	<0,2	0,5	0,0
	Caliza masiva	8	15	0,5	<0,5	1	0,0
	Dolomía	5	10	2	<0,5	1	0,0
	Areniscas	15	25	3	10	20	0,0
Rocas Metamórficas		0,5	5	0,2	<0,5	2	0,0
Rocas Volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	<5	20	0,0
	Escorias	25	80	10	20	50	1
	Pumitas	85	90	50	<5	20	0,0
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1	<1	2	0,1
	Basaltos vacuolares	12	30	5	5	10	1
Rocas Sedimentarias Sueltas	Aluviones	25	40	20	20	35	5
	Dunas	35	40	30	25	30	10
	Gravas	30	40	25	20	35	10
	Loess	45	55	40	<5	10	0,1
	Arenas	35	45	20	25	35	10
	Depósitos glaciares	25	35	15	15	30	5
	Limos	40	50	35	10	20	2
	Arcillas sin compactar	45	60	40	2	10	0,0
	Suelos superiores	50	60	30	10	20	1

2.6.2 Permeabilidad (K)

La permeabilidad es una propiedad que indica la capacidad que tiene una roca para conducir un fluido a través de sus poros interconectados, sin alterar su estructura interna. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende del tipo de roca, de la naturaleza del fluido, de la presión del fluido y de la temperatura.

Una de las posibles formas para determinarla es utilizando correlaciones entre porosidad y permeabilidad, a pesar de que esos resultados son muchas veces cuestionados en rocas poco o nada consolidadas. La relación estadística compleja entre porosidad y permeabilidad puede decirse, en general, que consiste en que las rocas más porosas (grano de tamaño uniforme) tienen una mayor permeabilidad que las menos porosas, y aunque la porosidad puede ser alta en algunas rocas de grano fino, la reducción en el tamaño de los poros trae como resultado una disminución en la capacidad de flujo dentro de la roca. En consecuencia, la permeabilidad disminuye. De igual manera, en otras formaciones como las calizas, las cuales se componen de roca densa interrumpida por fisuras muy pequeñas o por fracturas de gran extensión, la porosidad en tales formaciones puede ser baja, pero la permeabilidad de una fractura puede ser muy grande. En consecuencia, las calizas fracturadas pueden exhibir una porosidad baja conjuntamente con una permeabilidad extremadamente alta.

Técnicamente, el coeficiente de permeabilidad de Darcy, K , es el volumen de agua libre que percola durante la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de una sección total del acuífero bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad, a la temperatura de 20°C (Castany, 1975).

La permeabilidad K depende de las condiciones del suelo y de las características del fluido, entre las cuales se menciona:

- Forma, tamaño y disposición de los granos (Tabla II-2).
- Viscosidad y densidad del fluido

Según la fórmula de Darcy, la permeabilidad viene dada por:

$$K = Q / (I \times A) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

K = Permeabilidad (m/día)

Q = Caudal ($m^3/día$)

I = Gradiente Hidráulico (adimensional)

A = Superficie de la sección flujo (m^2)

La Tabla siguiente ofrece un cuadro comparativo entre los valores de permeabilidad, la clasificación cualitativa del acuífero, y el tipo de materiales que lo componen.

Tabla II-2. Clasificación de terrenos por la permeabilidad según Johnson (1967), Scholler (1962) y Ward (1967)

Permeabilidad (m/día)	10^{-6} 10^{-5} 10^{-4}	10^{-3}	10^{-2} 10^{-1} 1	10	10^2 10^3
Clasificación	Impermeable	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Clasificación del Acuífero	Acuicludo	Acuicludo	Acuífero pobre	Acuífero regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de Materiales	Arcilla compacta, Pizarra, Granito	Limo arenoso, Limo, Arcilla limosa	Arena fina, Arena limosa, Caliza fracturada	Arena limpia, Grava y Arena fina	Grava limpia

2.6.3 Coeficiente de Almacenamiento (S)

Amisial y Jégat (1984), lo expresan como el volumen de agua de una columna vertical del acuífero, que tiene como base la unidad de área y como altura el espesor medio del acuífero, libera por expansión del agua y compactación de la matriz sólida cuando la carga hidráulica disminuye en una unidad. El coeficiente de almacenamiento está relacionado con el almacenamiento específico (S_s) y es un número adimensional.

