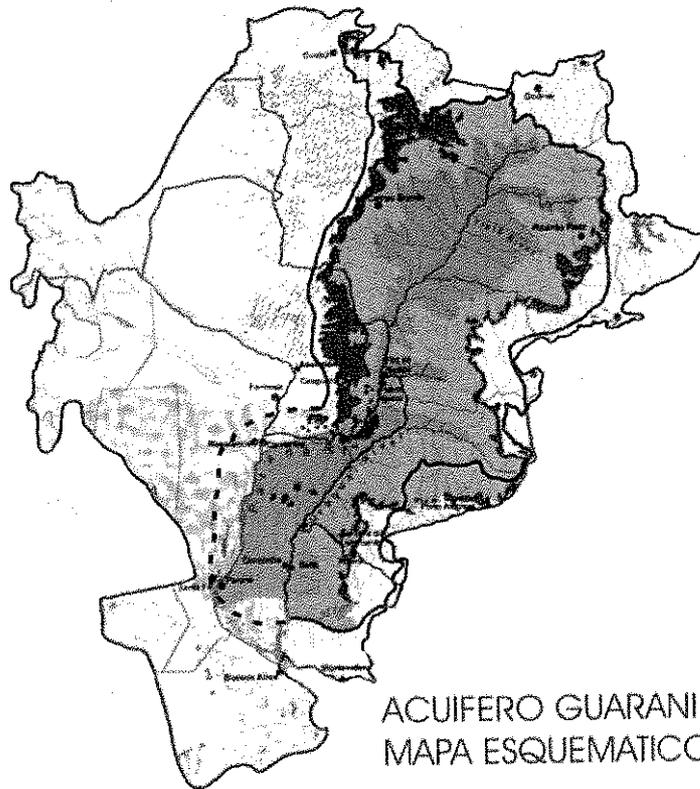


FONDO GUARANÍ DE LA CIUDADANÍA "CAPACITACIÓN DOCENTE Y EDUCACIÓN: ACUÍFERO GUARANI"



ACUIFERO GUARANI
MAPA ESQUEMATICO

ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
CAPITULO URUGUAY
AIDIS-UY





La ejecución del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní es posible gracias al acuerdo de cooperación alcanzado entre los gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, el aporte financiero del Global Environment Facility (GEF) y otros donantes, y la cooperación técnica y financiera del Banco Mundial que es la agencia implementadora de los Fondos GEF y la Secretaría General de la Organización de Estados Americanos (SG/OEA) en su condición de agencia ejecutora regional.

El proyecto "capacitación docente y educación: Acuífero Guaraní" fue realizado en el marco del Proyecto Acuífero Guaraní y con el apoyo económico previsto en el Fondo Guarani de la Ciudadanía destinado a promover actividades de difusión, educación ambiental y comunicación acerca de la temática de los recursos hídricos, las aguas subterráneas y el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG).

La institución encargada del desarrollo del proyecto es:

AIDIS UY.

Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – Capitulo Uruguay

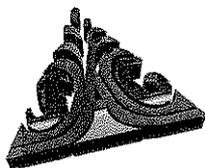
Cuareim 1492, Montevideo, Uruguay

Tel: (00598) 2 901.9558 – Email aidis@aidis.org.uy

www.aidis.org.uy

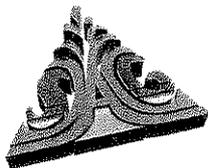
Los resultados, interpretaciones y conclusiones expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista de la OEA, otras instituciones cooperantes, ni de los países en él presentados.

Montevideo, Octubre de 2005

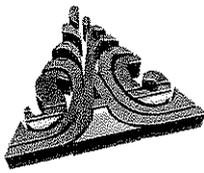


ÍNDICE

| | | |
|---------|--|--------|
| I. | LA IMPORTANCIA DEL AGUA | I-1 |
| I.1 | Cantidad y distribución en el planeta | I-1 |
| I.2 | El agua y el ciclo hidrológico | I-3 |
| I.3 | Ciclo hidrológico y el agua subterránea | I-6 |
| I.4 | Usos del agua | I-8 |
| I.4.1 | El agua como recurso natural | I-9 |
| I.4.2 | El agua como fuente de suministro..... | I-9 |
| I.4.3 | El agua como medio de transporte y actividades recreativas ... | I-10 |
| I.4.4 | El agua como medio receptor de otros flujos hídricos..... | I-10 |
| I.4.5 | El agua como fuente y medio receptor de energía | I-11 |
| I.4.6 | Geotermia de las aguas subterráneas | I-11 |
| II. | EL FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA | II-13 |
| II.1 | Los Acuíferos | II-13 |
| II.1.1 | ¿Que es un acuífero? | II-13 |
| II.1.2 | Tipos de acuífero | II-14 |
| II.1.3 | Las formaciones geológicas como acuíferos | II-15 |
| II.2 | El Flujo del agua subterránea..... | II-16 |
| II.2.1 | Calculo del flujo de agua | II-19 |
| II.2.2 | Entrada, salida y almacenamiento..... | II-20 |
| II.2.3 | Extracción de agua subterránea | II-21 |
| II.3 | Los acuíferos de Uruguay | II-22 |
| III. | GESTIÓN Y PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS..... | III-25 |
| III.1 | Riesgos de contaminación | III-25 |
| III.1.1 | Composición del agua subterránea | III-25 |
| III.1.2 | Agentes contaminantes..... | III-27 |
| III.1.3 | Origen de la contaminación | III-31 |
| III.2 | Protección de acuíferos | III-37 |
| III.2.1 | Evaluación del riesgo de contaminación | III-37 |
| III.2.2 | Protección contra el efecto de la contaminación | III-40 |
| III.3 | Gestión de uso del recurso agua subterránea..... | III-41 |
| IV. | EL ACUÍFERO GUARANÍ | IV-44 |
| IV.1 | Descripción del Sistema Acuífero Guaraní..... | IV-44 |



| | | |
|--------|--|-------|
| IV.2 | Características hidrogeológicas | IV-47 |
| IV.3 | Desarrollo en el Uruguay | IV-47 |
| IV.4 | Modelo Hidrogeológico local..... | IV-51 |
| IV.5 | La problemática ambiental en el SAG..... | IV-52 |
| IV.5.1 | Proyecto Piloto Itapúa | IV-53 |
| IV.5.2 | Proyecto Piloto Concordia - Salto | IV-53 |
| IV.5.3 | Proyecto Piloto Ribeirão Preto | IV-54 |
| IV.5.4 | Proyecto Piloto Rivera - Santana do Livramento..... | IV-55 |
| IV.6 | Marco para la gestión en el Uruguay..... | IV-57 |
| IV.6.1 | El rol de la Dirección Nacional de Medio Ambiente..... | IV-57 |
| IV.6.2 | El rol del Ministerio de Transporte y Obras Públicas | IV-59 |
| IV.6.3 | El rol de los Gobiernos Departamentales | IV-59 |
| V. | BIBLIOGRAFIA..... | V-60 |



I. LA IMPORTANCIA DEL AGUA¹

Cuando se utiliza la palabra agua se hace referencia al estado líquido de un compuesto de hidrógeno y oxígeno con la ecuación química H_2O . Se trata de un líquido que en estado puro es inodoro, incoloro e insípido, que a la presión atmosférica (760 mmHg) tiene un punto de congelación de $0^{\circ}C$ y su punto de ebullición es $100^{\circ}C$. El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de $4^{\circ}C$ y al congelarse se expande, permitiendo que el hielo sea más liviano que el agua y pueda flotar.

Es la única sustancia que a temperaturas ambientes normales puede presentar los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Cubre tres cuartas partes de la superficie de la Tierra, distribuida entre los océanos, la atmósfera, los casquetes polares y las aguas continentales, y desempeña un rol fundamental como motor de la actividad biológica en nuestro planeta.

La importancia es tal que la vida en el planeta se inició en su seno, y a medida que las diferentes formas de vida evolucionaban, se hicieron más complejas y especializadas. Gran parte de las especies zoológicas abandonaron el agua para pasar a vivir en la tierra, incorporándola como una parte de su propio organismo, en forma tal que es el componente principal de la materia viva, constituyendo entre el 50 y el 90% de la masa de los organismos vivos.

Forma parte del protoplasma celular, que es la materia básica de las células vivas, y está presente en un conjunto importante de funciones vitales. Para mantener un nivel adecuado en el organismo, se debe incorporar unos dos litros de agua diarios, que se eliminan a través de la orina, la respiración, la transpiración y la materia fecal.

En síntesis, el agua no es sólo el soporte de vida más importante que se conoce sino un elemento básico para la supervivencia y el desarrollo.

I.1 Cantidad y distribución en el planeta

El estudio de la cuantificación de la cantidad total de agua en el planeta planeta, así como del conjunto de fenómenos e interrelaciones que rigen el flujo de agua entre los distintos cuerpos de agua y sus estados físicos, ha sido tema de exploración científica desde la segunda mitad del siglo XIX. Sin embargo, la información cuantitativa es escasa, particularmente sobre los océanos, lo cual significa que las cantidades de agua todavía no se conocen en forma precisa.

En la Tabla 1.1 se presentan datos de las cantidades estimadas de agua en las diferentes formas que existen en la Tierra.

¹ La redacción de este capítulo tiene como base bibliográfica principal la siguiente:

Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays - Hidrología aplicada - 1994 McGraw-Hill Interamericana

Ken R. Rushton, Gideon P. Kruseman - Groundwater studies - 2004 Unesco Tno

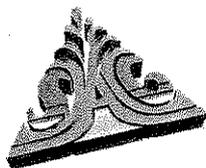


Tabla 1.1

Cantidades estimadas de agua en el mundo

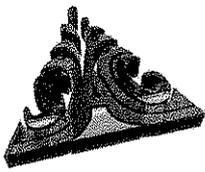
| Ubicación | Área (10 ⁶ km ²) | Volumen (km ³) | Porcentaje de agua total | Porcentaje agua dulce |
|--------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Océanos | 361,3 | 1.338.000.000 | 96,5 | |
| Agua subterránea | | | | |
| Dulce | 134,8 | 10.530.000 | 0,76 | 30,1 |
| Salada | 134,8 | 12.870.000 | 0,93 | |
| Humedad del suelo | 82,0 | 16.500 | 0,0012 | 0,05 |
| Hielo | | | | |
| Hielo polar | 16,0 | 24.023.500 | 1,7 | 68,6 |
| Hielo no polar y nieve | 0,3 | 340.600 | 0,025 | 1,0 |
| Lagos | | | | |
| Dulces | 1,2 | 91.000 | 0,007 | 0,26 |
| Salinos | 0,8 | 85.400 | 0,006 | |
| Pantanos | 2,7 | 11.470 | 0,0008 | 0,03 |
| Ríos | 148,8 | 2.120 | 0,0002 | 0,006 |
| Agua biológica | 510,0 | 1.120 | 0,0001 | 0,003 |
| Agua atmosférica | 510,0 | 12.900 | 0,001 | 0,04 |
| Agua total | 510,0 | 1.385.984.610 | 100 | |
| Agua dulce | 148,8 | 35.029.210 | 2,5 | 100 |

Tabla de *World Water Balance and Water Resources of the Earth*. Copyright, UNESCO, 1978.

La mayor cantidad de agua está almacenada en los océanos, donde encuentra el 96,5% del agua del planeta, lo que significa que si la Tierra fuera una esfera uniforme, esta cantidad sería suficiente para cubrirla hasta una profundidad cercana a los 2.600 m. El resto del agua la encontramos principalmente en los casquetes polares, que almacenan el 1,7%, y en los "depósitos subterráneos" donde se encuentra 1,7% más, restando 0,1% del agua total que forma parte del sistema hidrológico y las componentes bióticas del planeta.

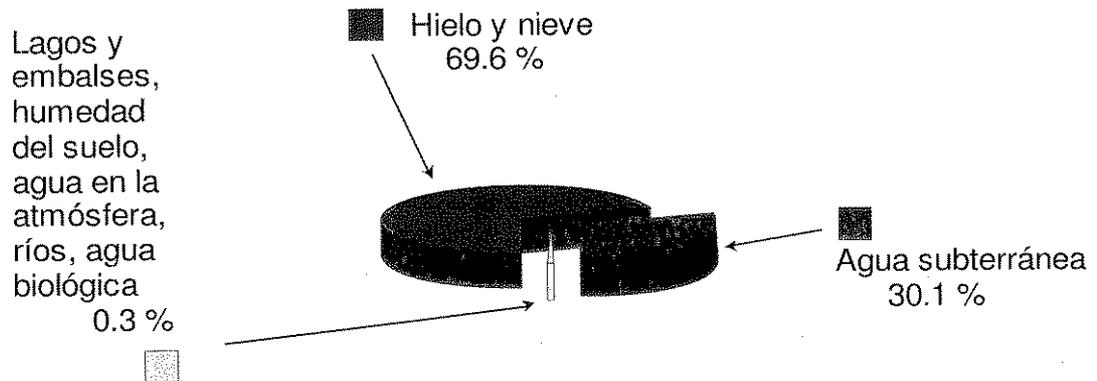
Del total del agua reviste especial atención el agua dulce, dada la relación directa que la misma tiene con el desarrollo de los ecosistemas continentales y en especial con el desarrollo de las actividades humanas.

De los datos presentados en la Tabla 1.1, se desprende que el agua dulce representa el 2,5% del agua total en el planeta. Del total del agua dulce, algo más de 2/3 está bajo la forma de hielos polares, y la mayor parte del agua restante (30,1 % del agua dulce total) forma parte de los depósitos de agua subterránea.



Por tanto, solo aproximadamente el 0,3% del total del agua dulce, interactúa en forma directa con el desarrollo de la vida sobre la superficie terrestre, formando parte del sistema atmosférico, de los cuerpos de agua superficial (lagos, ríos, humedales, etc), de la propia superficie terrestre y de la biota (ver gráfico 1.1)

Gráfico 1.1



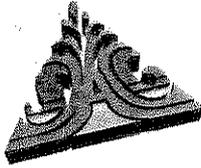
I.2 El agua y el ciclo hidrológico

En la Tierra, el agua está presente en un espacio denominado hidrosfera, que se extiende unos 15.000 m hacia la atmósfera y unos 1.000 m por debajo de la litosfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrosfera en un laberinto de caminos que constituye el denominado ciclo hidrológico.

Figura 1.1



El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin ya que sus diversos procesos ocurren en forma continua. En la Figura 1.1 se muestra en forma esquemática los procesos principales envueltos en dicho ciclo: la evaporación del agua desde los océanos y desde la superficie terrestre, el transporte del vapor de agua en la atmósfera hasta que se eleva, condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos, y finalmente, como el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, o infiltrarse en él y



moverse a través del suelo como flujo subsuperficial, alcanzando finalmente los océanos.

Si bien el concepto de ciclo hidrológico en su expresión gráfica resulta simple, es un fenómeno complejo e intrincado, ya que más allá que se presenta con un enfoque de ciclo global, está compuesto de muchos ciclos interrelacionados de extensión continental, regional y local. La hidrología de una región está determinada por sus patrones de clima, la topografía, la geología y la vegetación. A medida que las actividades humanas intervienen en el ambiente se altera el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico generando nuevos procesos y eventos, que según su magnitud podrán desencadenar cambios en la circulación hidrológica local.

En un enfoque global, el volumen total de agua en el ciclo hidrológico permanece esencialmente constante, pero la distribución de esta agua está cambiando continuamente en continentes, regiones y cuencas locales de drenaje. En la Tabla 1.2 se muestra el balance anual global de agua

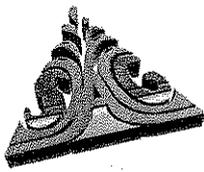
Tabla 1.2

| Tabla 2 - Balance anual de agua global | | | |
|--|------------------------|-------------|-------------|
| | | Océano | Tierra |
| Área (Km ²) | | 361.300,000 | 148,800,000 |
| Precipitación | (km ³ /año) | 458,000 | 119,000 |
| | (mm/año) | 1,270 | 800 |
| | (pulg/año) | 50 | 31 |
| Evaporación | (km ³ /año) | 505,000 | 72,000 |
| | (mm/año) | 1,400 | 484 |
| | (pulg/año) | 55 | 19 |
| Escorrentía hacia los océanos | | | |
| Ríos | (km ³ /año) | — | 44,700 |
| Agua subterránea | (km ³ /año) | — | 2,200 |
| Escorrentía total | (km ³ /año) | | 47,000 |
| | (mm/año) | | 316 |
| | (pulg/año) | | 12 |

Tabla de World Water Balance and Water Resources of the Earth, Copyright UNESCO. 1978

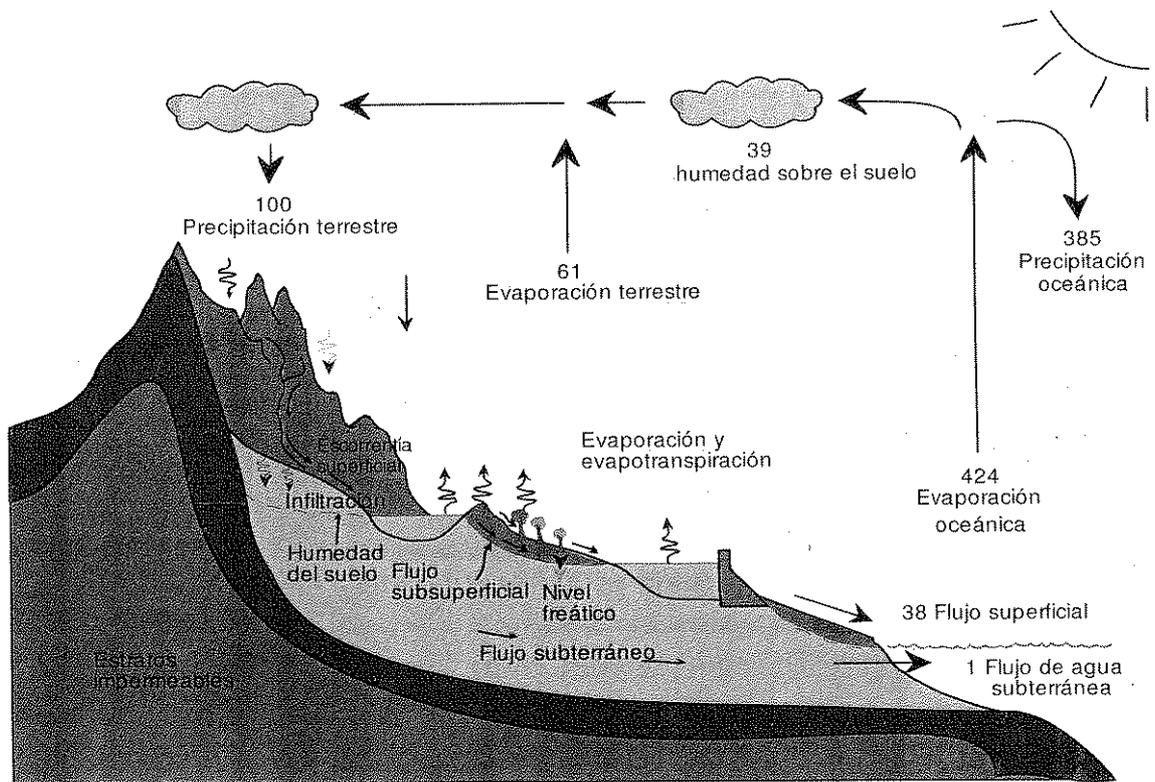
Las masas de agua generan efectos sobre el clima a causa que las mismas absorben y ceden el calor más lentamente que la tierra. En zonas costeras, llegado el atardecer se puede observar que el continente se enfría rápidamente, mientras que el agua mantiene el calor absorbido durante el día, razón por la cual se generan climas más suaves ya que se amortiguan las temperaturas extremas que se generan entre el día y la noche, o entre las estaciones del año. De esta manera, las grandes masas de agua, mares y océanos, actúan como reguladores de la temperatura en el planeta, con una fuerte incidencia en los patrones de circulación atmosférica.