$$S = e \times S_s \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

S = Coeficiente de Almacenamiento

e = Espesor medio del acuífero

S_s = Almacenamiento Específico

El almacenamiento específico, según Arnisial y Jégat (1984), es el volumen de agua que un volumen unitario de acuífero libera por expansión del agua y compactación de la matriz sólida del mismo, cuando la carga hidráulica disminuye en una unidad. Se relaciona con las características del agua y del acuífero mediante la siguiente ecuación:

$$S_s = \rho \times g \times (\alpha + n\beta) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

S_s = Almacenamiento Específico

ρ = Densidad o masa específica del agua

g = Aceleración de Gravedad

α = Compresibilidad vertical de la matriz sólida

n = Porosidad del acuífero

β = Compresibilidad del agua

El término $\rho g \alpha$ es la cantidad de agua liberada por compactación de la matriz sólida del acuífero, mientras que $\rho g n \beta$ es la cantidad liberada por dilatación o expansión del agua en el acuífero. El parámetro S_s se expresa comúnmente en m^{-1} en el sistema internacional MKS.

2.6.4 Transmisividad (T)

Según González, L., (2003), la transmisividad puede definirse como el volumen de agua que se escurre por una sección del acuífero de 1 metro de ancho por todo su espesor bajo una pendiente hidráulica unitaria. Este concepto es equivalente a decir

que la transmisividad es igual al producto del coeficiente de permeabilidad de Darcy, K , por el espesor saturado H o e de la capa acuífera libre o cautiva, en metros. Por tanto:

$$T = K \times e \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

T = Transmisividad ($m^2/día$)

K = Coeficiente de Permeabilidad ($m/día$)

e = Espesor saturado de la capa acuífera (m)

En acuíferos libres, al haber un pozo de explotación, la transmisividad varía en la zona cercana al pozo, lo que no sucede en los acuíferos confinados en donde la transmisividad se mantiene constante aún en la zona próxima al pozo.

2.6.5 Gradiente Hidráulico (I)

El gradiente hidráulico, es un número sin dimensiones, que representa la pérdida de carga por unidad de longitud. En otras palabras, es la pendiente de la superficie piezométrica si se acepta que los hilillos sobre la misma vertical son paralelos entre ellos.

El gradiente hidráulico se calcula a partir de los niveles piezométricos por medio de la siguiente ecuación:

$$I = (H_1 - H_2) / L \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

I = Gradiente Hidráulico

H_1 = Nivel piezométrico en la parte superior (m)

H_2 = Nivel piezométrico en la parte inferior (m)

L = Distancia entre los dos puntos H_1 y H_2 (m)

2.6.6 Velocidad Real (V_r)

$$V_r = Q / (A \times \phi_{ef}) = (K \times I) / \phi_{ef} \quad (\text{Ecuación 8})$$

La velocidad real, V_r , del flujo de agua subterránea se refiere a la sección real de flujo determinada por la porosidad eficaz (ϕ). Si A es la superficie total de la sección de flujo en m^2 y Q es el caudal del flujo de agua subterránea en $m^3/\text{seg.}$, la expresión de velocidad real:

$$V_r = Q / A = K \times I \quad (\text{Ecuación 9})$$

2.6.7 Caudal de Flujo (Q)

Es el volumen de agua en m^3 que atraviesa una sección total de la capa acuífera, o sección de flujo en m^2 , normal a la dirección de flujo, en la unidad de tiempo (un segundo). Se expresa en $m^3/\text{seg.}$

$$Q = K \times I \times A \quad \text{ó} \quad Q = T \times I \times L \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

Q = Caudal ($m^3/\text{seg.}$)

K = Coeficiente de Permeabilidad ($m/\text{seg.}$)

I = Gradiente Hidráulico

A = Sección transversal total (m^2)

T = Transmisividad ($m^2/\text{seg.}$)

L = Longitud (m)

2.7 Balance Hídrico

Desde el punto de vista hidrogeológico, el balance hídrico tiene como finalidad, determinar el volumen de agua proveniente de la precipitación, la cual recarga a los acuíferos por efecto de la infiltración directa. Los factores que juegan un importante

papel en el balance hídrico son aquellos que constituyen los gastos y las entradas del fluido. De acuerdo a esto se tiene la ecuación:

$$P = ETR + Esc + I \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

P = Precipitación media anual (mm.)