En la Figura 1.2 se ilustra los principales componentes en unidades relativas a un volumen anual en precipitación terrestre de 100. Puede verse que la evaporación desde la superficie terrestre consume el 61% de esta precipitación, y el restante 39% conforma la escorrentía hacia los océanos, principalmente como agua superficial. La evaporación desde los océanos constituye cerca del 90% de la



humedad atmosférica. El análisis del flujo y almacenamiento de agua en el balance global de agua da una visión de la dinámica del ciclo hidrológico.

Figura 1.2



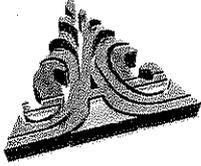
Modificado. Base gráfica Ven Te Chow - Hidrología Aplicada -1994

Las componentes principales del ciclo hidrológico son la evapotranspiración, la precipitación y el almacenamiento-escorrimento-infiltración sobre el continente.

Evapotranspiración

La mayor parte del proceso de evaporación se genera sobre la superficie del mar, especialmente en las zonas cálidas, y consiste en que el agua en forma de vapor se incorpora al sistema atmosférico. Los factores que afectan la velocidad de evaporación son la rapidez con que se le suministra el calor al líquido, la agitación a la que se somete a éste para llevar moléculas a la superficie y que tengan la suficiente energía para escapar y la velocidad a la cual se renueva el vapor que se halla encima del líquido.

Por otra parte tenemos el proceso de evapotranspiración de los seres vivos, principalmente las grandes masas forestales, que también aportan vapor de agua a la atmósfera. La transpiración es el proceso por el que el agua es absorbida por las raíces, transportada a través del cuerpo de ellas y evaporada en las superficies de la planta, especialmente de las hojas, al aire circundante.



Precipitación

El aire cargado de vapor asciende a las capas frías de la atmósfera, donde la disminución de la temperatura produce el efecto de condensación. La acción de ascenso del aire puede responder a efectos de choque de masas de aire frío con masas de aire caliente, a factores orográficos o por efectos de convección.

En las capas altas de la atmósfera el aire se enfría, el vapor de agua se condensa pasando a la fase líquida comenzando un proceso de aglomeración, y dependiendo de la temperatura ambiente se pueden formar cristales de hielo. Las gotas de agua van creciendo hasta que alcanzan el tamaño suficiente para que el efecto de la gravedad provoque su descenso bajo diferentes estados (agua, nieve o cristales de hielo)

Almacenamiento, escurrimiento e infiltración

La precipitación sobre la superficie de la tierra puede seguir diferentes caminos antes de volver al inicio del ciclo. Una parte del agua será aprovechada por los seres vivos, vegetales y animales quedando almacenada en ellos, o será almacenada en la superficie continental en lagos o embalses. Otra parte sigue su camino hacia el mar por medio de la escorrentía, utilizando las vías de drenaje superficial que se han conformado en el transcurso del tiempo, como las cañadas, arroyos y ríos. Finalmente, parte del agua filtra hacia el subsuelo formando escorrentía subterránea, pasando parte del agua precipitada a formar parte del almacenamiento subterráneo (acuíferos).

El sistema de escorrentía, infiltración y almacenamiento es muy dinámico ya que existe normalmente un flujo continuo entre sus componentes. Por este motivo es que en muchas zonas existen ríos que desaparecen, pasando a formar ríos subterráneos y aparecen nuevamente más adelante, y existen los ríos con agua permanente a pesar de períodos de seca, ya que presentan un flujo de base alimentado por el escurrimiento subterráneo.

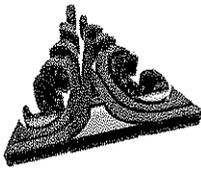
I.3 Ciclo hidrológico y el agua subterránea

La mayor parte del agua dulce está en reservorios subterráneos o como hielo en las capas polares y la nieve permanente de las grandes montañas. Solo una pequeña cantidad del agua dulce forma parte activa en el ciclo hidrológico y por tanto entra en interrelación con la biota y el conjunto de actividades antrópicas que se desarrollan sobre los continentes.

El agua que forma el sistema atmosférico precipita bajo diferentes formas (lluvia, granizo, nieve) y entra en contacto con la superficie continental. A partir de dicho momento el agua continental está en permanente movimiento, ya sea en forma rápida a través del fenómeno de evapotranspiración y de escorrentía superficial, o en forma lenta en caso que la misma se incorpore en zonas frías bajo forma de nieve o glaciares, o al flujo subterráneo.

Por tanto se puede considerar que el flujo de agua en los continentes presenta escalas temporales diferentes: por un lado encontramos la lentitud del flujo subterráneo, que hace que el subsuelo se constituya en el principal reservorio de agua dulce, y por otro la velocidad del escurrimiento superficial formado por el excedente de precipitación que no pudo infiltrar hacia los reservorios subterráneos, y la que será devuelta a la atmósfera a través del proceso de evapotranspiración.

Para que el agua ingrese a los reservorios subterráneos se debe desarrollar el proceso de infiltración, el cual está relacionado con un conjunto importante de



variables, entre ellas la intensidad con que se desarrolla el fenómeno de precipitación, y un conjunto de características intrínsecas a la zona como lo son la edafología, la geología y las condiciones topográficas.

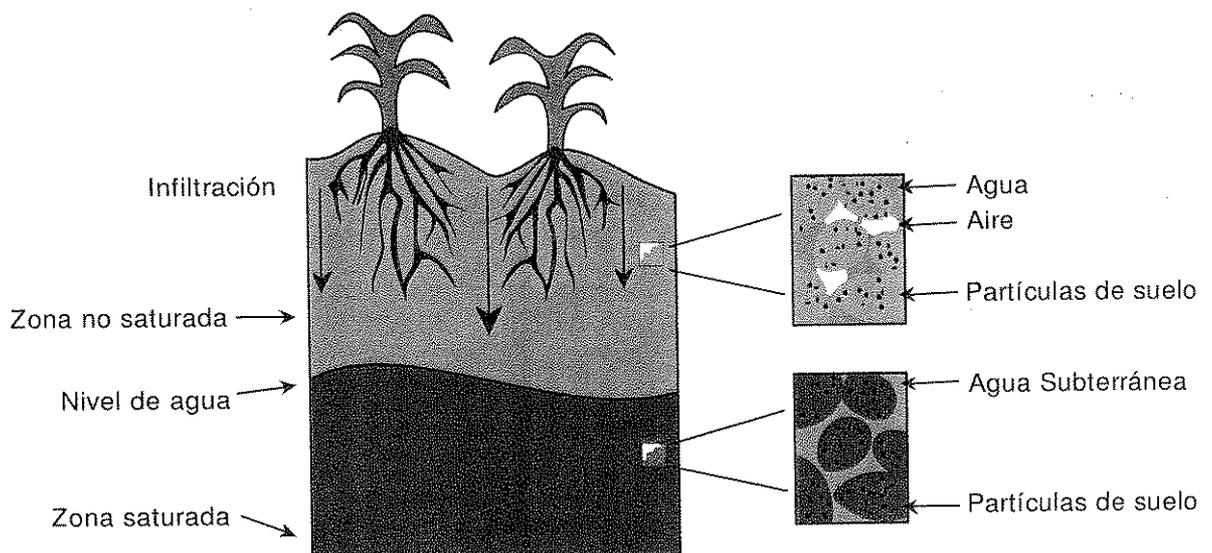
Analizando la cobertura vegetal, cuanto mayor es la misma mayor es la capacidad de infiltración. En tanto, según sean las propiedades geológicas del subsuelo y en especial su porosidad, se tendrá mayor o menor capacidad de admitir el flujo de agua a través del mismo. Finalmente, considerando la topografía, las fuertes pendientes del terreno favorecen el escurrimiento superficial, en tanto que en zonas planas el escurrimiento es más lento y ofrece mejores posibilidades para que el agua infiltre hacia el subsuelo

Generalmente, el subsuelo presenta la parte superior con características de "zona no saturada" ya que el agua no ocupa plenamente el volumen de poros del suelo. En tal situación el flujo a través del suelo es esencialmente vertical, y según las condiciones climáticas podrá ser "empujado hacia abajo" por los efectos de la gravedad (durante eventos de precipitación), o "impulsado hacia arriba" (flujo capilar) como resultado de los procesos de evaporación.

Ya por debajo de los 5 m de profundidad desaparece el efecto capilar y se considera que todo el flujo no saturado es descendente, pudiendo incidir en dicha zona la vegetación con raíces profundas que pueda absorber agua profunda.

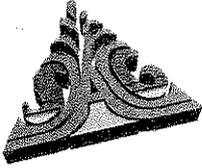
Cuando el flujo vertical encuentra la presencia de una capa impermeable, se genera un efecto de almacenamiento del agua en el suelo llenando por completo los poros y generando una zona saturada que representa el almacenamiento de agua en el subsuelo. En la figura 1.3 se puede apreciar las condiciones descritas anteriormente.

Figura 1.3



**Modificado. Base gráfica - Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro
Instituto Geológico e Mineiro - 2001**

La capacidad de almacenamiento en el subsuelo está relacionada con sus características geológicas, y en especial con una de sus propiedades que se llama porosidad, definida como el porcentaje del volumen total de un suelo o de una roca que se encuentra ocupado por aire o agua.



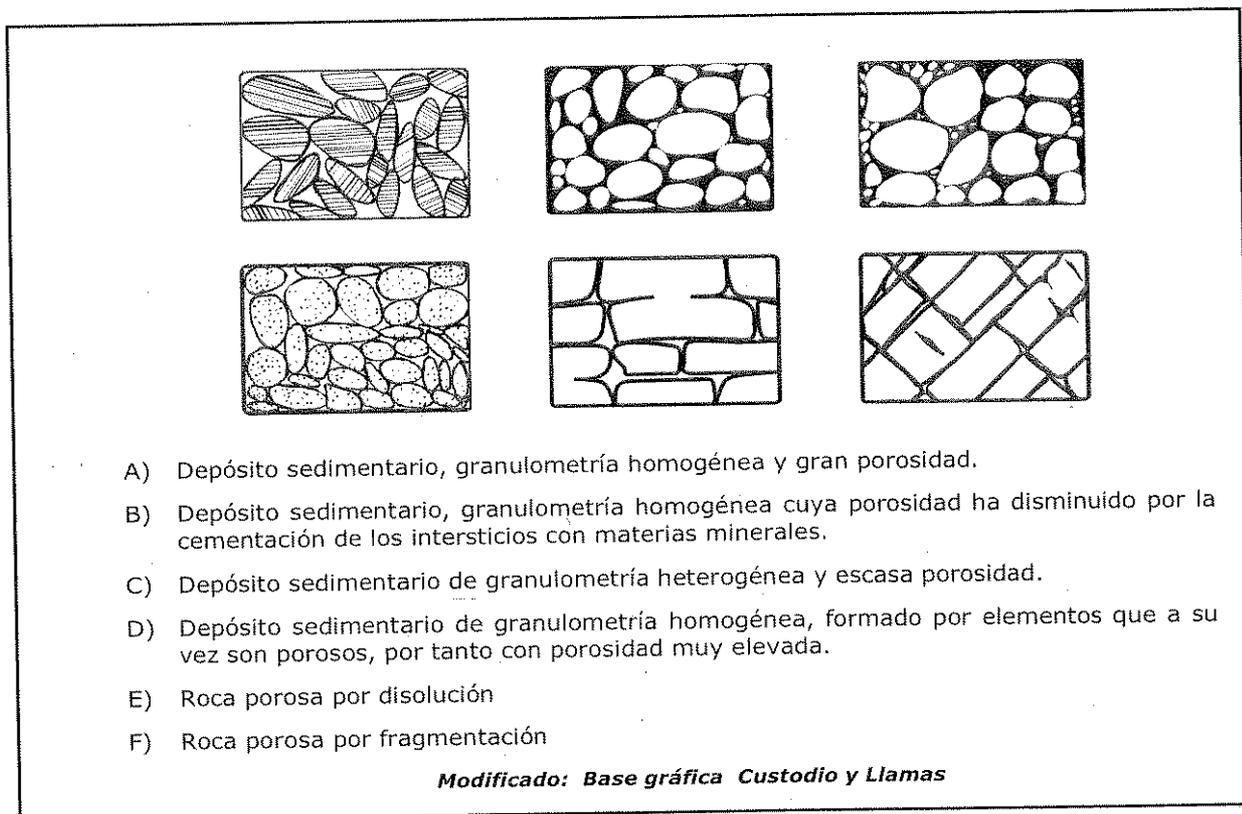
$$\text{porosidad} = \frac{\text{volumen de poros}}{\text{volumen total}} \%$$

Si una roca o suelo contiene muchos poros se dice que conforma un "medio poroso". Si los poros tienen su origen en la génesis de la roca, se dice que esa roca tiene una porosidad primaria (depósitos sedimentarios, rocas meteorizadas). Cuando el origen de los poros está asociado a un evento posterior (disolución, fallas o juntas geológicas) se le llama porosidad secundaria. La Figura 4 permite apreciar en forma esquemática distintos tipos de roca indicando la relación entre su textura y porosidad.

La mayoría de las rocas sedimentarias tienen porosidad primaria y a su vez contienen algunas juntas o fallas que le agregan una porosidad secundaria a la porosidad total del medio.

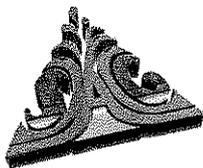
En forma similar las rocas densas (granitos y cuarcitas) pueden tener cierta porosidad primaria la cual está "opacada" por la porosidad secundaria. Ocasionalmente los efectos de ambas porosidades pueden ser reorganizados en el comportamiento de un único cuerpo de agua subterránea a este fenómeno se lo llama porosidad dual.

Figura 1.4



I.4 Usos del agua

El agua ha sido históricamente un motor constante en el desarrollo de las civilizaciones, condicionando el desarrollo del hombre en las grandes ciudades. Su



importancia se mantiene hasta el presente, y tiene asociado un conjunto importante de usos, destacando los siguientes:

- como recurso natural
- como fuente de suministro
- como medio de transporte
- como medio receptor de otros flujos hídricos
- como fuente y medio receptor de energía térmica y mecánica.
- como fuente de energía geotérmica

I.4.1 El agua como recurso natural.

El agua se caracteriza por su gran movilidad y por el hecho de ser uno de los medios naturales con más actividad de la biosfera. Su régimen hidráulico, torrencial o lento, y la interacción con el territorio que le rodea marcan el proceso en el tiempo y la evolución física, química y biológica.

Los seres vivos que habitan en el agua se han adaptado a las condiciones naturales de ésta, de manera que son capaces de soportar las variaciones tanto de calidad como de cantidad de este medio sin que su presencia produzca habitualmente efectos perniciosos sobre el mismo recurso hídrico.

Por otro lado, las actividades humanas han sido la causa en algunos casos de modificaciones más intensas y rápidas que las registradas en el pasado en estos medios naturales, con consecuencias desfavorables tanto para el recurso en sí como para los seres vivos que dependen de él.

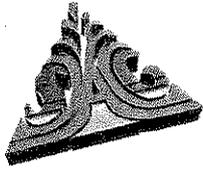
La recuperación y la preservación de la flora y de la fauna de un lecho natural pueden comportar unos niveles de calidad y un régimen de caudales tan exigentes como los que requieren otros usos del agua.

I.4.2 El agua como fuente de suministro.

El agua superficial constituye la fuente de abastecimiento más frecuente, ya sea para suministro público, riego agrícola, actividades industriales y ganaderas u otros usos. Desde esta perspectiva, las exigencias de calidad con las posibles utilidades y la disponibilidad de caudales suficientes constituyen importantes puntos de referencia.

Como apoyo se recurre a elementos para la regulación del recurso, como por ejemplo la construcción de embalses para mejorar la disponibilidad en períodos de seca, pero dichos sistemas pueden afectar la calidad química y biológica con el desarrollo de procesos como la eutrofización. Generalmente el uso del agua subterránea como fuente de suministro queda reservada para zonas en las que el recurso agua superficial no es suficiente, principalmente como agua bruta para sistemas de abastecimiento de agua potable o plantas industriales.

Aunque el volumen de agua recomendado para el consumo humano es de 2 L/habitante/día, el gasto por persona no se limita a esa cantidad. La dotación de agua cuando se analiza el suministro a centros poblados es mucho más elevada, pudiendo alcanzar dotaciones hasta de 200 L/habitante/día incluyendo la globalidad de gastos de agua que se generan en una vivienda (servicios higiénicos, duchas, lavado de ropa, etc.).



A nivel industrial el consumo de agua es muy variable y depende del tipo de actividad y del grado de modernidad de las instalaciones, así como la cultura de racionalización del gasto del agua que tenga la empresa y sus empleados.

Para el suministro de agua para el ganado es natural que se recurra al uso de abrevaderos naturales, o a la construcción de pequeños tajamares, priorizando por tanto el uso del agua superficial. No obstante en algunos establecimientos es posible encontrar bebederos para animales abastecidos por medio de perforaciones, con sistemas de corte como para racionalizar el uso del agua.

El uso del agua para riego estará relacionado con las condiciones de precipitación natural de las zonas y la demanda hídrica de cada cultivo. La tendencia principal en el uso del agua para riego es a través del aprovechamiento de las aguas superficiales, recurriendo a la acumulación en represas para disponer del recurso agua cuando la demanda hídrica de los cultivos se hace más crítica. Esta práctica es habitual en zonas con cultivos que presentan una fuerte demanda de agua como es el cultivo de arroz, el cual además está vinculado a prácticas de riego por inundación.

Las prácticas de riego por medio de agua subterránea en general se encuentran vinculadas con actividades hortícolas y frutícolas, en las que se logra una racionalización del agua a través de sistemas de riego localizados que operan en forma automatizada, suministrando al cultivo la dosis precisa tanto de agua como de nutrientes. El agua subterránea puede ser muy favorable para el sistema de riego localizado dada la baja cantidad de sólidos suspendidos que la misma posee, minimizando el riesgo de obstrucción de los equipos dosificadores.

Cuando se considera el recurso agua como fuente de abastecimiento se deberá tener presente además de la cantidad de agua necesaria su calidad, atendiendo que la misma sea adecuada acorde al uso que se pretende realizar.