ETR = Evapotranspiración real media anual (mm.)

Esc = Escorrentía superficial media anual (mm.)

I = Infiltración eficaz al manto acuífero (mm.)

2.8 Niveles Piezométricos

En los acuíferos libres se definen como la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar. En los confinados, es la altura que alcanzaría el agua en el interior de un sondeo hasta equilibrarse con la presión atmosférica.

2.8.1 Superficies Piezométricas

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, llamadas líneas isopiezas.

En los acuíferos libres, la superficie piezométrica coincide, a grandes rasgos, con la superficie freática, es decir, con el límite de saturación. En los acuíferos confinados, la superficie piezométrica es más elevada que el techo de los mismos. En los acuíferos permeables o carstificados y, en general, en acuíferos muy heterogéneos, puede ser una superficie discontinua.

En acuíferos detríticos, pueden existir niveles más o menos aislados por lechos semiconfinantes. Un caso particular sería el de acuíferos afectados por intrusión marina en los que la piezometría está directamente afectada por la densidad del agua, que varía en función de la salinidad. La observación de las variaciones del nivel piezométrico en un cierto punto, proporciona información sobre la respuesta del acuífero a procesos de recarga o de extracción, así como sobre la tendencia en el almacenamiento.

2.8.2 Mapas Piezométricos

Los mapas piezométricos permiten conocer el sentido del flujo, diferenciar áreas de recarga y descarga, identificar divisorias hidrogeológicas, manifestar relaciones río – acuífero y mostrar diferencias de parámetros hidrodinámicos. Para construirlo debe obtenerse un inventario de todos los puntos de extracción del agua. El nivel piezométrico se determina partiendo de la siguiente ecuación:

$$N_p = CT - H \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

NP = Nivel Piezométrico

CT = Cota del terreno

H = Nivel estático

2.9 Características Físico – Químicas del Agua Subterránea

Las características físicas del agua son las que están relacionadas con su aspecto, y la química son las que se utilizan a menudo, para tratar el estado de una sustancia. Las características físicas y químicas pueden decir algo sobre el comportamiento de una sustancia en ciertas circunstancias. Hay diversas características físicas y químicas, las cuales son a menudo usadas alternativamente; entre estas se pueden mencionar:

2.9.1 Temperatura del Agua

La temperatura hay que medirla en el momento del muestreo. Las unidades para expresar la temperatura son °C ó °K, 0°C corresponden a 273,15 K ó 0°K es igual a -273,15°C.

2.9.2 Densidad

Se refiere al peso de cierta cantidad de agua. Se expresa generalmente en kilogramos por metro cúbico.

2.9.3 Características Termalés

Se refiere a lo que le sucede al agua cuando se calienta; en que temperatura se convierte a estado gaseoso, etc.

2.9.4 Conductividad Eléctrica

La medida de la conductividad del agua puede proporcionar una visión clara de la concentración de iones en el agua, pues el agua es naturalmente resistente a la conducción de la electricidad. La conducción se expresa en Siemens o micro-siemens/cm (mS/cm), y se mide con un conductivímetro. La conductividad eléctrica da una impresión de la cantidad de las sustancias en solución. Por variar con la temperatura, la conductividad siempre se calcula a 25 °C.

2.9.5 Absorción de luz

Es la cantidad de luz que cierta cantidad de agua puede absorber en un determinado plazo de tiempo.

2.9.6 Viscosidad

Es la que determina la movilidad del agua. Cuando se aumenta la temperatura, la viscosidad disminuye; esto significa que el agua será más móvil en temperaturas más altas.

2.9.7 PH

Es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculando el número de iones de hidrógeno presentes. Se mide en una escala a partir de 0 a 14, en la cual la media es 7, es decir, la sustancia es neutra. Los valores de pH por debajo de 7 indican que una sustancia es ácida y los valores de pH por encima de 7 indican que es básica. Cuando una sustancia es neutra el número de los átomos de hidrógeno y de oxhidrilos es igual. Cuando el número de átomos de hidrógeno (H^+), excede el número de átomos del oxidrilo (OH^-), la sustancia es ácida. El pH se mide en el momento del muestreo y otra vez en el laboratorio. Normalmente se usa una sonda que mide la concentración de H_3O^+ en forma electromagnética para calcular el pH. Equipos de terreno más sofisticados pueden medir la temperatura, la conductividad, el pH y el total de sólidos disueltos (TSD), en un solo proceso. Para recibir un valor aproximado del pH se usan también indicadores universales como papel tornasol.

2.9.8 Alcalinidad

Es la capacidad del agua de neutralizar un ácido o una base, de modo que el pH del agua no cambie (producto químico).

2.9.9 Sólidos Totales Disueltos (TSD)

Es la suma de todos los sólidos disueltos y suspendidos en el agua. Cuando el agua se analiza para el TSD, se seca la muestra y el residuo se pesa después. Los sólidos totales pueden ser tanto las sustancias orgánicas como inorgánicas, los microorganismos y partículas más grandes como la arena y arcilla. Según las normas de la Organización Mundial de Salud (OMS) se considera:

- Aguas de buena calidad, si el TSD es inferior a 500 ppm.
- Aguas de calidad aceptable, si el TSD varía entre 500 y 1000 ppm.
- Aguas salobres, si el TSD se encuentra entre 1000 y 2000 ppm.
- Aguas salinas, si el TSD está entre 2000 y 10000 ppm.

2.9.10 Contaminación microbiana

La contaminación microbiana puede ser la contaminación por las bacterias, que es expresada en: unidades formadoras de colonias (UFC), una medida de la población bacteriana. Otra contaminación microbiana es la contaminación por pirogen, los cuales son los productos bacterianos que pueden inducir fiebre en animales de sangre caliente. Después de bacterias y de pirogen las aguas se pueden también contaminar por los virus.

2.9.11 Dureza

La dureza del agua describe la concentración de algunos iones definidos en el agua, su determinación permite una clasificación simple en tipos de agua y también indica algo sobre la calidad del agua. Se conoce la dureza de carbonatos (la concentración de carbonatos en el agua), la dureza de no-carbonatos o dureza permanente (sulfatos sobre todo), y la dureza total (suma de dureza de carbonatos y dureza permanente). La dureza se expresa en grados y la definición para un grado de dureza es diferente dependiendo del país.

2.9.12 Oxígeno

El contenido de oxígeno en el agua indica si hay un ambiente oxidativo o reductivo. La unidad es mg/l.

2.9.13 Sílice

El conocimiento del contenido de sílice puede dar una impresión del origen del agua. El contenido de sílice se expresa en Si, SiO_2 ó H_2SiO_3 .

2.9.14 Iones

El contenido de todos los aniones y cationes se expresa siempre en forma de iones, no en forma de óxidos, sal u otros. Los iones que se determinen en el análisis

habitualmente son los siguientes (concentración expresada en mg/l, eq, mmol/l o mmol/m³):

- **Cationes:** Sodio (Na⁺), Potasio (K⁺), Calcio (Ca²⁺), Magnesio (Mg²⁺), Hierro (Fe²⁺), Manganeseo (Mn²⁺) y Amonio (NH₄⁺).
- **Aniones:** Hidrocarbonato (HCO₃⁻), Sulfato (SO₄²⁻), Cloruro (Cl⁻), Nitrato (NO₃⁻) y Nitrito (NO₂⁻). Principalmente las sumas de aniones y cationes deben ser iguales. Esto no siempre es el caso, porque a veces no se identifican todos los iones, o la metodología del análisis no permite mediciones absolutamente exactas.

2.9.15 Otros

La determinación de otros parámetros depende del objetivo de la investigación y puede incluir por ejemplo iones con algún efecto terapéutico, elementos trazas, componentes nocivos (contaminantes como Arsénico o metales pesados, por ejemplo), o el contenido de bacterias.