I.4.3 El agua como medio de transporte y para actividades recreativas

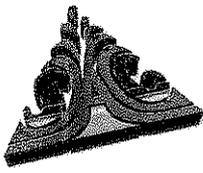
El uso del agua como medio de transporte corresponde a un uso de vital importancia si nos remontamos a la historia de las civilizaciones. El mismo tuvo roles fundamentales para el comercio y aún lo mantiene, siendo muy importante para el transporte de mercadería a nivel mundial ligado al desarrollo portuario de las ciudades, y el transporte de pasajeros

El uso como medio de transporte se realiza sobre todo cuerpo de agua que permita ser navegado, pudiendo adecuar el tipo de embarcación a las características del cuerpo de agua.

En cuanto a las actividades recreativas, se desarrolla un conjunto importante de actividades náuticas en embarcaciones, pero también otro conjunto de deportes acuáticos incluyendo las actividades de recreo de los bañistas, en la cual los usuarios entran en contacto con el agua. En este tipo de uso, el de actividades recreativas cuando las mismas implican contacto directo con el agua, es que será de interés tener presente la calidad de agua del recurso, para evitar adquirir enfermedades (presencia de agentes patógenos).

I.4.4 El agua como medio receptor de otros flujos hídricos

La consideración del agua como un medio físico para transportar y asimilar buena parte de la carga contaminante generada por sus usuarios ha hecho que el equilibrio físico, químico y biológico de ésta se vea ampliamente superado en ciertas condiciones, y que llegue a un nivel de deterioro inaceptable en ciertos



casos. Este concepto es aplicable tanto para los recursos de agua superficial como subterránea, ya que en general se realizan prácticas de disposición de efluentes líquidos tanto con vertido a cursos de agua superficial como por infiltración al terreno.

El concepto de autodepuración vendría de esta manera a designar la capacidad de un medio natural, en este caso las aguas superficiales, de recibir determinado aporte de sustancias o energía, sin llegar a experimentar modificaciones significativas de su calidad.

La controversia surge cuando se entra a analizar el grado de significación de las modificaciones, como por ejemplo las que afectan al oxígeno disuelto, la productividad biológica o el enriquecimiento de determinadas sustancias, sumado al problema que el vertido de materia orgánica pueda tener asociado otros contaminantes de tipo persistente o metales pesados.

El uso de los recursos hídricos como receptor de efluentes líquidos en general es un uso definido en la legislación de los países, como alternativa para la disposición de los efluentes sean de tipo doméstico o industrial, regulando los países los límites máximos permitidos para el vertido y analizando como los mismos repercuten en un curso de agua.

I.4.5 El agua como fuente y medio receptor de energía

La creación de las diversas técnicas de generación de energía se ha desarrollado entre el equilibrio de la demanda de los recursos naturales y la necesidad de conservarlos, al mismo tiempo que se protege la vida que se desenvuelve en ellos.

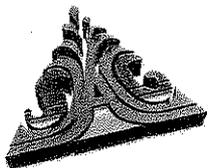
Dentro de este marco, las aguas superficiales constituyen un medio insustituible a la hora de generar energía por medio de centrales hidroeléctricas, así como un elemento físico para el transporte de energía térmica.

La utilización de las aguas superficiales para estos fines puede alterar el equilibrio natural tanto de forma directa, por la variación del caudal o la temperatura, como de forma indirecta, por los efectos derivados de la regulación en embalses o el régimen de circulación forzada a que se pueden ver sometidas. El impacto ambiental de los embalses, por ejemplo, hace que su presencia sea causa de controversia.

Un caso similar es el de las centrales térmicas que provocan la subida de las temperaturas de las aguas superficiales. Estos efectos sobre el medio ambiente hacen que su ubicación y potencia se vean limitadas, afectando con ello tanto los costes de inversión como de producción de energía eléctrica. Así también se introduce un elemento diferenciador entre países que influye en sus posibilidades de desarrollo.

I.4.6 Geotermia de las aguas subterráneas

El agua subterránea también es utilizada como fuente y medio receptor de energía térmica. La geotermia es una fuente de energía renovable ligada a volcanes, géiseres, aguas termales y zonas tectónicas geológicamente recientes, es decir, con actividad en los últimos diez o veinte mil años en la corteza terrestre. Para obtener esta energía se necesitan yacimientos de agua caliente. El suelo se perfora y se extrae el líquido, que saldrá en forma de vapor si su temperatura es suficientemente alta y se podrá aprovechar para accionar una turbina que con su rotación mueve un generador que produce energía eléctrica. El agua utilizada se



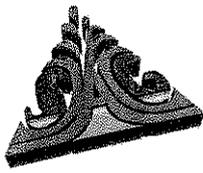
devuelve posteriormente al subsuelo, mediante un proceso de inyección, para ser recalentada, mantener la presión y sustentar la reserva.

Se trata de un uso con proyección creciente en los últimos años, ya que entre los años 1995 y 2002 la potencia geotérmica instalada en el mundo creció de manera continuada pasando de casi 6.840 a más de 8.350 Mw, lo que representa un aumento de un 22,3% en ese periodo.

El aprovechamiento del campo geotérmico estará ligado a la temperatura con la que sale el agua, distinguiendo 3 niveles:

- Energía geotérmica de alta temperatura: en zonas activas de la corteza terrestre, donde la temperatura está comprendida entre 150 y 400°C y se produce vapor en la superficie.
- Energía geotérmica de temperaturas medias: el agua de los acuíferos están a temperaturas menos elevadas, normalmente entre 70 y 150°C, por lo cual la conversión vapor-electricidad se realiza con un menor rendimiento.
- Campo geotérmico de baja temperatura: el agua se calientan a temperaturas comprendidas entre 20 y 60°C, y la energía se puede utilizar para necesidades domésticas, urbanas o agrícolas.

El caso del acuífero Guaraní se considera que posee un campo geotérmico de baja temperatura en áreas geológicamente estables. El agua se calienta a temperaturas de hasta 80 a 90 grados y la energía se puede utilizar para necesidades domésticas, urbanas o agrícolas. Estas temperaturas máximas son las que se encuentran en las zonas termales definidas actualmente en el Acuífero Guaraní. La fuente de calor del mismo es por gradiente geotérmico natural (promedialmente la temperatura en la corteza terrestre aumenta 3 grados cada 100 metros de profundidad), conservando el agua subterránea sus propiedades químicas originales.



II. EL FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA²

II.1 Los Acuíferos

II.1.1 ¿Que es un acuífero?

La palabra **Acuífero** proviene del latín, de las palabras *aqua* que significa agua y *fero* que significa llevar. En hidrología subterránea se denomina acuífero a un estrato o formación geológica que permite la circulación de agua por sus poros o grietas, y que permite que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para sus necesidades.

El concepto del aprovechamiento económico del agua del subsuelo, aún siendo relativo en si mismo (ya que puede ser tan importante la obtención de grandes cantidades para un industria como pequeñas cantidades para los habitantes de un pequeño poblado), sugiere la idea que en realidad no existen formaciones geológicas que puedan considerarse totalmente impermeables.

Por tal motivo, existe un conjunto de términos que caracterizan a las formaciones geológicas acorde a sus propiedades relacionadas al almacenamiento de agua y a la posibilidad de flujo en las mismas

Algunas formaciones contienen agua en su interior pero no la transmiten y por lo tanto no es posible su explotación, y se denominan **Acuícludo** (del latín *claudere = encerrar*), siendo el caso de depósitos de materiales arcillosos de origen deltaico y/o estuario, que a pesar de poseer agua en su matriz no son hidrogeológicamente aptos para la construcción de captaciones de aguas subterráneas.

Otras contienen apreciables cantidades de agua pero la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten un recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos. Estas formaciones se denominan **Acuitardo** (del latín *tardare = retardar*).

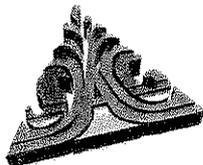
Finalmente encontramos formaciones denominadas **Acuífugos** (del latín *fugere = huir*), que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni facturación.

² La redacción de este capítulo tiene como base bibliográfica principal la siguiente:

Ken R. Rushton, Gideon P. Kruseman - Groundwater studies - 2004 Unesco Tno

J. L. Genta & F. Charbonnier - Curso de Hidrología Aplicada: Agua Subterránea - Udelar - FI - IMFIA

Carlos Amorín Cáceres - Apuntes del curso de gestión de calidad de agua - 2003

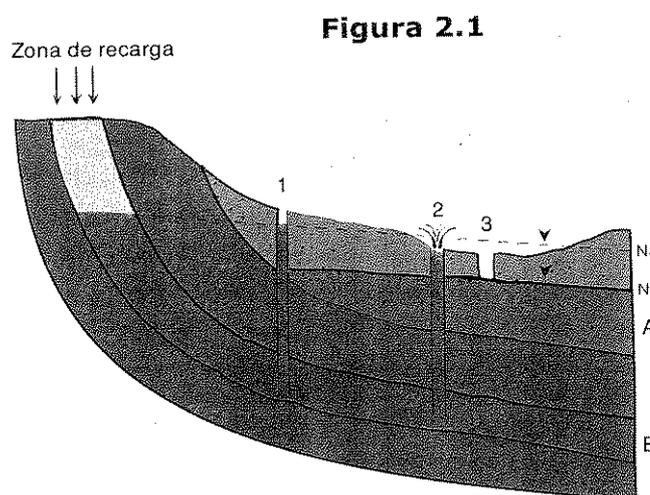


II.1.2 Tipos de acuífero

Cuando nos referimos al almacenamiento del agua en el subsuelo y sus condiciones de flujo, se puede realizar una caracterización en distintos tipos de acuífero, que se denominan libre, confinado o semiconfinado:

- **Acuífero libre o freático:** se encuentra limitado en la parte inferior por una capa impermeable, pero no se encuentra restringido por una capa confinante superior. La frontera superior es la superficie freática, la cual es libre de subir o bajar.
- **Acuífero confinado:** el agua se encuentra a presión y llena completamente todos los poros de la formación geológica, la cual se encuentra limitada en la parte superior e inferior por capas impermeables.
- **Acuífero semiconfinado:** Según algunos autores pueden considerarse como un caso particular de acuífero confinado. Se encuentran limitados en la parte superior e inferior por acuitardos, o uno de ellos es un acuitardo y el otro un acuicludo. El acuitardo que limita la parte superior y/o la inferior, esta compuesto de un material que permite la filtración vertical de agua, la cual, a pesar de ser muy lenta, permitiría la entrada o salida de agua del acuífero desde o hacia otros acuíferos.

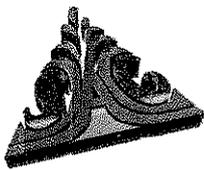
La Figura 2.1 ejemplifica el comportamiento de un acuífero libre y un confinado. Una forma de interpretar las diferencias entre los tipos de acuífero es estudiando su comportamiento al momento de realizar perforaciones para su estudio o la extracción de agua subterránea.



REFERENCIAS

- A) Acuífero confinado
- B) Acuífero libre
- Na) Nivel piezométrico del acuífero confinado
- Nb) Nivel piezométrico del acuífero libre
- 1) Pozo no surgente en un acuífero confinado
- 2) Pozo surgente en un acuífero confinado
- 3) Pozo en un acuífero libre

Modificado: Base gráfica Custodio y Llamas



El pozo realizado en la ubicación 3, corresponde a un pozo que se desarrolla dentro de un acuífero libre. Al momento que se realiza la perforación y se alcanza el nivel de agua, dado que en el acuífero libre el agua se encuentra a presión atmosférica permanece en el nivel al que se la encuentra perforando.

La situación es diferente en los pozos ubicados en los puntos 1 y 2 (Figura 2.1), que se realizan atravesando el acuífero libre hasta alcanzar el acuífero confinado. En los acuíferos confinados, el nivel de carga hace que en los piezómetros el agua alcance niveles superiores al "techo" del acuífero.

O sea, si se está realizando una perforación se observará el fenómeno que al momento de atravesar la capa impermeable que lo confina superiormente, el nivel del agua en el pozo comenzará a subir hasta alcanzar su nivel piezométrico. En tal caso, puede darse la situación que si la presión en el acuífero es tal que el nivel piezométrico se encuentra por encima del nivel del terreno (pozo 2), el agua comenzará a salir de la perforación en forma espontánea. Estos pozos se conocen como pozos surgentes, y un ejemplo del mismo se puede apreciar en la fotografía siguiente.



Pozo surgente – Santana do Livramento
Fuente: Sitio Web Proyecto Sistema Acuífero Guarani

II.1.3 Las formaciones geológicas como acuíferos

No todas las formaciones geológicas, rocas en general, poseen, la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua en cantidades apreciables económicamente. Las diferencias, en este aspecto, entre los aluviones de río y un macizo granítico poco alterado son bien evidentes.

Generalmente los depósitos no consolidados de materiales como arena, gravas, mezcla de ambos, etc., son los que constituyen la base de acuíferos de buena productividad, pudiendo tener origen fluvial (cauces de ríos y arroyos y sus terrazas), deltaico (en la desembocadura de los ríos) o sedimentario (acumulación por efecto del transporte del viento, hielo, etc)

Presentan buenas condiciones para la recarga de agua, buena permeabilidad y en general poca profundidad del nivel piezométrico (nivel al cual se encuentra el



agua en condiciones de flujo natural), por lo cual suelen dar notables caudales de agua si se explotan convenientemente.

De las rocas sedimentarias consolidadas la más importante es la caliza, que encierra el 95% de las aguas subterráneas. Es una roca formada casi exclusivamente por carbonato de calcio, que varía enormemente la densidad, porosidad y permeabilidad, de acuerdo con el ambiente sedimentario y el desarrollo posterior de las zonas permeables por disolución de carbonatos. El fenómeno de disolución de carbonatos puede ser tan grande que llega a formarse verdaderos ríos subterráneos (los famosos "carst") y toda una morfología especial en los que en algunos casos no cabe hablar de conceptos de hidrología subterránea como "transmisibilidad y permeabilidad" por las grandes dimensiones de las fisuras. Sin embargo estas rocas si no están carstificadas suelen ser poco permeables.

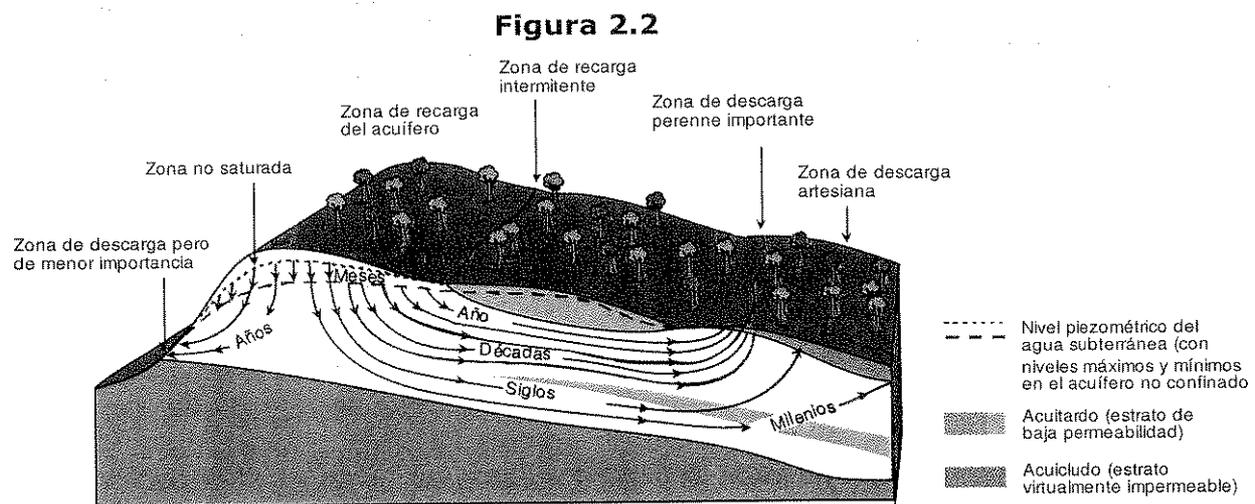
Los conglomerados y areniscas, considerados como gravas y arenas cementadas, ven disminuida su porosidad y permeabilidad a causa del cemento que las une y les da cohesión. De todos modos, si se desarrollan procesos de disolución química del cemento o hay zonas donde no se generó el relleno total de los poros intergranulares, pueden ser objeto de explotación como acuífero.

En las rocas volcánicas es difícil establecer una clasificación respecto a su comportamiento acuíferos, ya que depende de las características físicas y químicas y de las propiedades de la roca y de la erupción que las originó, del grado de alteración, la edad, etc., encontrando por ejemplo que se generó a partir de lava esponjosa con grandes intersticios puede constituir excelentes acuíferos.

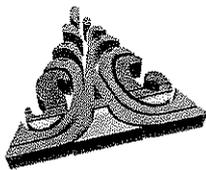
Finalmente, en las rocas ígneas y metamórficas la única posibilidad de formar acuíferos reside en la zona alterada superficial o en las regiones muy fracturadas por fallas y diaclasas, que permitan una apreciable circulación de agua, pero de todos modos, constituyen los peores acuíferos en cuanto a rendimiento en caudal. Como antes se ha indicado, cuando ambos tipos de rocas están poco o nada alterados pueden considerarse como acuífugos

II.2 El Flujo del agua subterránea

A diferencia de lo que muchas personas creen, la mayor parte del agua subterránea se encuentra en continuo movimiento a través del suelo, desde las zonas de recarga a las de descarga.



Modificado: Base gráfica *Las Aguas Subterráneas en el Desarrollo Urbano*
Documento Banco Mundial N° 390



Por lo general esta circula muy lentamente, cien metros por año es un típico promedio de velocidad horizontal y un metro por año es una típica velocidad vertical, por lo tanto el agua puede pasar decenas, centenares o incluso miles de años en esta parte subterránea del ciclo hidrológico. Los tiempos de circulación de agua Como forma de ilustrar este fenómeno se presentan la Figura 2.2 en las que se encuentra esquematizado el flujo de agua subterránea, asociando al mismo la "edad" esperada para una región húmeda.

A pesar de las bajas velocidades del agua subterránea, cuando se considera la extensión de los reservorios y se multiplica la velocidad por las áreas a través de las cuales se da el flujo, se encuentra que las cantidades de agua involucradas son generalmente significativas, constituyendo importantes reservas de agua dulce.

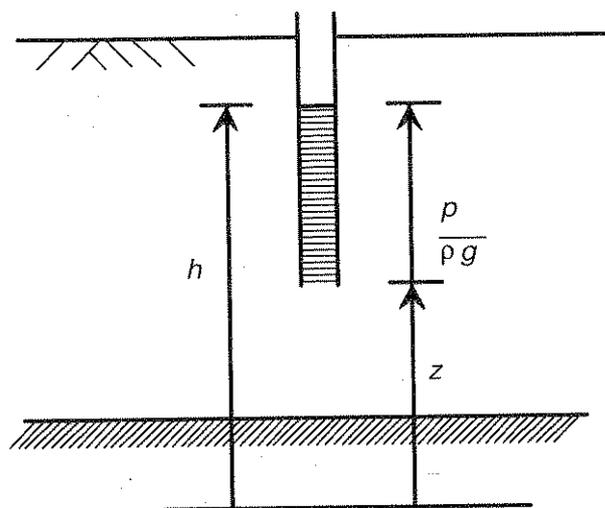
En los reservorios de agua subterránea la superficie del agua (nivel freático) no es horizontal ya que el agua está en movimiento, por lo cual requiere de la energía necesaria para vencer la resistencia para fluir a través del medio poroso que caracteriza al acuífero que la contiene.