2.10 Calidad de las Aguas Subterráneas

La calidad de las aguas subterráneas esta determinada principalmente por la naturaleza del ambiente geológico que las contiene, pero influyen otros factores como el clima y frecuencia de las lluvias, la procedencia de la recarga, factores antrópicos, etc., los cuales repercuten en la variabilidad de la calidad de estas aguas (Tabla II-3).

2.10.1 Alteraciones Físicas de las Aguas Subterráneas

2.10.1.1 Color

El agua no contaminada suele tener ligeros colores rojizos, pardos, amarillentos o verdosos debido, principalmente, a los compuestos húmicos, férricos o los pigmentos verdes de las algas que contienen. En general, no se pueden establecer relaciones claras entre el color y el tipo de contaminación.

2.10.1.2 Olor y Sabor

Los compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor.

2.10.1.3 Temperatura

El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de gases (oxígeno), y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción. La temperatura óptima del agua para beber está entre 10 y 14°C.

2.10.1.4 Materiales en Suspensión

Presencia de partículas como arcillas, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras: en suspensión estable (disoluciones coloidales); o en suspensión que sólo dura mientras el movimiento del agua las arrastra. Las suspendidas coloidalmente, sólo precipitarán después de haber sufrido coagulación o floculación (reunión de varias partículas).

2.10.1.5 Radiactividad

Las aguas naturales tienen unos valores de radiactividad, correspondientes sobre todo a isótopos del potasio (K). Algunas actividades humanas también pueden contaminar el agua con isótopos radiactivos.

2.10.1.6 Espumas

Los detergentes producen espumas y añaden fosfato al agua (eutrofización). Disminuye mucho el poder autodepurador de los ríos al dificultar la actividad

bacteriana. También interfieren en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras.

2.10.1.7 Conductividad Eléctrica

El agua pura tiene una conductividad eléctrica muy baja. El agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos. Por esto se usan los valores de conductividad como índice aproximado de concentración de solutos. Como la temperatura modifica la conductividad, las medidas se deben hacer a 20°C.

2.10.2 Alteraciones Químicas de las Aguas Subterráneas

2.10.2.1 pH

Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO₂ disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos, por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, o por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo. La principal sustancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO₂, formando un sistema carbonato/bicarbonato. Las aguas contaminadas con vertidos mineros o industriales, pueden tener pH muy ácido.

2.10.2.2 Oxígeno Disuelto (OD)

Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.

2.10.2.3 Materia Orgánica Biodegradable [Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)]

El DBO₅ es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aeróbica de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Su

valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas, e ir comprobando cual es la eficacia del tratamiento depurador en una planta.

2.10.2.4 Materiales Oxidables [Demanda Química de Oxígeno (DQO)]

Es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato potásico en medio ácido). Se determina en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO5 por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO5. Sin embargo, la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto, y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales.

2.10.2.5 Nitrógeno Total

Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización. El nitrógeno se presenta en diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (nitrógeno total Kendahl), que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado.

2.10.2.6 Fósforo Total

Tanto el fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua también provoca eutrofización. El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico.

2.10.2.7 Aniones

Los cloruros indican salinidad; los nitratos, contaminación agrícola; los nitritos, actividad bacteriológica; los fosfatos, la presencia de detergentes y fertilizantes; los

sulfuros, acción bacteriológica anaeróbica como en aguas negras, etc.; los sulfatos, son indicadores de la lixiviación de los depósitos naturales de sulfato de magnesio (sales de Epson), o de sulfato de sodio (sal de Glauber), las cuales, en cantidades suficientes, pueden producir efectos laxantes; y los cianuros, contaminación de origen industrial, y los fluoruros en algunos casos se añaden al agua para la prevención de las caries, aunque es una práctica muy discutida.

2.10.2.8 Cationes

El sodio indica salinidad, el calcio y magnesio están relacionados con la dureza del agua, la cual es mayor cuanto mas contenido de calcio y magnesio hay disuelto; el amonio se relaciona con la contaminación con fertilizantes y heces, y los metales pesados los cuales producen efectos muy nocivos; se bioacumulan en la cadena trófica.