El flujo de agua subterránea es un proceso importante y su estudio puede llegar a ser muy complejo pues se requiere un conocimiento detallado del tipo y características del acuífero de la zona, encontrando la dificultad que no puede ser medido en forma directa por lo que se requiere una forma alternativa para identificar las condiciones de flujo.

La forma de determinar el movimiento del agua es a través del estudio de su "**carga hidráulica**", también llamada potencial del agua subterránea, piezometría o simplemente carga.

La carga en un punto del acuífero corresponde a la altura hasta la cual el agua se alzaría si se instalara allí un pozo de observación (también llamado piezómetro). La magnitud de la carga del agua subterránea es igual a la carga por presión más el valor de la cota, según se ilustra en la Figura 2.3.

Figura 2.3



Modificado: Base gráfica Ken R. Rushton, Gideon P. Kruseman - Groundwater studies - 2004
Unesco Tno

El flujo de agua subterránea se genera desde los lugares con mayor carga hacia los de menor carga, y hay que estar atentos porque el flujo subterráneo no tiene por qué comportarse siempre de la misma manera que lo hace el flujo



superficial, flujo a superficie libre, donde el agua generalmente escurre de las zonas de terreno más altas hacia la mas bajas.

Las figuras 2.4 y 2.5 esquematizan un acuífero confinado en el cual hay dos piezómetros para identificar la dirección del flujo. En la figura 2.4 el flujo se da de izquierda a derecha porque el piezómetro con menor carga es el de la derecha. En este caso se da la situación que el agua circula en la dirección de la pendiente de los estratos que definen al acuífero.

Figura 2.4

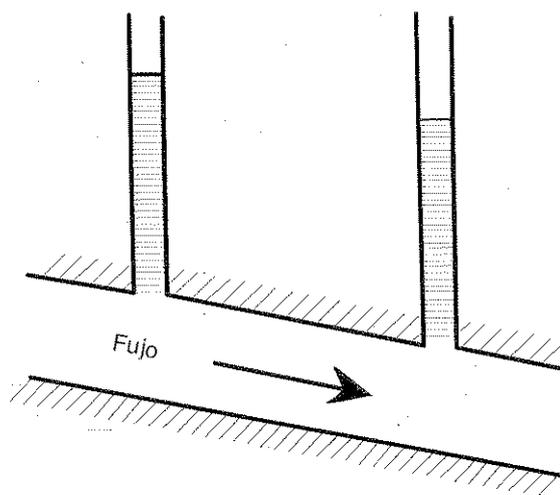
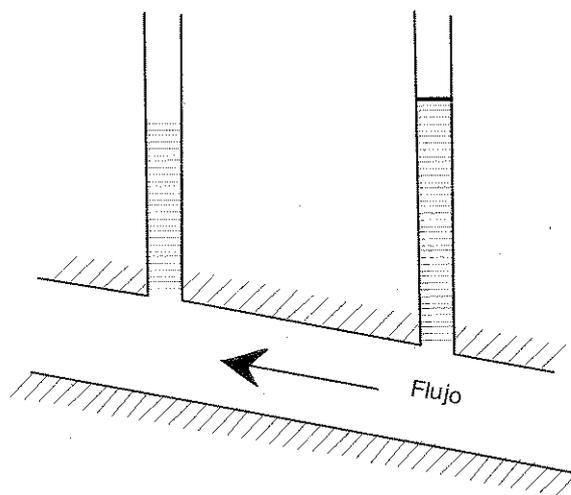
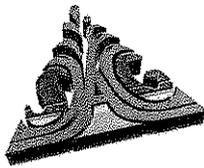


Figura 2.5



**Modificado: Base gráfica Ken R. Rushton, Gideon P. Kruseman - Groundwater studies - 2004
Unesco Tno**

En la figura 2.5 el agua subterránea circula hacia la izquierda, ya que el piezómetro con menor carga es el de la izquierda, por lo cual circula en contra de la dirección de la pendiente del estrato.



II.2.1 Cálculo del flujo de agua

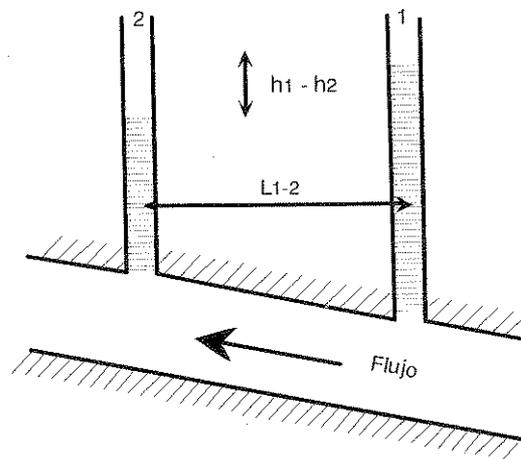
El flujo de agua subterránea en un acuífero es un concepto vinculado con la velocidad con que se mueve y el espesor del acuífero que se encuentra saturado. La velocidad puede ser determinada por la ecuación de Darcy :

$$v = -K \cdot i$$

donde K es la conductividad o permeabilidad, e i es el gradiente hidráulico entre los dos piezómetros (el signo de menos significa que el flujo es en la dirección en que disminuye el gradiente hidráulico).

Se llama gradiente hidráulico " i " entre dos puntos, a la diferencia de carga que existe entre los mismos dividida entre el valor de la distancia que los separa, según se puede apreciar en el esquema de la figura 2.6.

Figura 2.6



$$\text{gradiente} = i = \frac{h_2 - h_1}{L_{12}}$$

Modificado: Base gráfica Ken R. Rushton, Gideon P. Kruseman - Groundwater studies - 2004
Unesco Tno

La velocidad de Darcy es una "velocidad artificial" ya que asume que el flujo ocurre a través de toda la sección. En realidad el flujo ocurre solo a través de ciertos poros y fisuras, por lo tanto la verdadera velocidad puede ser determinada dividiendo la velocidad de Darcy por la porosidad efectiva.

Dentro de los estudios regionales de agua subterránea, una magnitud importante es el flujo horizontal que circula a través del acuífero. Este flujo puede ser calculado por: $Q_h = -T \cdot i$

donde T es la transmisibilidad, que se obtiene mediante el producto de la conductividad hidráulica K por el espesor saturado b cuando el medio es homogéneo. Cuando se trata de un flujo que se desarrolla un medio no homogéneo con varias diferentes de estratos geológicos, se utiliza una transmisibilidad que es el resultado de la suma las transmisibilidades de todas las capas.

La conductividad hidráulica corresponde a un valor que caracteriza a los acuíferos, por lo cual definida la característica geológica de un acuífero en cuanto al tipo de material geológico que lo compone, se puede asociar al mismo un valor K de conductividad, con lo cual se le está asignando un valor respecto a sus propiedades de conducción de agua.



La Tabla 2.1 presenta valores de conductividad para diferentes tipos de materiales geológicos con una valoración desde el punto de vista de las propiedades de drenaje.

Tabla 2.1

| Tipo de suelo | K (cm/s) | Drenaje |
|----------------------|---------------------|------------------|
| Gravas limpias | $10^2 - 10^{-1}$ | Bueno |
| Arena Gruesa | $10^{-1} - 10^{-2}$ | Bueno |
| Arena Mediana | $10^{-3} - 10^{-4}$ | Bueno |
| Arena Fina | $10^{-4} - 10^{-5}$ | Regular |
| Arena Limosa | $10^{-5} - 10^{-6}$ | Malo |
| Arcilla Limosa | $10^{-6} - 10^{-9}$ | Casi Impermeable |
| Arcilla | $< 10^{-9}$ | Casi Impermeable |

II.2.2 Entrada, salida y almacenamiento

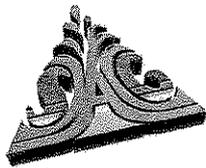
El estudio del movimiento del agua subterránea (o flujo) requiere la delimitación de un área de estudio y la información sobre los flujos de entrada y salida.

Se le llama **recarga** a todo el flujo de entrada que penetra en el acuífero. La recarga puede provenir de la lluvia, la irrigación o de varios tipos de cuerpos de agua como ríos, canales o lagos. Como concepto importante se destaca la definición del "**área de recarga**" de los acuíferos, pues como será analizado más adelante, son las zonas que se debe prestar atención a los efectos de preservar la calidad del agua.

Los flujos de salida de un acuífero pueden ser divididos en dos grupos, las salidas naturales y las salidas inducidas por el hombre. Las salidas naturales ocurren cuando el agua abandona el acuífero a través de manantiales, descargando hacia un río o hacia otros acuíferos, o humedeciendo zonas bajas donde se desarrollan humedales donde la salida del agua del acuífero está asociada al efecto de evapotranspiración de dichas zonas.

Las salidas inducidas por el hombre (perforaciones principalmente) están asociadas a usos específicos del agua, generalmente a través de bombeo en los pozos o perforaciones, y existe una gran variedad de diseños de pozos dependiendo del tipo de acuífero y el caudal que se deba a extraer. Estas salidas requieren de un adecuado proyecto y planificación de la explotación, como forma que la misma no se deteriore o genere daños al acuífero.

El acuífero mantendrá un equilibrio natural de entradas y salidas de agua hasta el momento que sobre el mismo se comiencen a generar salidas inducidas, ya que las mismas incidirán generando descensos adicionales en el volumen de agua almacenada.



En períodos de alta recarga, son mayores los flujos de entrada que los de salida, por lo que la diferencia entre ellos será almacenada en el acuífero, efecto implicara inmediatamente un incremento en su nivel, lo cual incidirá en forma directa en un aumento hacia los flujo de salida natural por la mayor carga de agua.

En períodos de recarga baja o nula, el agua es drenada del almacenamiento, por lo cual la quita de importante cantidades de agua podrían a llevar a descensos importantes que podrían comprometer al acuífero por las salidas inducidas, si las mismas no se regulan en forma adecuada.

Debido a la importancia que tiene la variable tiempo en las respuestas de un acuífero, dado que el mismo presenta escalas temporales mayores en reflejar la respuesta global a los cambios, es importante considerarla a la hora de trabajar con datos, siendo aconsejable estudiar las condiciones del acuífero en un número considerable de años antes de realizar conclusiones sobre su comportamiento.

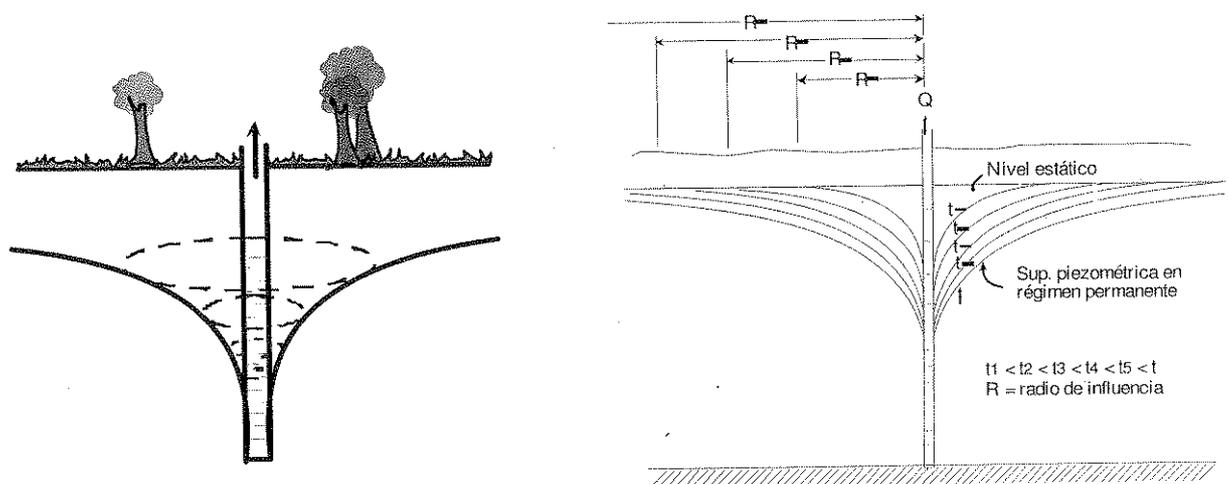
II.2.3 Extracción de agua subterránea

Se llaman captaciones de agua subterránea a toda instalación que permita poner a disposición de uso el agua contenida en los acuíferos. Existen diferentes tipos de captaciones de agua: pozos, cachimbos, drenes y zanjas, siendo los pozos la más común de todas cuando se requiere usos importantes de agua.

Los pozos consisten en una perforación vertical, en general en forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad. Si la carga lo permite, luego de perforar el acuífero el agua puede salir por sí misma generando un pozo surgente, donde no será necesario realizar bombeo. Sin embargo, en la mayor parte de los acuíferos es necesario recurrir a la colocación de bombas para suministrar la energía necesaria para levantar el agua hasta la superficie.

Durante el bombeo, el agua penetra a lo largo de las paredes creando un flujo de tipo radial. En la figura 2.7 se puede apreciar la geometría que toma la superficie del agua en torno a un pozo del cual se extrae agua, observando que la superficie piezométrica adopta la forma de un cono invertido o embudo cuyo centro se sitúa en el pozo.

Figura 2.7



Modificado: Base gráfica Custodio y Llamas

Cuando se inicia el bombeo a caudal constante en un pozo el efecto primario es un descenso en su nivel de agua, a fin de establecer el gradiente hidráulico



necesario para generar el flujo de agua desde el entorno del acuífero hacia la zona de captación (pozo). En los primeros instantes de bombeo se extrae agua del almacenamiento en los alrededores del pozo, gracias al descenso del nivel producido, y poco a poco el cono de influencia va extendiéndose de forma que la cantidad de agua producida a consecuencia del descenso del nivel iguale a la extraída por el pozo.

El período durante el cual el descenso va aumentando se llama régimen no permanente o simplemente variable (ver figura 2.7). Si el acuífero no recibe agua del exterior tal como sucede en un acuífero perfectamente confinado o en un acuífero libre en ausencia de aportes de agua de lluvia o agua superficial, todo el caudal extraído por el pozo debe proceder del almacenamiento y por lo tanto el **régimen es no permanente**. Sin embargo, debido a que el cono de influencia aumenta, en acuíferos de mayor extensión la velocidad de descenso va disminuyendo paulatinamente, hasta que llega un momento en que desciende tan lentamente que se puede aceptar a efectos prácticos que los descensos se han estabilizados y entonces se dice que ha alcanzado un **régimen casi permanente**.

Muchos acuíferos confinados pueden recibir en realidad algo de recarga a través de un límite de modo que se comportan como tales inicialmente, pero cuando el cono de descensos se ha extendido suficientemente la recarga iguala a la extracción y por lo tanto se establece un régimen permanente. Sin embargo, en acuíferos de poca extensión superficial puede suceder que la recarga no pueda llegar a igualar el bombeo, en cuyo caso el régimen permanente no puede establecerse y los niveles descienden continuamente hasta el vaciado del acuífero. Los acuíferos libres pueden recibir algo de recarga procedente de las lluvias anteriores y de la acumulada en la zona no saturada, o pueden no recibir agua y su nivel desciende hasta vaciar el acuífero.

En la práctica, realizada una perforación se realiza la evaluación de su capacidad de explotación, realizando una prueba denominada "ensayo de bombeo", en la cual se realiza la extracción de varios caudales diferentes encontrando una condición de explotación con descensos razonables.

Cuando la explotación de los acuíferos comienza a ser importante, y crece el número de pozos en una zona determinada, el efecto de una explotación conjunta genera que los descensos que generan los pozos puedan interferir entre ellos afectando la productividad de agua.

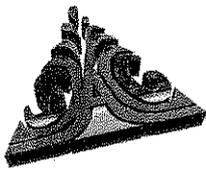
En situaciones extremas de fuerte demanda regional de agua subterránea, los descensos generados en el acuífero podrían llegar a generar variaciones en la superficie piezométrica alterando las condiciones de flujo natural de un acuífero.

El abordaje de esta problemática debe ser objeto de un marco de gestión global para los acuíferos, que racionalice tanto el uso a tasas sustentables para preservar el acuífero como para eliminar conflictos entre los distintos usuarios.

II.3 Los acuíferos de Uruguay

En el territorio Uruguayo existen varios acuíferos además del Acuífero Guaraní, que presentan buena calidad de agua y buenas condiciones para su explotación. La ubicación geográfica de los diferentes acuíferos se puede apreciar en la figura 2.8.

Uno de los acuíferos principales es el Raigón, que se encuentra en el departamento de San José. Abarca un área del orden de 1.800 km², comprendido



entre el Río Santa Lucía y el Río de la Plata, el cordón rocoso de la fosa tectónica y el Arroyo Pavón. Se trata de un acuífero con sistema hidráulico mixto: libre, semiconfinado o confinado. El sistema alcanza profundidades de hasta 80 m, hallándose el medio acuífero compuesto por arena y gravas que se intercalan con episodios casi siempre delgados de arcillas, las que pueden actuar en ciertos casos como confinantes o semi confinantes.

Su utilización prioritaria está basada en el riego de praderas, cultivos de maíz, plantaciones hortícolas y frutícolas y demás actividades agrícola-ganaderas, además de servir como fuente de abastecimiento tanto para centros poblados como a nivel domiciliario rural.

Existen otros acuíferos sedimentarios en Uruguay, pero de menor extensión o uso, destacándose el acuífero Chuy (Sureste del país), el acuífero Salto (Oeste de Salto y Artigas), los acuíferos en la faja costera del río de Plata y Océano Atlántico, y el acuífero Asencio (Oeste de Soriano y Río Negro), el cual se ubica sobre el acuífero Mercedes.