2.10.2.9 Compuestos Orgánicos

Los aceites y grasas procedentes de restos de alimentos o de procesos industriales (automóviles, lubricantes, etc.), son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan formando películas en el agua que dañan a los seres vivos. Los fenoles pueden estar en el agua como resultado de contaminación industrial y cuando reaccionan con el cloro que se añade como desinfectante, forman clorofenoles que son un serio problema porque dan al agua muy mal olor y sabor.

Tabla II-3. Valores Límites Recomendables del Agua para Suministro como Potable.
(Tomado de: Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395, año 1998,
en Ramírez, L., 2006)

Componentes	Unidades	Valor Deseable	Valor Máximo Aceptable
Organolépticos			
Color	U Pt-Co	<15	<15
Turbidez	UNT	<1	5
Olor o Sabor	El que sea aceptable para la mayoría de los consumidores		
Organismos Coliformes Totales	NMP/100 ml	<2.2	<2.2
Inorgánicos			
Aluminio	mg/l	0.1	0.2
Cinc	mg/l	3	5
Cloruro	mg/l	250	300
Cobre	mg/l	1	1
Dureza (CaCO ₃)	mg/l	250	500
Hierro Total	mg/l	0.1	1
Nitrato (NO ₃)	mg/l	10	10
Nitrito (NO ₂)	mg/l	0.01	0.01
TSD	mg/l	600	1000
Sulfatos (SO ₄)	mg/l	250	500

2.11 Diagramas Hidroquímicos

Los Diagramas Hidroquímicos son representaciones gráficas que muestran sintéticamente las características químicas principales de un agua, facilitando su clasificación. El Sistema de Gestión de Información Hidrológica tiene la capacidad de realizar distintos Diagramas Hidroquímicos conocidos, como son, los Diagramas de Piper, de Wilcox, entre otros.

2.11.1 Diagrama de Piper

Los **Diagramas de Piper** o Triangulares son ideales para representar tres componentes (aniones y/o cationes) en forma simultánea. La utilidad de estos diagramas es la posibilidad de representar muchos análisis en un mismo gráfico, sin dar origen a confusiones. Las aguas químicamente semejantes se encontrarán agrupadas, y pueden clasificarse por su ubicación en el diagrama según el siguiente esquema:

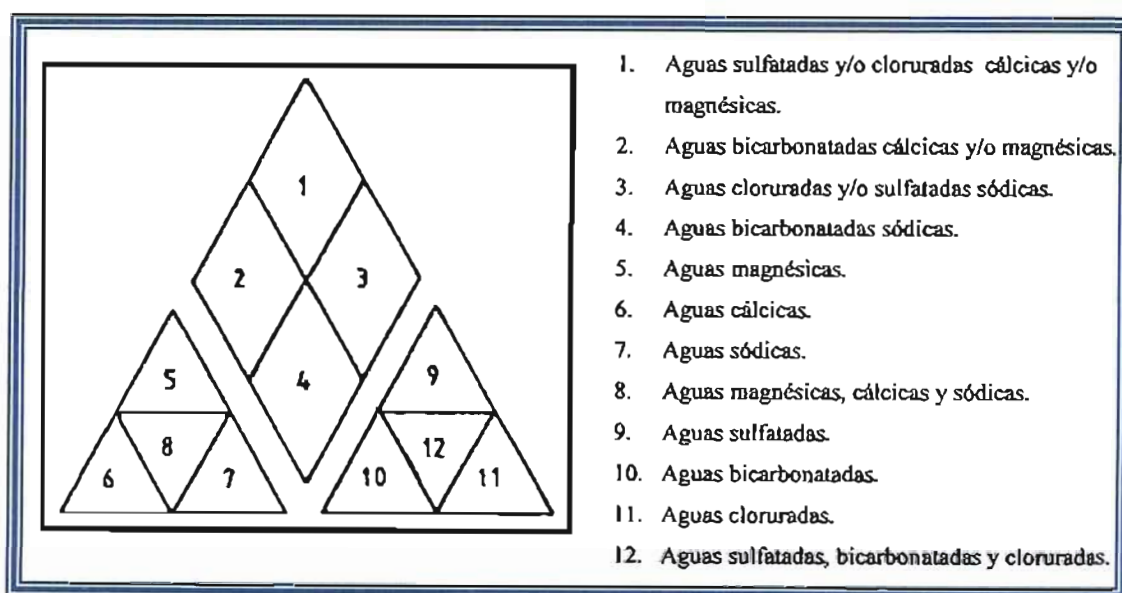


Figura II-24. Esquemización del Diagrama de Piper. Tomado de:
http://tsas/common/themes/tsas/help/Diagramas_Hidroquímicos_Htm

El Diagrama de Piper relaciona los iones dominantes presentes en el agua, clasificando la misma por el anión o catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera el 50%, se nombran los dos más abundantes.