Figura 2.8

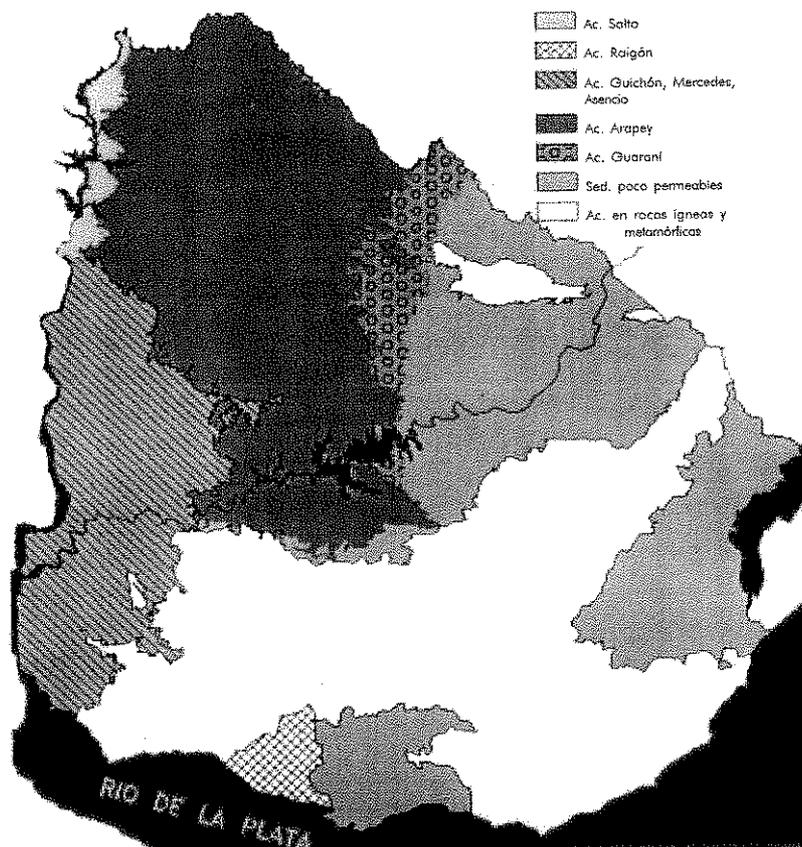
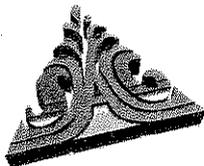
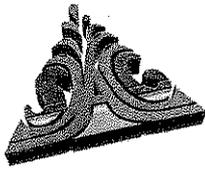


Figura 1: Distribución superficial de los mayores acuíferos en Uruguay.
Observación: El Acuífero Guaraní continúa debajo de los acuíferos Arapey y Salto

En los departamentos Artigas, Salto, y parte de Paysandú, Río Negro y Durazno se presenta el acuífero Arapey contenido en los derrames basálticos. De fisuras y sectores alterados, en ocasiones se puede extraer más 30 m³/h de agua, pero en general su rendimiento es heterogéneo y pobre, existiendo muchos pozos de magros resultados.



En el centro del área existente al Sur del río Negro superficialmente hay rocas ígneas y metamórficas, de las cuales se puede obtener agua subterránea aprovechando sectores fisurados o alterados. En general son acuíferos locales, y de rendimiento bajo. El agua obtenida generalmente es de muy buena calidad, por lo que es utilizada para consumo humano y animal.



III. GESTIÓN Y PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS³

El agua subterránea es un recurso natural vital para el suministro económico y seguro de agua potable en el medio urbano y rural, y juega un papel de vital importancia para el ser humano y muchos ecosistemas. A escala mundial, los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por las actividades antrópicas, destacando las urbanizaciones, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y emprendimientos mineros entre otras actividades potencialmente contaminantes.

Por ello existe una gran necesidad de llevar a cabo campañas proactivas y acciones prácticas destinadas a proteger la calidad natural del agua de los acuíferos, sobre la base de criterios amplios de sustentabilidad ambiental y de explotación. El desarrollo de campañas proactivas puede estar ligado con campañas educativas tanto de carácter formal como no formal, abordando la temática de las aguas subterráneas.

III.1 Riesgos de contaminación

Las aguas subterráneas se originan principalmente por el agua de precipitación que se infiltra directa o indirectamente en la superficie del suelo. Como consecuencia, el desarrollo de las actividades humanas en sus más diversas manifestaciones puede significar una amenaza para la calidad del agua subterránea.

Por contaminación del recurso agua subterránea se puede considerar la alteración física, química o biológica de su calidad natural, ya sea por causas directas o indirectas de las actividades humanas o por razones naturales, que condiciona su aptitud para el desarrollo de determinados usos.

Tal definición está ligada al concepto de calidad de agua para determinados usos, y en tal sentido se puede considerar que determinada fuente de agua no es apta para determinado uso, como ser para fuente de agua bruta para abastecimiento de agua potable, pero sí lo sea para la actividad de riego.

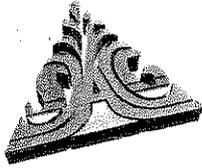
Poder realizar un seguimiento de la contaminación requiere de estudios de base sobre la calidad natural del agua de un acuífero, en una escala temporal y geográfica de modo tal de poder disponer de datos suficientes que permitan seguir su evolución con el paso del tiempo.

III.1.1 Composición del agua subterránea

El agua es un buen solvente natural y por lo tanto siempre tiene elementos químicos en solución. Es habitual que la primera evaluación que se realice sobre el agua sea para definir si la misma es dulce o salada, para lo cual se analizan las sales disueltas expresándolas en alguna de las siguientes formas:

³ La redacción de este capítulo tiene como base bibliográfica principal la siguiente:

FOSTER, S. - Protección de la calidad del agua subterránea - 2003 Banco Mundial UNESCO



- Conductividad: capacidad de conducir una corriente eléctrica
- Salinidad: donde se expresa el contenido de sales en partes por mil en unidades de peso del agua.
- Sólidos Disueltos Totales, que es el residuo luego de evaporar el agua.

A modo de guía, se presenta la tabla 3.1 con rangos para la clasificación del agua según la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT). Dichos valores representan una referencia ya que pueden existir variaciones entre cada país, según las propiedades del agua que caracteriza la región.

Tabla 3.1

| Clasificación | SDT (mg/L) |
|---------------|--------------------|
| Dulce | < 1.000 |
| Salobre | De 1.000 a 20.000 |
| Salada | De 20.000 a 50.000 |
| Salmuera | > 50.000 |

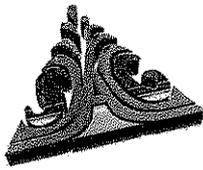
Los iones fundamentales en el agua subterránea que forma casi el 100% de las sales disueltas son el Sodio (Na^+), Potasio (K^+), Calcio (Ca^{++}), Magnesio (Mg^{++}), Cloro (Cl^-), Bicarbonato (HCO_3^-) y Sulfato.

Existen otra cantidad importante de solutos en cantidades mucho menores que los iones anteriores, pero que son analizados por su incidencia en los usos del agua, destacando el Hierro (Fe) que le confiere gusto y genera incrustaciones en cañerías, el Boro (B) que es tóxico para las plantas, y el Fluor (F), el Aluminio (Al) y los Nitratos (NO_3^-) que pueden generar afectaciones en la salud humana.

Las condiciones del medio en el cual se mueve el agua subterránea, o sea las características geológicas de los materiales forman el acuífero, condicionarán las propiedades químicas del agua. En la siguiente tabla 3.2 se presentan 2 caracterizaciones de fuentes de agua subterránea que son utilizadas para agua embotellada en Uruguay:

Tabla 3.2

| Parámetro | Concentración (mg/L) | | |
|-----------|----------------------|----------------|----------------|
| | Agua Mineral 1 | Agua Mineral 2 | Referencia OSE |
| SDT | 124 | 263 | 1.000 |
| Calcio | 36 | 78 | - |
| Magnesio | 8,9 | 30 | - |
| Sodio | 7,2 | 11,9 | 200 |
| Potasio | 0,71 | - | - |
| Cloruros | 7,1 | 13,5 | 300 |
| Sulfatos | 5,7 | - | 400 |
| Nitratos | 0,7 | 2,5 | 45 |



III.1.2 Agentes contaminantes

Resulta difícil realizar una clasificación homogénea de los eventuales contaminantes de las aguas subterráneas tanto por su diversidad, naturaleza y comportamiento, como por la importancia de cada uno y de sus efectos o riesgos derivados de su presencia en el agua. Entre los agentes que pueden generar cambios en la calidad del agua subterránea se identifican los agentes patógenos, iones y metales pesados.

Bacterias y Virus

Si en el agua hay presencia de gérmenes patógenos, considerando como tales a los microorganismos que provocan enfermedades, se hace referencia a una contaminación de tipo "patógena". Se trata en general de bacterias y virus que pueden causar enfermedades si el agua es utilizada para el consumo humano en forma directa, pero también representan un factor de riesgo si son usadas para actividades recreativas o el riego de alimentos de consumo directo.

Este tipo de contaminación está asociada a efluentes de tipo doméstico como por ejemplo vertidos de aguas cloacales de sistemas de alcantarillado sin el tratamiento adecuado, pozos negros filtrantes, etc. Una causa habitual de este tipo de contaminación es la afectación del agua de los pozos mediante el ingreso de aguas superficiales por sus paredes, cuando no están bien construidos.

Como indicador de este tipo de contaminación se realiza el análisis de coliformes (fecales o totales según corresponda), pudiendo definir acorde a la magnitud de su presencia distintos tipos de calidad de agua, asignando tipos de usos posibles para cada una de ellas.

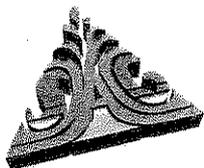
En los acuíferos la contaminación patógena es de carácter local ya que el transporte de los agentes patógenos se ve restringido por el efecto de filtración que ejerce el medio del propio acuífero, y a que existe una tasa de decaimiento natural de los organismos que hace que su presencia va disminuyendo con el tiempo. De todos modos, no se descarta que en zonas altamente pobladas con acuíferos libres (caso de zonas costeras) los efectos de contaminación patógena puedan cobrar efecto regional.

Iones

Se pueden considerar como iones normales, los iones Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Mg^{++} , que representan el conjunto de iones más comunes de encontrar en las aguas subterráneas, que le confieren a la misma propiedades de salinidad y dureza.

Acorde al tipo de uso que se quiera dar al agua es la concentración máxima admisible para los iones citados anteriormente. A partir de determinadas concentraciones el agua puede presentar efectos fisiológicos negativos sobre la salud humana o alteraciones en las tareas de uso doméstico o industrial.

Así, la presencia de NaCl en concentración superior a 300 mg/l otorga un sabor salado al agua. El SO_4^{-2} a elevada concentración da sabor amargo al igual que el Mg^{++} cuando aparece en concentraciones de varios centenares de mg/l. Efectos laxantes suelen aparecer ligados a la presencia de SO_4 y Mg^{++} o Na^+ en cantidades importantes.



En cuanto a la dureza del agua el principal efecto para su uso doméstico es el incremento en el gasto de jabón, detergentes, y para el uso industrial el aumento de productos químicos para su ablandamiento para evitar incrustaciones.

Un estudio especial requieren los iones nitrogenados. De los tres iones más frecuentes en las aguas subterráneas, amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-), los dos primeros son muy inestables en el agua natural y tienden a oxidarse y pasar a nitrato, forma en que suele encontrarse el nitrógeno en el agua.

Niveles importantes de NO_3^- en el agua pueden producir en niños lactantes que incluyan agua en su dieta una metahemoglobinemia o cianosis, cuyos efectos pueden ser mortales. La flora intestinal del niño reduce los nitratos a nitritos que al combinarse con la hemoglobina de la sangre la transforman en metahemoglobina que reduce su capacidad de transportar el oxígeno. Este efecto se traduce en que el niño adquiere un color azulado y si las situación no se revierte puede provocarle la muerte. En adultos con escasa acidez gástrica se puede generar una eventual producción de nitrosaminas agentes potencialmente cancerígenos.

La presencia de NO_3^- en las aguas subterráneas está asociada a la presencia de zonas bajo prácticas de regadío intensivo (uso de fertilizantes nitrogenados) y áreas de influencia urbana (líquidos cloacales), y es un problema que puede llegar a ser cada vez mayor en la medida que no se aborde el control de las fuentes de contaminación de tipo nitrogenado.

Metales pesados

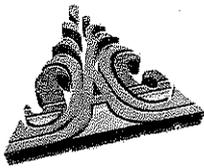
Se define como metales pesados a los elementos con elevados pesos atómicos, superiores a 44,956 y una densidad superior a 5 g/cm^3 , excluyendo a los grupos Alcalino y Alcalinotérreo. Dentro de los metales pesados se encuentran los iones metálicos que, aunque suelen aparecer como trazas en las aguas subterráneas naturales, pueden ser indicio fundado de contaminación cuando sus concentraciones son anormalmente altas. Se incluyen dentro de este grupo los siguientes: Al, Cu, Zn, Pb, Ag, Ni, Cd, As, Cr, Fe, Mn.

Varios metales pesados son imprescindibles para el desarrollo de las funciones vitales de los organismos, y son denominados "metales esenciales" como cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, vanadio y estroncio, pero en cantidades excesivas son perjudiciales e incluso letales para los seres vivos.

Los metales pesados "no esenciales", que habitualmente se asocian a problemas de contaminación de las aguas subterráneas son cromo, cadmio, mercurio, plomo, arsénico y antimonio.

La movilidad de los metales pesados hacia los acuíferos depende de las propiedades químicas del agua y de la composición geológica de la zona, ya que sus propiedades iónicas hacen que tengan afinidad con determinados tipos de suelos (ácidos húmicos y arcillas orgánicas principalmente). La química del agua regula la tasa de adsorción/desorción de los metales. Mediante la adsorción se elimina el metal del agua y lo almacena el acuífero, mientras que la desorción devuelve los metales al agua, favoreciendo su movilización. Entre los cambios que causan la desorción de metales se destaca:

- *Aumento de la salinidad*: produce una competitividad entre los metales y los cationes por rellenar huecos.



- *Disminución del potencial redox:* situación generada bajo condiciones deficitarias de oxígeno.
- *Disminución del pH:* se produce un incremento de la competitividad entre los metales y los iones de hidrógeno por rellenar huecos y se disuelve el complejo metal-carbonato liberándose los metales.

El **manganeso (Mn)** es un metal que, a parte de su utilización industrial, forma parte del compuesto metilciclopentadienil manganeso tricarbonil (MMT), recientemente aprobado como un aditivo de la gasolina. El Mn puede proceder de muchos orígenes: tráfico urbano, calefacciones de fuel-oil de viviendas individuales y obras de edificación, presentando por ello un comportamiento estacional.

El **cobre (Cu)** se presenta muy raramente en las aguas dulces (de 5 a 1.000 $\mu\text{g/L}$) siendo interesante su estudio porque en concentraciones de trazas es indispensable para el organismo. Es utilizado en canalizaciones para conducciones de agua que pueden ser atacadas en condiciones determinadas de oxigenación, acidez y temperatura.

El **zinc (Zn)** es un metal que presenta un uso importante para forma capas protectora (galvanizado) para el hierro y el acero, y como componente de distintas aleaciones, especialmente del latón. Presenta una amplia gama de aplicaciones en metales galvanizados para tuberías, utensilios, caucho, tintas y puede entrar también en la composición de algunos insecticidas, fertilizantes y abonos.

El **plomo (Pb)** ingerido en cualquiera de sus formas es altamente tóxico, presentando efectos de acumulación en el organismo. Luego de un periodo de tiempo de acumulación pueden comenzar síntomas de envenenamiento como anemia, debilidad, estreñimiento y parálisis en muñecas y tobillos. En niños puede producir efectos en el desarrollo intelectual y retraso en el desarrollo motor, deterioro de la memoria y problemas de audición y equilibrio. En adultos, el plomo puede aumentar la presión sanguínea.

Tuvo un uso muy importante como antidetonante en gasolinas, por lo que las emisiones a la atmósfera del tránsito contenían dióxido de plomo. También tuvo un importante empleo en la elaboración de pinturas y pigmentos, lo que significaba un importante uso a nivel doméstico. Aún se emplea en grandes cantidades en la fabricación de baterías y en el revestimiento de cables eléctricos, en redes de tuberías, tanques, y aparatos de rayos X, con un uso importante para el blindaje protector de materiales radiactivos.

Si el plomo se pone en contacto con aguas muy salinas, se forman sales insolubles (sulfatos y carbonatos principalmente) que quedan inmobilizadas en el terreno.

La **plata (Ag)** en aguas subterráneas próximas a centros urbanos, tiene su origen en la disposición de efluentes líquidos de centros de atención a la salud (aleaciones dentales, antisépticos y placas radiográficas, entre otros) y efluentes industriales (industria electrónica, fotografía, fábricas de baterías de alta capacidad de Ag-Zn y Ag-Cd, etc.).

El **aluminio (Al)** es un metal que dada su elevada relación resistencia-peso es muy útil para construir aviones, vagones ferroviarios y automóviles entre otros. En los últimos años ha cobrado un uso muy importante en la industria de



transmisión de energía eléctrica, en la construcción de conductores, y en la industria de la construcción tanto para fines estructurales como ornamentales.

El aluminio se encuentra en la naturaleza en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio, pero nunca como metal libre. Por tal razón, se puede ver enmascarada la presencia de focos potenciales de contaminación.

El **níquel (Ni)** es un metal con amplio uso en la industria galvánica, que consiste en un proceso electroquímico por el cual se deposita una capa fina de metal sobre una base generalmente metálica. Los objetos se galvanizan para evitar la corrosión, para obtener una superficie dura o un acabado atractivo. Su origen puede ser del polvo o escorias de hornos eléctricos y residuos minerales de industrias de tratamiento de metales. Además tiene un campo de aplicación importante en baterías (Ni-Cd).

El **cromo (Cr)** es un elemento muy utilizado en la creación de aleaciones de hierro, níquel o cobalto, para lograr aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión de la aleación. Presenta un uso importante en industrias químicas para elaborar sales de cromo que son utilizadas como curtientes, que luego son utilizadas en industrias del cuero para su curtido.

El cromo se encuentra en estado trivalente y hexavalente, siendo este último de los estados el que presenta mayor toxicidad para los seres vivos pero muy inestable pues altamente reductor.

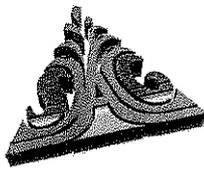
Su presencia en aguas subterráneas puede estar asociada a presencias de industrias que realicen vertidos de cromo, o manejen el mismo en tanques o lagunas de las que se puedan generar fugas que alcancen las aguas subterráneas.

El origen del **cadmio (Cd)** es propiamente industrial, encontrándose como subproducto en la obtención de zinc. Presenta múltiples aplicaciones en procesos de electrochapado y revestimientos metálicos y en baterías de Cd-Ni. Las sales de cadmio se usan en fotografía, en la elaboración de fuegos artificiales, pinturas fluorescentes, vidrio y porcelana. Es frecuente encontrar este metal como consecuencia de la corrosión de las tuberías de distribución de agua.

El **arsénico (As)**, a pesar de ser una sustancia venenosa, presenta un amplio uso por lo cual corresponde a un contaminante muy difundido. Presentó usos medicinales, y dadas sus propiedades se utiliza en la elaboración de herbicidas y plaguicidas. Por tanto, se trata de un contaminante cuya presencia se puede asociar al desarrollo de actividades agrícolas.

El **hierro (Fe)** y el **manganeso (Mn)** pueden ser precipitados al cambiar su estado de oxidación (en función del pH y condiciones de aireación) y, resultando poco solubles en medio oxidante, dan origen a óxidos e hidróxidos que precipitan. En determinadas circunstancias la presencia de estos metales en el agua subterránea es indicador de condiciones reductoras en el acuífero, que se pueden asociar a contaminación de tipo orgánica.

La presencia de estos metales en concentraciones elevadas pueden alcanzar niveles tóxicos en el agua a los efectos del consumo humano, pero en general la fuente de agua deja de ser utilizada antes de alcanzar dichas concentraciones pues comienza a ser intolerable por su sabor.



El hierro presenta como campo de aplicación principal el industrial, siendo utilizado como hierro forjado, hierro fundido y el acero. El manganeso se utiliza principalmente para la formación de aleaciones de hierro obtenidas en altos hornos con hierro y carbono.

Específicamente el hierro presenta aplicaciones en la medicina para el tratamiento de la anemia, es decir, cuando desciende la cantidad de hemoglobina o el número de glóbulos rojos en la sangre.

III.1.3 Origen de la contaminación

Existen varias causas potenciales del deterioro de la calidad de un acuífero y/o las fuentes de agua subterránea. Una clasificación según el origen de la contaminación se presenta en la tabla 3.3, indicando las causas posibles y el tipo de contaminantes asociados.

Tabla 3.3

| ORIGEN | CAUSA SUBYACENTE | CONTAMINANTES |
|--|---|--|
| Contaminación en zonas de recarga | Descargas y lixiviados provenientes de actividades urbanas, industriales e intensificación de cultivos agrícolas, en zonas vulnerables para los acuíferos (zonas de recarga). | Patógenos, compuestos nitrogenados, cloruro, sulfato, boro, arsénico, metales pesados, materia orgánica, hidrocarburos, agro tóxicos e incluso contaminantes persistentes. |
| Contaminación de la cabecera del pozo | Construcción o diseño inadecuado del pozo permite el ingreso directo de agua superficial o agua subterránea poco profunda contaminada | Principalmente patógenos. |
| Intrusión salina | Se genera un flujo de agua subterránea salada de las zonas de interfase costera principalmente, hacia acuíferos de agua dulce, como resultado de una extracción excesiva | Principalmente cloruro de sodio. |
| Contaminación natural | Relacionado con la evolución química del agua subterránea y la solución de minerales característicos del material constituyente de un acuífero | Principalmente hierro y flúor solubles, y menos frecuente sulfato de magnesio, arsénico, manganeso, selenio y otras especies inorgánicas |

Las causas de deterioro citadas anteriormente presentan escalas de afectación diferentes anivel de la extensión global de un acuífero. La contaminación en zona de recarga y de tipo natural ejercerán efecto en las zonas hacia donde se dirige el flujo de agua del acuífero, pudiendo alcanzar grandes extensiones.

La contaminación de cabecera de pozo es un efecto localizado, atribuible a una mala construcción de la perforación, y tiene principalmente un efectos sobre la perforación misma perjudicando su uso.

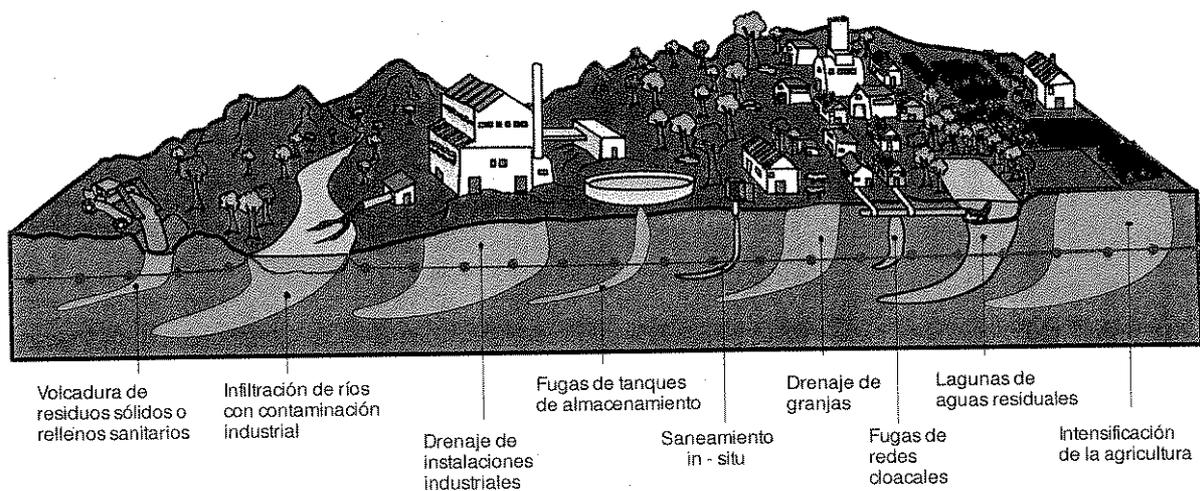
Efectos de intrusión salina se pueden generar en la zona de descarga de los acuíferos, en la interfase agua dulce-agua salada, y el efecto de contaminación queda más restringido a la zona en la que se genera la alteración.



Contaminación en zonas de recarga

La contaminación de los acuíferos en zonas de recarga ocurre cuando la carga de contaminantes sobre el subsuelo producto de actividades urbanas, industriales y agrícolas principalmente no son controladas adecuadamente, y en ciertos componentes excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos suprayacentes. La figura 3.1 ejemplifica un conjunto de actividades que pueden ser potencialmente contaminantes para el agua subterránea.

Figura 3.1



Modificado. Base gráfica FOSTER, S. - Protección de la calidad del agua subterránea - 2003
Banco Mundial UNESCO

Se suelen distinguir procesos contaminantes de tipo "puntual" que afectan a zonas muy localizadas, y "difusos", que provocan contaminación dispersa en zonas amplias en las que no es fácil identificar un foco principal. Ejemplos de dichos tipos de contaminación se presentan en la fráfico 3.2, donde se pueden apreciar fotografías de actividades potencialmente contaminantes.

Entre las actividades que suelen provocar contaminación puntual se encuentran los vertederos de residuos urbanos e industriales, cuyos lixiviados pueden alcanzar las aguas subterráneas, los depósitos enterrados con hidrocarburos, unidades de tratamiento de líquidos industriales semienterradas y sistemas de saneamiento estáticos (pozos negros).

La contaminación difusa suele estar provocada por el desarrollo de actividades agrícolas y forestales, que tienen asociado el uso de fertilizantes y agrotóxicos para el control de hierbas y plagas. Este tipo de contaminación puede provocar situaciones especialmente preocupantes con el paso del tiempo, al ir cargándose de contaminantes en forma lenta pero continua grandes superficies.

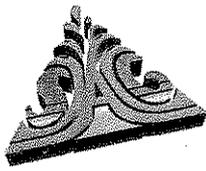
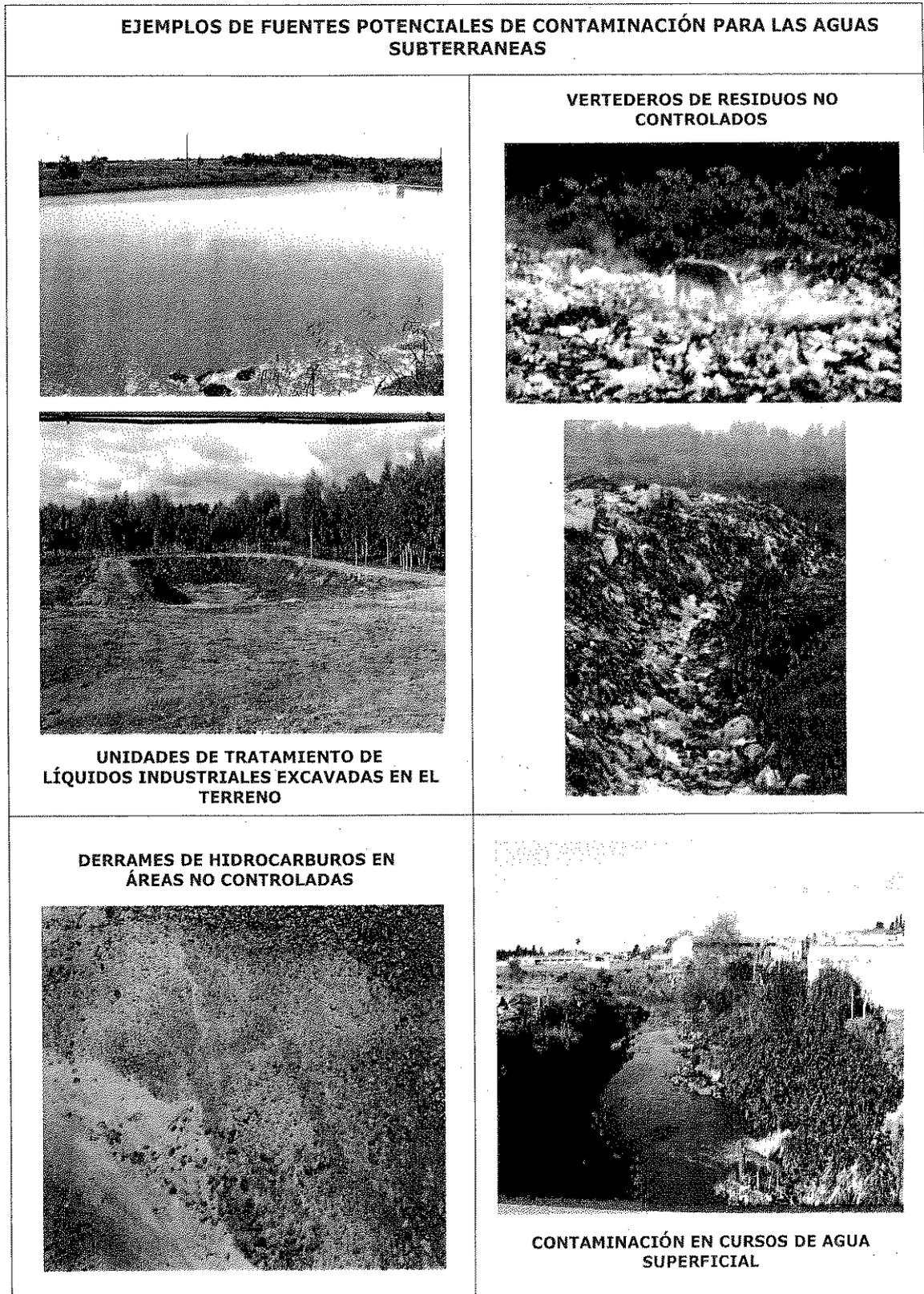


Figura 3.2





Históricamente se consideró la acción del perfil natural del subsuelo para atenuar muchos contaminantes en forma activa, encontrándolo eficaz para la disposición de excretas humanas y aguas residuales domésticas. Dicho poder autodepurador de contaminantes durante el transporte subterráneo en la zona vadosa (no saturada) es resultado de un proceso bioquímica, y tiene asociado los fenómenos de adsorción que se dan con las componentes minerales del subsuelo, fenómeno este también importante ya que aumentan el tiempo disponible para los procesos que conducen a su eliminación.

Sin embargo, no todos los perfiles del subsuelo y estratos subyacentes son igualmente eficaces en la atenuación de contaminantes, y los acuíferos son particularmente vulnerables a la contaminación cuando, por ejemplo, se encuentran rocas consolidadas altamente fisuradas, donde se establecen corrientes de flujo preferenciales con menores tiempos de estadía para que el propio acuífero pueda actuar sobre la carga contaminante recibida.

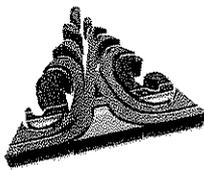
La preocupación sobre la contaminación del agua subterránea se refiere principalmente a los acuíferos no confinados o freáticos, especialmente donde su zona no saturada es delgada y el nivel freático es poco profundo, pero un peligro de contaminación significativo puede estar presente también en los acuíferos semiconfinados, si las capas acuitardas confinantes son relativamente delgadas y permeables.

La tabla 3.4 presenta un conjunto de actividades comunes potencialmente contaminantes para el agua subterránea, indicando el tipo de contaminante que se puede encontrar con mayor frecuencia.

Tabla 3.4

| FUENTE DE CONTAMINACIÓN | TIPO DE CONTAMINANTE |
|--|---|
| Actividad agrícola y pecuaria | Nitratos, amonio, tóxicos y patógenos. |
| Saneamiento estático (pozo negro) | Nitratos y patógenos. |
| Estaciones de servicio | Hidrocarburos aromáticos y halogenados, benceno y fenoles. |
| Vertedero de Residuos Sólidos | Amonio, sales, hidrocarburos halogenados y metales pesados |
| Industrias Metalúrgicas | Tricloroetileno, tetracloroetileno, hidrocarburos halogenados, fenoles, metales pesados y cianuro |
| Pintura y Esmaltes | Alcalobenceno, hidrocarburos aromáticos y halogenados, metales y tetracloroetileno |
| Industria Maderera | Pentaclorofenol, hidrocarburos aromáticos y halogenados. |
| Tintorerías | Tricloroetileno y tetracloroetileno. |
| Disposición de Lodos Residuales Domésticos | Nitratos; hidrocarburos halogenados; plomo; cinc |
| Curtiembres | Cromo; hidrocarburos halogenados; fenoles |
| Minas de Carbón y de Metales | Acidez; metales pesados; hierro; sulfatos |

El movimiento del agua y el transporte de contaminantes desde la superficie del suelo a los acuíferos puede ser un proceso muy lento, pasando años o décadas



antes que el impacto de un efecto de contaminación sea detectable en los acuíferos, en especial en casos de extracción mediante pozos profundos. La característica del flujo en los acuíferos hace que una vez que la calidad del agua se ha deteriorado notoriamente, posiblemente grandes volúmenes del acuífero estén ya involucrados, por lo cual las medidas de recuperación tienen un alto costo económico y a menudo son problemáticas desde el punto de vista técnico.

Contaminación en cabecera de pozos

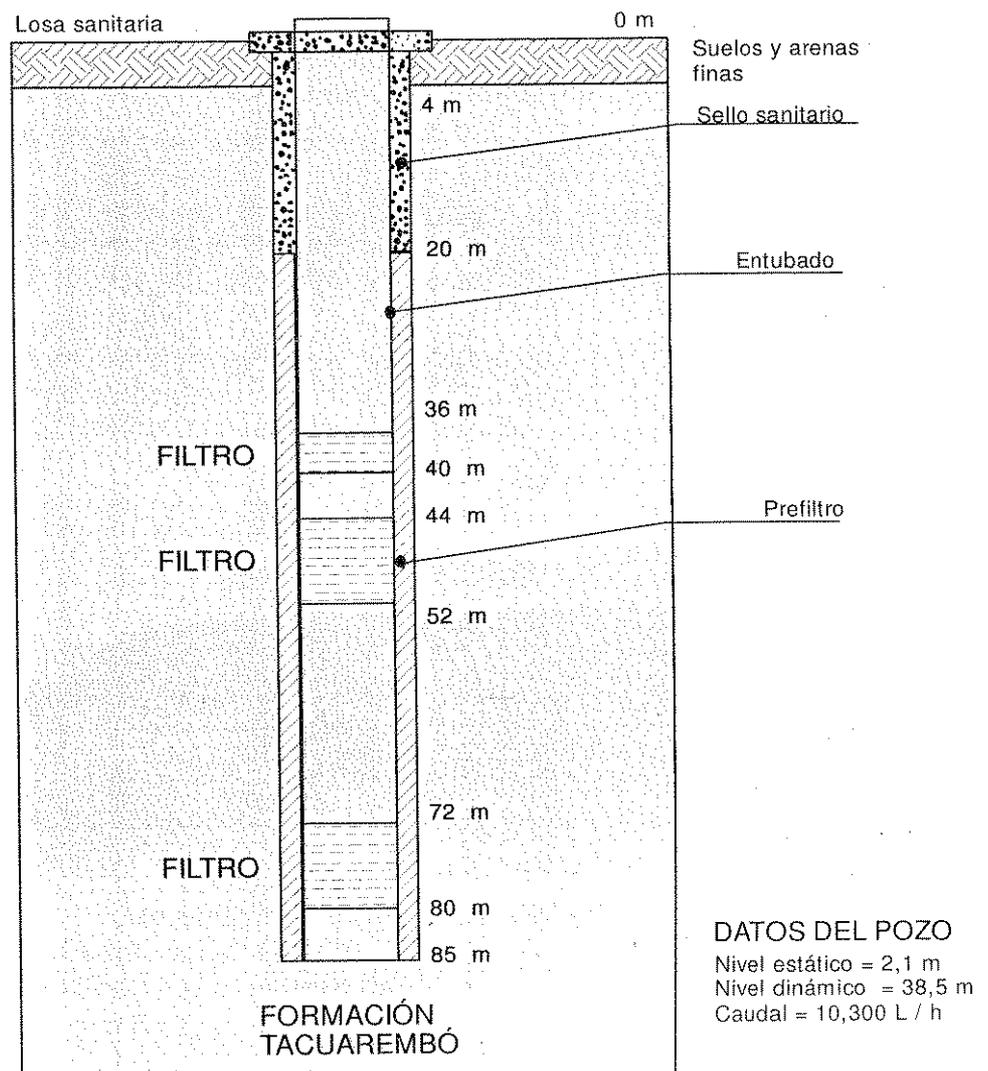
El efecto de contaminación en pozos o cabeceras de pozos generalmente es atribuible a defectos constructivos de la perforación, y constituye un problema local que afecta el uso de la propia perforación, pero que además, en caso de efectos de contaminación de magnitud puede extender su área de afectación a otras zonas del acuífero.

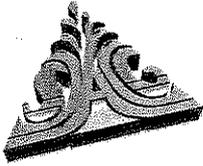
Figura 3.3

ESQUEMA CONSTRUCTIVO PARA UNA PERFORACIÓN

UBICACIÓN: Tacuarembó

ACUÍFERO: Guaraní





La figura 3.3 presenta un esquema para la construcción de una perforación ubicada en las proximidades de la ciudad de Tacuarembó sobre el acuífero Guaraní.

Como forma de preservar la integridad de las perforaciones y evitar que constituya un punto de origen de contaminación, es importante que las mismas se desarrollen siguiendo criterios sanitarios en las distintas etapas de su construcción, teniendo un rol fundamental las empresas perforadoras y sus técnicos, que participan en la definición de sus pautas constructivas y evalúan además la capacidad de explotación.

Es importante que en la superficie se realice una terminación de la perforación construyendo una losa superior y el sello sanitario en torno al entubado de la perforación, con lo cual se evita que el agua del escurrimiento superficial pueda ingresar hacia el acuífero.

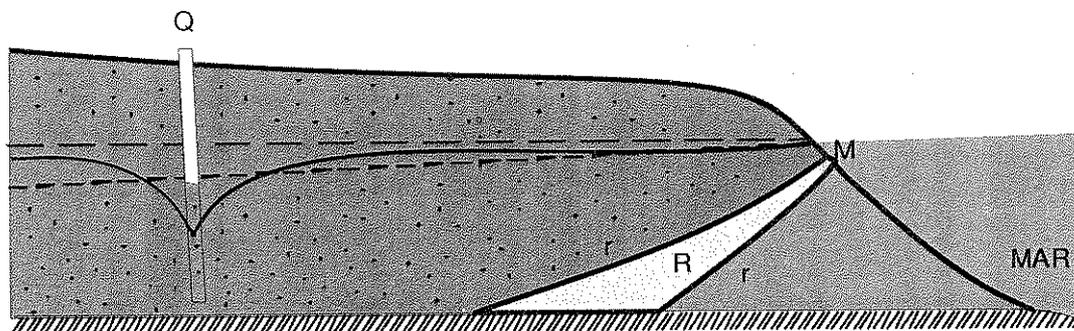
Contaminación por la intrusión marina

Representa un efecto asociado a prácticas de sobre explotación de un acuífero y no al ingreso de contaminantes a través de zonas de recarga. Se genera principalmente en los acuíferos costeros, en los que hay una zona de transición en equilibrio agua dulce-agua salada que es función del caudal de agua dulce que se descarga. Tal frontera en equilibrio dinámico, puede presentar pequeñas variaciones naturales según sean las condiciones de descarga del acuífero ante épocas de grandes precipitaciones o de sequía.