Para interpretar el diagrama con más detalle, debe considerarse que para su construcción es necesario que los iones estén reducidos a porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/l). A cada vértice de un triángulo le corresponde el 100% de un catión o un anión.

Existen distintas variantes de estos diagramas. En este caso, se utiliza:

- Un triángulo para los cationes mayoritarios: ión calcio (Ca^{2+}), ión magnesio (Mg^{2+}), y la suma de los iones sodio y potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido de las agujas del reloj.
- Otro triángulo para los aniones mayoritarios: ión cloruro (Cl^-), ión sulfato ($\text{SO}_4^{=}$), y la suma de los iones carbonato y bicarbonato ($\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^-$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido antihorario.
- Un diagrama romboidal integrador, en el que se representan la suma de los cationes ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) y ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) en un par de lados paralelos y complementarios, mientras en el otro par de lados se presenta la suma de aniones ($\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^-$) y su complementario ($\text{SO}_4^{=} + \text{Cl}^-$).

2.11.2 Diagrama de Wilcox

Es un modelo que sirve para clasificar la calidad de agua según la aptitud de uso, tomando como base la conductividad eléctrica del agua y la relación de absorción de sodio. Para determinar la calidad de agua para riego, se debe considerar la Salinidad y la Sodicidad. La Salinidad se expresa por la CE y la Sodicidad por RAS.

Se dan dos interpretaciones: primero, la de Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos, que utiliza el diagrama de Wilcox, un gráfico de dos entradas del

cual surgen 16 categorías (Gráfico II-1), 4 por salinidad y 4 por sodicidad (Tabla II-4); segundo, la interpretación de la FAO que establece 3 categorías para clasificar la calidad del agua (Tabla II-5).