Este equilibrio puede verse alterado además por explotación del acuífero, si se establecen captaciones de agua, ya que se reduce el flujo de descarga natural y por lo tanto se producirá un desplazamiento de la interfase hasta alcanzar una nueva posición de equilibrio, lo que supone una mayor penetración de la cuña de agua salada del agua oceánica hacia el continente. Tal efecto se puede apreciar en la figura 3.4

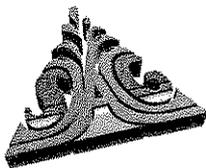
Si el volumen de extracción de agua supera la recarga, no es posible establecer equilibrio alguno, y el agua del mar penetra lenta pero continuamente hasta alcanzar a las captaciones, produciendo la contaminación directa de los pozos de agua.

Figura 3.4



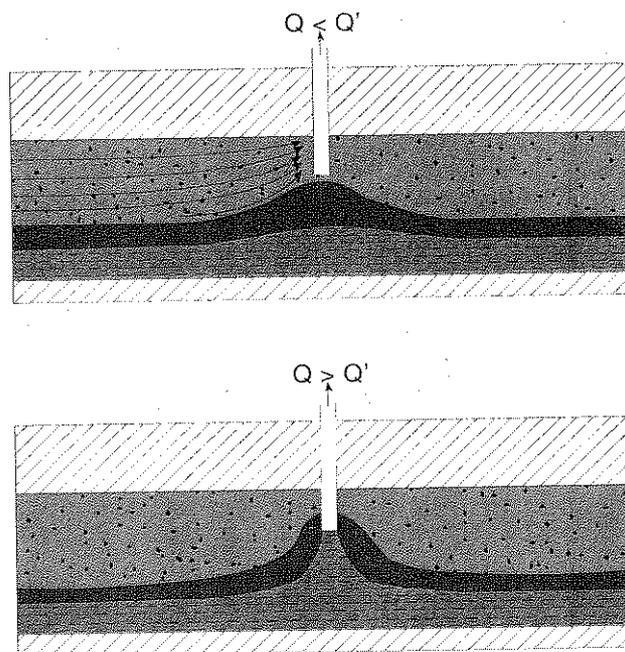
Efecto de la explotación de un acuífero costero en la posición de la interfaz; 1 y 1' nivel piezométrico e interfase inicial; 2 y 2' nivel piezométrico e interfase final con una explotación Q . R es la reserva de una vez.

Modificado: Base gráfica Custodio y Llamas



En la figura 3.5 se presenta otro caso de intrusión salina. Si en un acuífero existe un nivel de agua salada inferior, al establecerse el bombeo en un pozo que penetra sólo la parte superior, se establece un flujo horizontal en todo el espesor del acuífero, pero la mayor densidad del agua salada alcanzará o no el pozo según sea el descenso producido y la penetración del mismo en el acuífero. Existe un ascenso crítico de modo que, una vez alcanzado por la interfase, la subida del agua salada hacia el pozo es brusca.

Figura 3.5



Formación de conos de agua salada y salobre debajo de un pozo parcialmente penetrante en un acuífero con agua salada en la parte inferior. Q' = caudal crítico

Modificado: Base gráfica Custodio y Llamas

Contaminación de origen natural

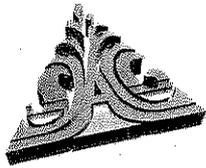
Se trata de un proceso relacionado con la evolución química del agua subterránea, debido a procesos de disolución de los minerales constituyentes del material geológico que caracteriza a la formación que forma el acuífero.

III.2 Protección de acuíferos

III.2.1 Evaluación del riesgo de contaminación

Un enfoque para definir el riesgo de contaminación para el agua subterránea es considerar la interacción *vulnerabilidad - carga contaminante*, para lo cual es necesario recopilar información y realizar estudios técnicos que permitan caracterizar:

- la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, consecuencia de las características naturales de los estratos que lo separan de la superficie del suelo



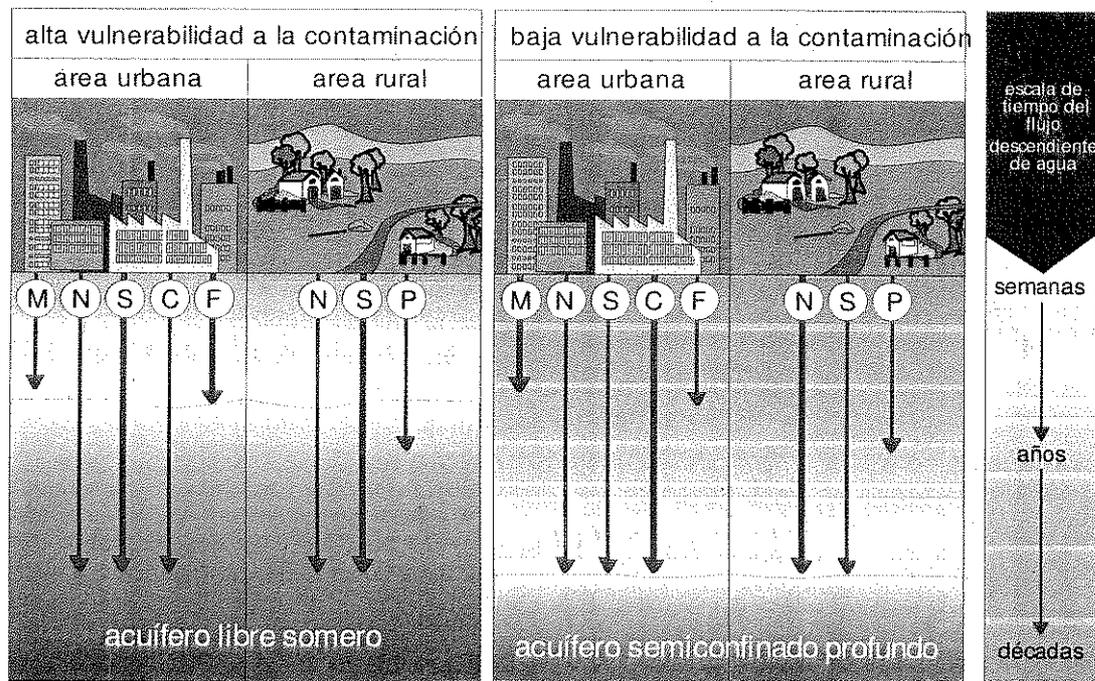
- la carga contaminante que se aplica o que podría ser aplicada por las distintas actividades humanas.

Si se adopta este enfoque de análisis, se pueden encontrar situaciones de alta vulnerabilidad, pero que no signifiquen riesgos de contaminación por la ausencia de cargas contaminantes significativas al subsuelo y viceversa. Los conceptos de "carga contaminante" y "vulnerabilidad" presentan diferencias importantes, ya que la carga contaminante puede ser modificada y por tanto se puede trabajar en su control, pero la vulnerabilidad de los acuíferos es una propiedad intrínseca determinada esencialmente por el entorno hidrogeológico natural.

El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero intenta representar la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante impuesta, y es un concepto opuesto al de "capacidad de asimilación de contaminación de un cuerpo receptor" que en general se utiliza cuando se analiza la gestión de calidad de aguas superficiales. En la figura 3.6 se ejemplifica el análisis de riesgo que se ha descrito en los párrafos anteriores:

Figura 3.6

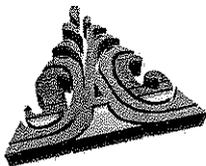
Significado de vulnerabilidades contrastantes a la contaminación de acuífero



- (M) metales pesados (N) nitrato (S) salinidad (C) carbono orgánico
(F) patógenos fecales (P) pesticidas

Modificado. Base gráfica FOSTER, S. - Protección de la calidad del agua subterránea - 2003

Banco Mundial UNESCO



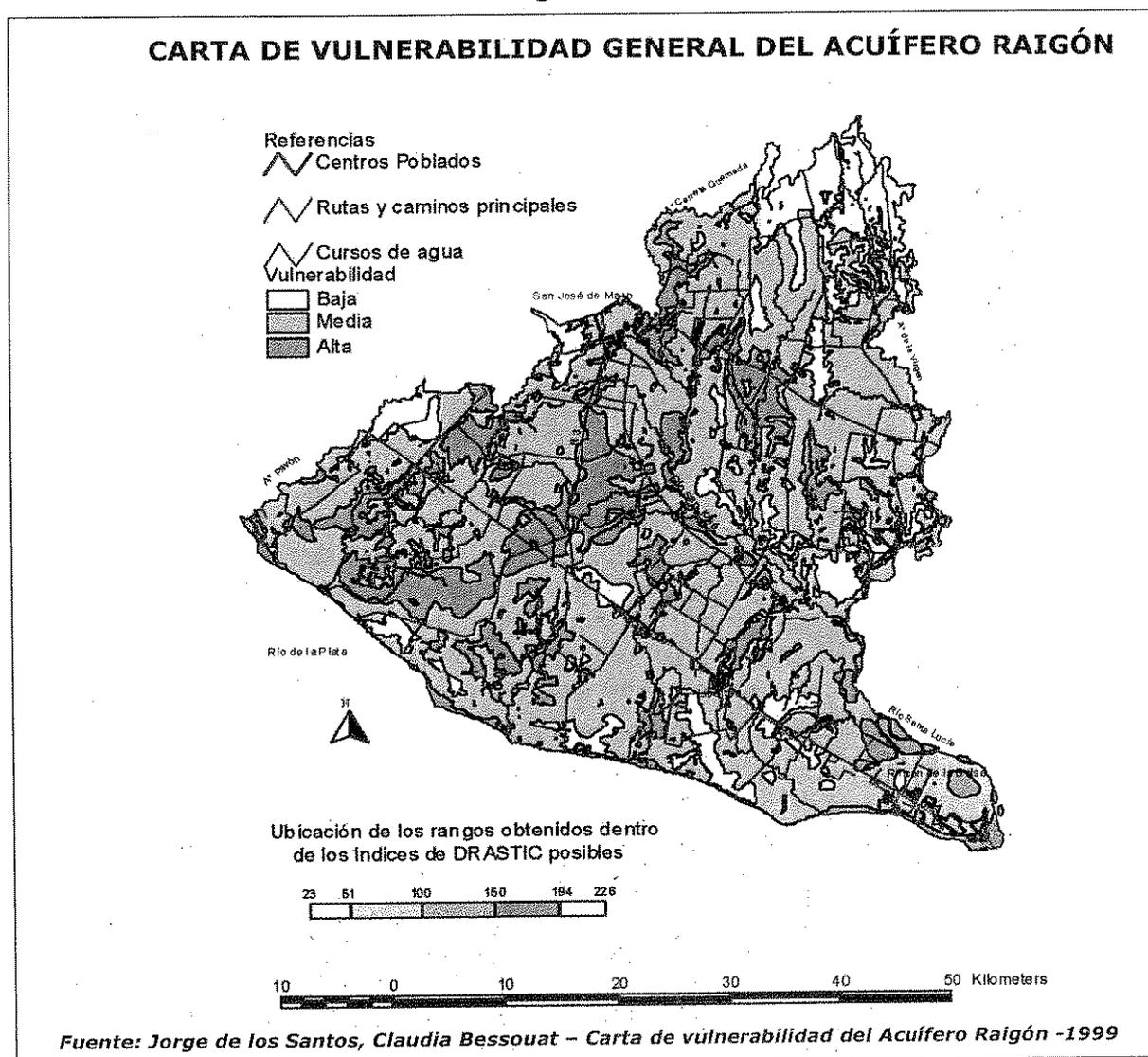
La vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos puede cartografiarse con facilidad, y cruzarla con la información generada en el reconocimiento de cargas potencialmente contaminantes para facilitar la evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea.

Que esté en riesgo una determinada fuente de abastecimiento de agua subterránea dependerá fundamentalmente de su ubicación con respecto a las fuentes de contaminación, y en forma secundaria de la movilidad y dispersión de los contaminantes involucrados en el régimen de flujo local de agua subterránea.

En Uruguay se disponen de ejemplos concretos en el desarrollo de estudios de vulnerabilidad, sobre un acuífero de importancia como lo es el acuífero Raigón, trabajo realizado por la Dirección Nacional de Medio Ambiente en conjunto con el instituto de Mecánica de los Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Como resultado se obtuvo un conocimiento sobre el comportamiento del acuífero y se elaboró entre otros productos, una carta de vulnerabilidad (ver figura 3.7) que representa una guía para tomadores de decisión cuando se está en etapas de selección de sitios para la ubicación de emprendimientos que pueden tener incidencia en el ambiente.

Figura 3.7





III.2.2 Protección contra el efecto de la contaminación

Según el grado de alcance de las medidas de protección que se pretendan tomar, será el grado del enfoque de trabajo necesario para lograr la protección deseada, variando las escalas de reconocimiento y mapeo de los diversos componentes requeridos para evaluar el riesgo de contaminación del agua subterránea. Hay dos niveles de enfoque del problema: la protección de los acuíferos como recurso y la protección de fuentes de agua específicas.

La protección del recurso

Para proteger los acuíferos contra la contaminación es necesario regular las prácticas actuales y futuras del uso del territorio y el conjunto de actividades, destacando la descarga de efluentes, la gestión de los residuos y las actividades agropecuarias entre otras. Es posible manejar estrategias de gestión del territorio con el interés neto en la preservación de la captación del agua subterránea, pero generalmente no es aceptable desde el punto de vista socioeconómico, por lo que resulta necesario definir estrategias de protección de aguas subterráneas que garanticen un equilibrio entre los intereses de los diversos actores involucrados.

En lugar de aplicar controles genéricos sobre los usos del territorio y las descargas de efluentes, puede ser más conveniente para el desarrollo de una zona determinada, que se defina el nivel de control necesario para proteger la calidad del agua subterránea según la capacidad natural del subsuelo para la atenuación de los contaminantes, y que resulten con un riesgo aceptable para las mismas.

Es importante además la definición de programas de monitoreo de la calidad del agua subterránea, de controles ambientales sobre las instalaciones industriales, y la definición de recomendaciones dirigidas hacia el sector agrícola para contribuir al control de la contaminación y la educación pública en general.

El conjunto de actividades citados anteriormente son componentes esenciales de una estrategia global para la protección de la calidad del agua subterránea, en la cual tiene un rol central las Instituciones gubernamentales con competencias en la materia, quienes deben abordar los estudios necesarios para generar la información de base, y delinear el marco legal correspondiente, con señales claras hacia los diferentes actores relacionados.

Protección de fuentes específicas

Es necesario establecer un equilibrio razonable entre la protección de los recursos hídricos subterráneos y las fuentes específicas (pozos y manantiales) en particular. En zonas donde el uso de fuentes de agua afecte solo un porcentaje pequeño de la disponibilidad total posiblemente no sea redituable seguir la línea de proteger todas las partes del acuífero por igual.

En tal situación posiblemente resulte adecuado desarrollar una estrategia de protección enfocada a las fuentes, delimitando las áreas de captación del agua subterránea y procediendo a evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y la carga contaminante dentro de las áreas definidas. Este enfoque de abordaje se puede apreciar en la figura 3.8. Criterios similares se han desarrollado a nivel de las aguas superficiales, donde por ejemplo se han desarrollado conceptos de distancias mínimas de vertido de efluentes a tomas de agua con destino al abastecimiento de agua potable.

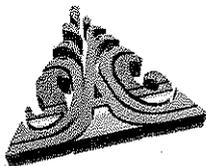
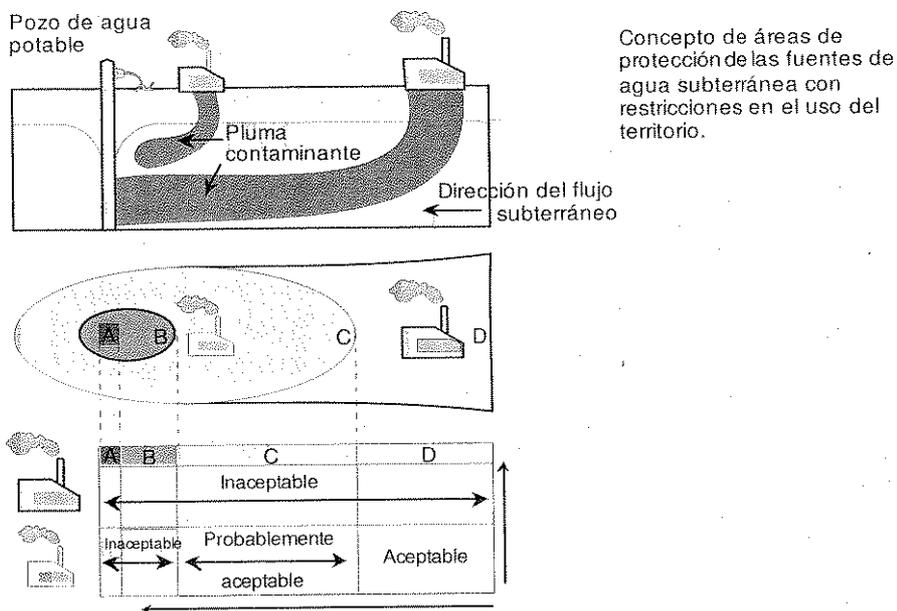


Figura 3.8



Fuente: FOSTER, S. - Protección de la calidad del agua subterránea - 2003

Banco Mundial UNESCO

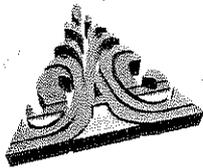
Este enfoque de análisis se aplica mejor en acuíferos más uniformes y explotados por un número relativamente pequeño de pozos, donde la delimitación de perímetros puede ser conservadora sin entrar en conflicto con otros intereses, pero se torna más complejo si existe un número elevado y creciente de extracciones individuales, situación en la cual posiblemente sea conveniente pasar a una estrategia de preservación global del recurso.

III.3 Gestión de uso del recurso agua subterránea

Cuando las demandas regionales crecen y se intensifica los volúmenes de aguas extraídos de los acuíferos, aumenta el número de perforaciones y de los usuarios directos e indirectos del agua, por lo cual sin un adecuado manejo se generarán conflictos de uso pudiendo comenzar a escasear el recurso o a producirse interferencias entre los distintos usuarios.