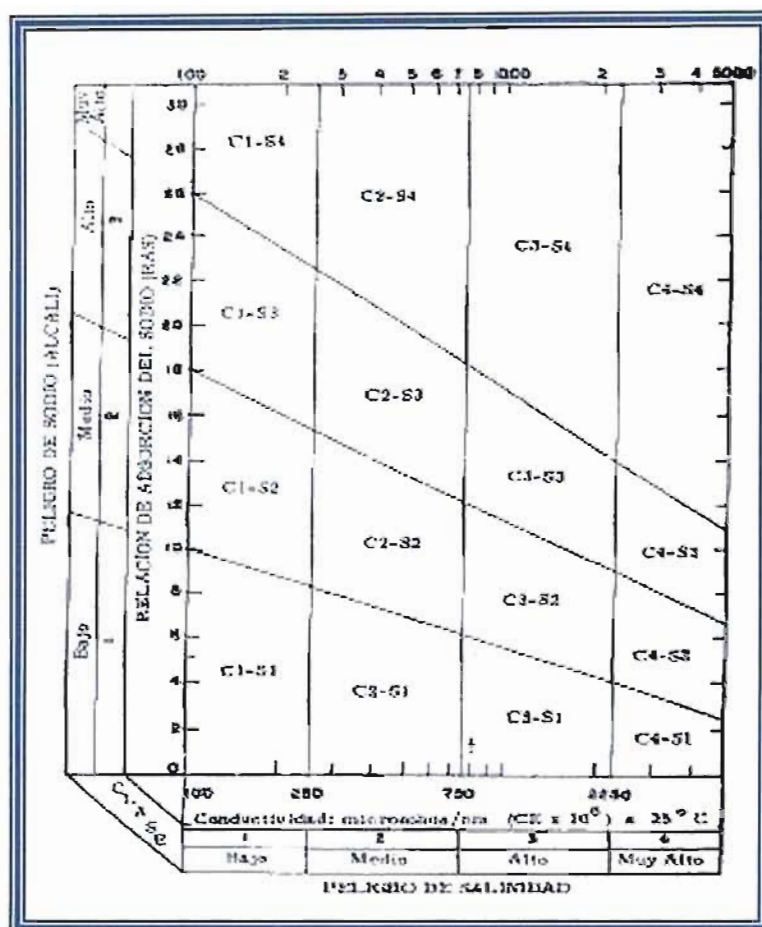


Figura II-25. Diagrama de Wilcox. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Laboratorio de suelos y agua de la Estación Experimental Agropecuaria. Argentina, 2005. Tomado de: www.inta.gov.ar/saenzpe/info/documentos/recnat/ManualdeAgua.pdf

La clasificación de las aguas de riego con respecto a la RAS, se basa primordialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo. No obstante, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños, a consecuencia de

la acumulación de sodio en sus tejidos, cuando los valores de sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para deteriorar la condición física del suelo.

Tabla II-4. Normas para determinar la calidad de agua para riego. Procedimientos analíticos para aguas de riego. Laboratorio de suelos y agua de la Estación Experimental Agropecuaria. Argentina, 2005. Tomado de: www.inta.gov.ar/saenzpe/info/documentos/recnat/ManualdeAgua.pdf

Categoría	Tipo	Calidad y Normas del Uso del Agua
Salinidad	C ₁	Agua de Baja Salinidad: Puede usarse para riego en la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.
	C ₂	Agua de Salinidad Media: Puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden encontrar plantas moderadamente tolerantes a las sales.
	C ₃	Agua de Salinidad Alta: No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.
	C ₄	Agua de Salinidad Muy Alta: No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso se deben seleccionar cultivos altamente tolerante a las sales.
Sodicidad	S ₁	Agua de Sodicidad Baja: Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.
	S ₂	Agua de Sodicidad Media: En suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.
	S ₃	Agua de Sodicidad Alta: Puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que éstos necesitarán prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable, sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta salinidad.
	S ₄	Agua de Sodicidad Muy Alta: es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

Ocasionalmente, el agua de riego puede disolver un buen porcentaje de calcio en los suelos calcáreos, de tal manera que disminuye notablemente el peligro por sodio, condición que deberá tenerse muy en cuenta en el caso de usar aguas de las clases $C_1 - S_3$ y $C_1 - S_4$. Tratándose de suelos calcáreos de pH alto o de suelos que no son calcáreos, el estado de sodio de las aguas $C_1 - S_3$, $C_1 - S_4$ y $C_2 - S_4$ se puede modificar ventajosamente agregando yeso al agua. De igual manera, es conveniente aplicar yeso al suelo periódicamente cuando éste vaya a regarse con aguas $C_2 - S_3$ y $C_3 - S_2$.

Tabla II-5. Clasificación cualitativa del agua para riego, según FAO 1992.
Laboratorio de suelos y agua de la Estación Experimental Agropecuaria. Argentina, 2005.
Tomado de: www.inta.gov.ar/saenzpe/info/documentos/recnat/ManualdeAgua.pdf

Calidad del Agua para Riego	CE dS/m	RAS
Aceptable	< 1,3	< 5
Dudosa	1,3 - 2	5 - 10
Riesgosa	> 2	> 10

2.12 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Es la idealización y/o simplificación de las características conocidas de un lugar, para facilitar una aproximación práctica. Comprende las siguientes características:

- El número de niveles o capas estratigráficas del acuífero.
- Características del suelo: agrupamiento macroscópico de tipos de suelos conocidos para definir las unidades hidroestratigráficas primarias.
- Condiciones iniciales del nivel freático.
- Límites horizontales y verticales.

2.12.1 Aplicaciones de los Modelos Hidrogeológicos

- a) Mejorar el entendimiento de la hidrogeología.
- b) Manejar el recurso agua subterránea:
 - Estimar las máximas tasas de bombeo permisibles.
 - Calcular áreas de protección.
 - Calcular reservas.
- c) Diseñar y optimizar sistemas de remediación.
- c) Analizar riesgos ambientales:
 - Determinar la dirección más probable del transporte de un contaminante.
 - Predecir concentraciones de contaminantes en un punto receptor.