La complejidad que representa el flujo subterráneo, en cuanto a la cuantificación de las reservas de agua y las tasas de renovación, hacen que la definición de estrategias de gestión, más allá de pautas específicas para el abordaje de problemas de carácter local que puedan afectar una zona, requiera de estudios de carácter regional

El agua subterránea está integrada y relacionada al ciclo hidrológico a través de recarga por infiltración de las precipitaciones desde áreas lejanas o muy cercanas. Conforman flujos subterráneos poco profundos hasta muy profundos, que constituyen verdaderos sistemas cuya complejidad y extensión dificultan hasta el presente el abordaje de su conocimiento.

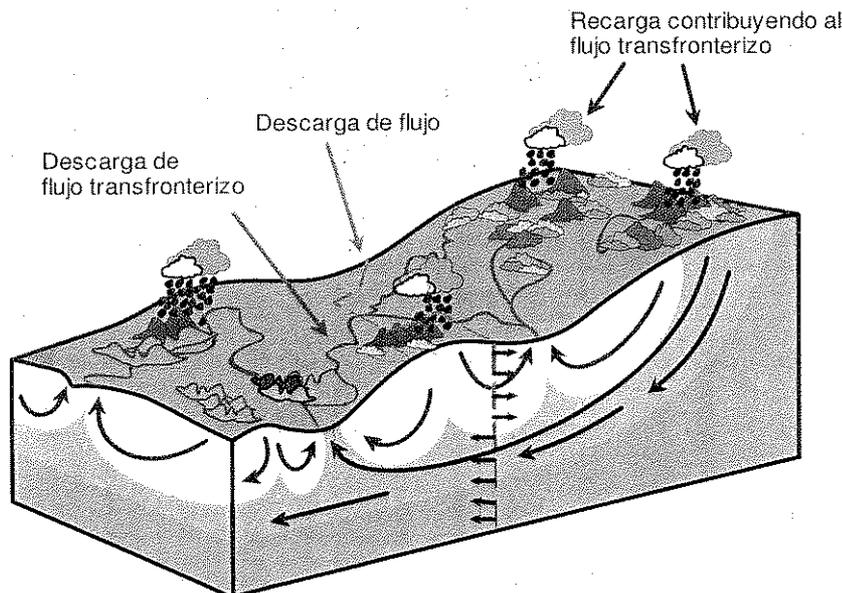


El agua superficial se observa en forma directa y es relativamente sencillo determinar las redes hidrográficas y seguir su evolución sobre el territorio, pero el *agua subterránea* no se ve y solo se la puede seguir en el subsuelo a través de estudios indirectos (geofísica) o directos por medio de perforaciones. Tal situación ha significado que en los países con un buen grado de desarrollo sea habitual observar legislación sobre la gestión de las aguas superficiales pero no para las aguas subterráneas.

El flujo profundo del agua subterránea, que corresponden al agua que ingresó en áreas más alejadas y elevadas topográficamente, pueden recorrer grandes distancias si las condiciones geológicas e hidráulicas se lo permiten, y dado que el agua no reconoce fronteras políticas puede ingresar al acuífero en una zona de recarga de determinado país, atravesar las fronteras y ser explotadas en otro país, según se esquematiza en la figura 3.9.

La presencia de acuíferos pertenecientes a cuencas hidrogeológicas compartidas entre dos o más países (como es el caso del Sistema Acuífero Guaraní) genera la complejidad adicional de lograr un enfoque de gestión conjunto, con un criterio ambiental y de sustentabilidad, atendiendo dentro de la globalidad de los límites geográficos del área de incidencia directa e indirecta del acuífero aspectos de explotación y calidad del recurso.

Figura 3.9

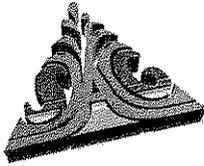


Fuente: Sitio Web Sistema Acuífero Guaraní

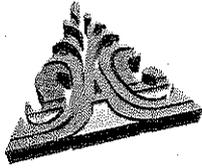
El abordaje de la gestión de un acuífero dependerá del grado de su complejidad, siendo importante su extensión superficial ya que los trabajos de estudio en general implican mediciones indirectas acompañadas del relevamiento de perforaciones existentes o la ejecución de perforaciones nuevas.

Entre los temas principales que deben ser abordados para la gestión se señalan los siguientes:

- Estudios técnicos: para evaluar la potencialidad del acuífero que definan las capacidades sustentables de explotación, y permitan la preservación de la calidad del recurso (estudio de zonas sensibles de recarga).



- Desarrollo de Guías técnicas: para actividades dentro del área de los acuíferos, y en especial para la ejecución de perforaciones, pues mal ejecutadas pueden ser puntos de entrada de contaminación al acuífero.
- Desarrollo de análisis y diagnósticos transfronterizos: en caso que la extensión del área del acuífero en estudio trascienda la frontera de un país, siendo esta la situación del Sistema Acuífero Guaraní.
- Control de la contaminación: Establecer pautas para la preservación de los acuíferos en función de los estudios de sensibilidad realizados, promoviendo el control sobre actividades existentes e interactuando con nuevos proyectos de desarrollo.
- Desarrollo de un marco legal para la gestión de uso: desarrollar un marco legal en sintonía con los actores involucrados, el cual sea luego objeto de una administración oportuna y eficaz en el manejo del agua es de vital para su credibilidad y garantizar el respaldo y compromiso público, lo cual permitirá además dar seguridad sobre los derechos de aguas y promover la inversión del sector privado.
- Estudio de pago de un canon de uso del agua

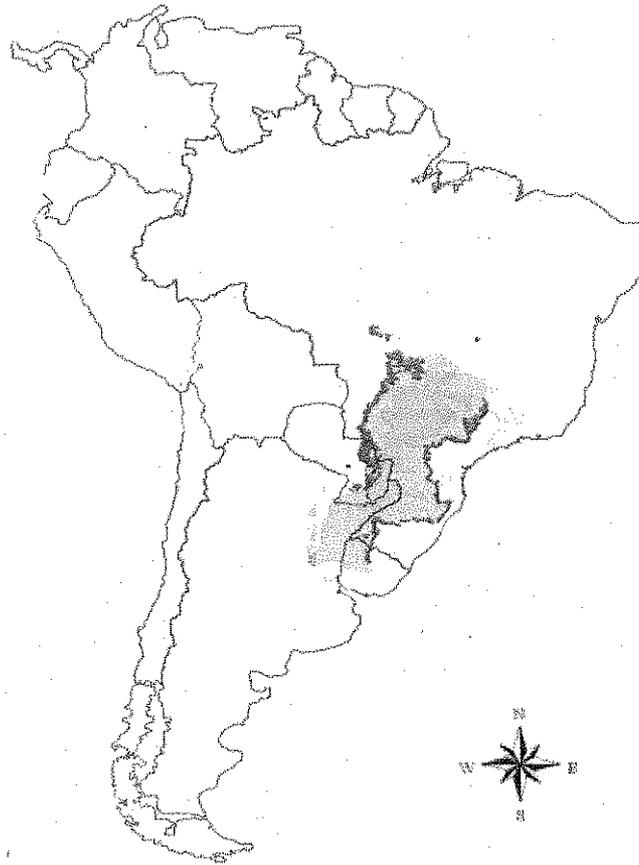


IV. EL ACUÍFERO GUARANÍ⁴

IV.1 Descripción del Sistema Acuífero Guarani

El Acuífero Guarani es uno de los reservorios subterráneos de agua dulce transfronterizo más grande del Planeta, extendiéndose desde la Cuenca Sedimentaria del Paraná a la Cuenca Chaco-Paranaense, siendo compartido por cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Está localizado en el centro-este de América del Sur, entre 12° y 35° de latitud Sur y 47° y 65° de longitud Oeste, subyacente a los cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. En la figura 4.1 se puede apreciar su ubicación geográfica en Sudamérica así como su desarrollo.

Figura 4.1



Fuente: Sitio Web Sistema Acuífero Guarani

⁴ La redacción de este capítulo tiene como base bibliográfica principal la siguiente:

Información del sitio Web de la Secretaría del Sistema Acuífero Guarani

Alejandro Oleaga, Contribución a la hidrogeología del acuífero Guarani en el sector Uruguay. Un enfoque integral – Tesis de maestría

Nadia Boscardin, José Botghetti, Ernani da Rosa – Aquífero Guarani, a verdadeira integração de os países do Mercosul

Dra. Ana Vidal, MTOP - Las aguas subterráneas en el Uruguay - Diciembre 2003

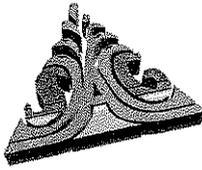
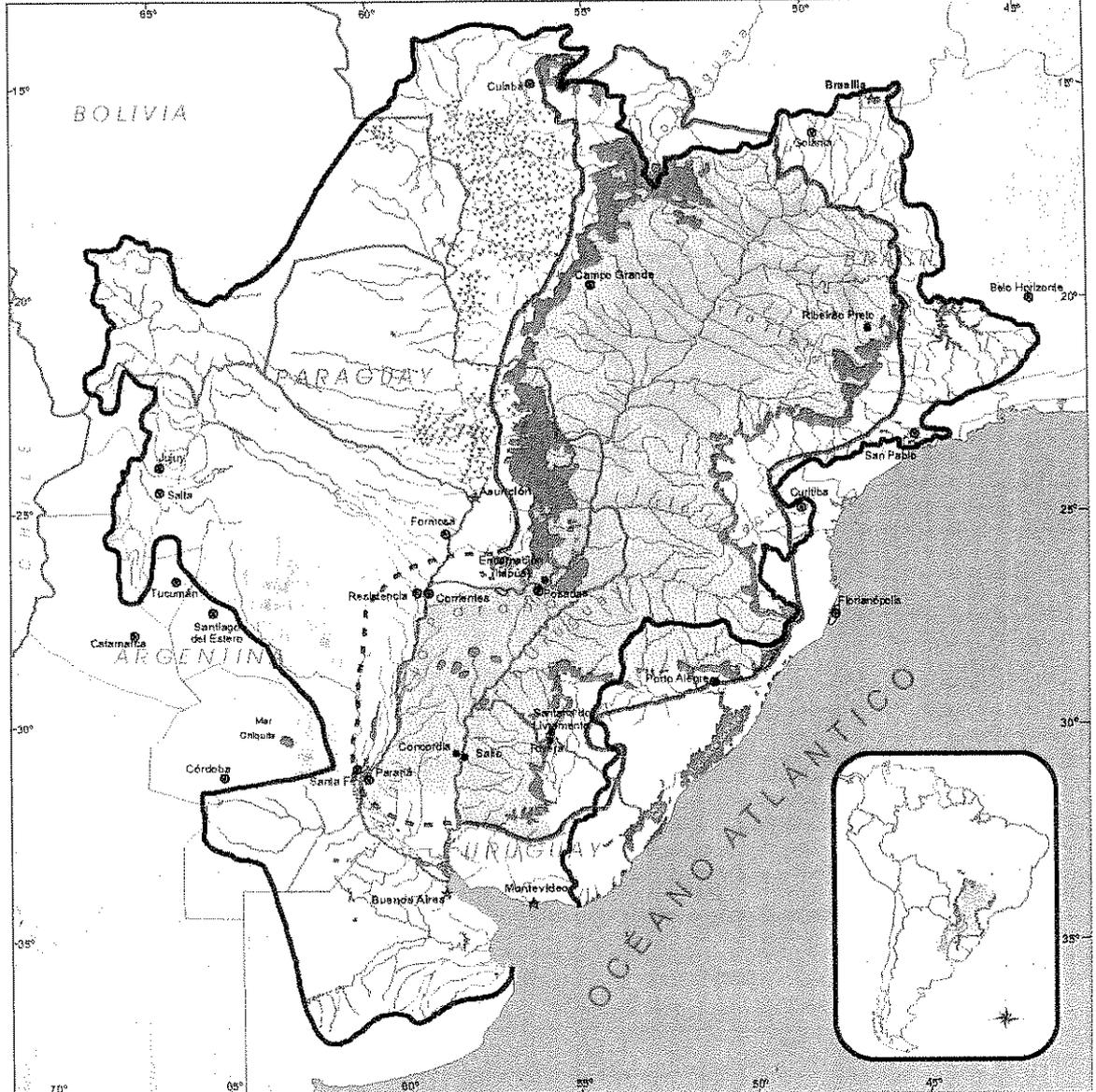


Figura 4.2

MAPA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ



LEYENDA

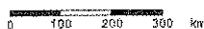
- Drainajes no relacionadas al sistema
- Áreas potenciales de recarga indirecta a partir del drenaje superficial
- Áreas potenciales de recarga indirecta a partir del flujo subterráneo
- Áreas potenciales de recarga directa
- régimen poroso: aflojamiento del Guaraní
- régimen fracturado/poroso: basaltos y areniscas
- Áreas potenciales de descarga
- régimen fracturado/poroso: régimen en basaltos y areniscas
- régimen poroso: aflojamiento del Guaraní
- régimen fracturado/poroso: relación con el Guaraní a definir

- Límite de la Cuenca hidrográfica del Plata
- Límite de la Cuenca sedimentar del Paraná
- Límite de la Cuenca del Paraná a definir
- Ríos
- Humedales
- Límite político de País
- Límite político de Estados/Provincias
- Ciudades (Áreas críticas en estudio)
- Capitales Estados/Provincias
- Capital de los Países

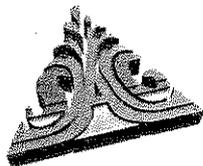
Mapa elaborado por la CAS/SRH/MMA (UNPP/Brasil) en junio de 2001, aprobado por el Consejo Superior de Preparación del Proyecto en julio de 2001 y adaptado por la Agencia Nacional de Agua (ANA) de Brasil en marzo de 2003.

Fuentes:

- Mapa Hidrogeológico de América del Sur, 1998, DNP/CPRM/Unesco.
- Mapa Hidrogeológico del Acuífero Guaraní, 1999, Campos H.C.
- Mapa de Integración Geológica de la Cuenca del Plata, 1998, MERCOSUR/SGT2.
- Mapa de Integración Hidrogeológica de la Cuenca del Plata, en elaboración, MERCOSUR/SGT2.
- Mapa Geológico del Brasil, 2ª Ed., 1995, MME/DNPM.
- Mapa Geológico de la Cuenca del Río de la Plata, 1970, OEA.



Fuente: Sitio Web Sistema Acuífero Guaraní

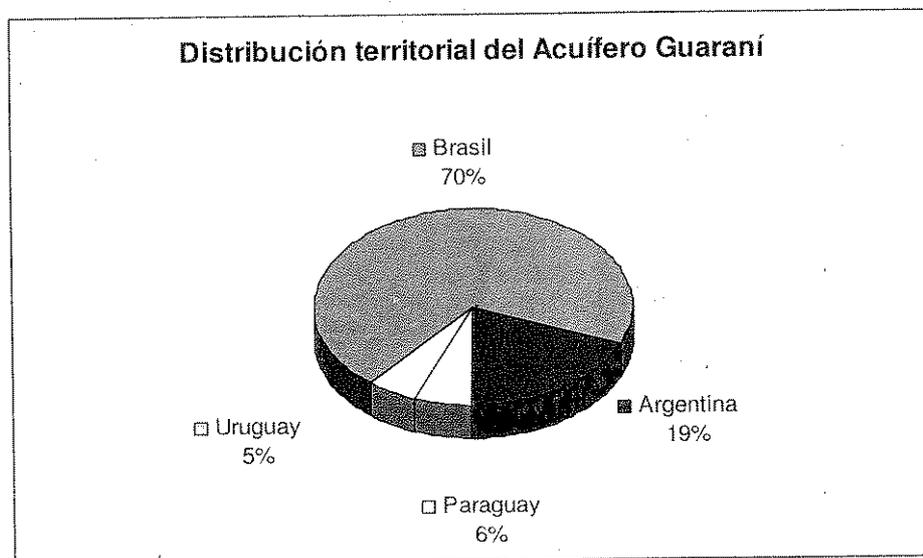


Constituye una importante reserva de agua dulce cuyo uso se incrementa constantemente, ya que los países que lo comparten aprovechan grandes volúmenes para abastecimiento público, riego, uso industrial y en ocasiones para uso turístico (termal).

El acuífero tiene una extensión superficial aproximada a los 1,2 millones de km², de los cuales 840.000 km² se encuentran en Brasil, 225.500 km² en territorio de Argentina, 71.700 km² en Paraguay y 58.500 km² en Uruguay.

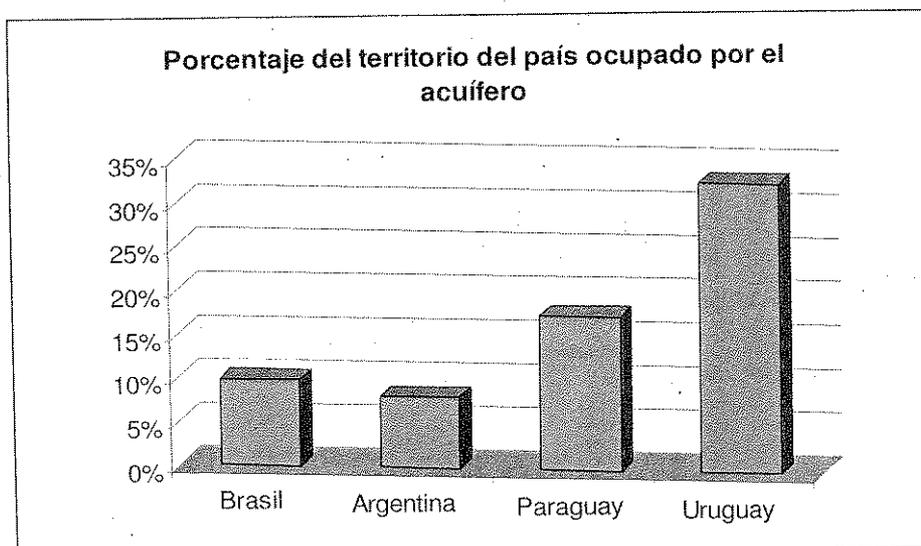
El gráfico 4.1 presenta el porcentaje de desarrollo en cada uno de los países sobre la base de la extensión total.

Gráfico 4.1



Si bien en el Uruguay se desarrolla solo el 5% de su extensión total, es el país en que presenta mayor desarrollo con respecto a su territorio, superando el 30% (ver gráfico 4.2)

Gráfico 4.2





IV.2 Características hidrogeológicas

El acuífero se constituye por el relleno de espacios en las rocas (poros y fisuras) convencionalmente denominadas Guaraní. Las rocas del Guaraní están formadas por un paquete de capas arenosas depositadas en la cuenca geológica del Paraná, entre 245 y 144 millones de años atrás.

El espesor de las capas varía de 50 a 800 metros, estando situadas en profundidades que pueden alcanzar hasta 1.800 metros. Debido al gradiente geotérmico, las aguas del Acuífero pueden alcanzar temperaturas relativamente altas, en general entre 50° y 65° C.

El paquete de capas tiene una arquitectura arqueada hacia abajo como resultado de la presión de las rocas sobre yacientes, como los espesos derrames de lavas basálticas originadas de la activación de fallas, arcos regionales y surgimiento de bordes, ocurridos en la cuenca sedimentaria del Paraná. Las formaciones geológicas congregan sedimentos fluvio lacustres del periodo Triásico (245 - 208 millones de años): Formaciones Piramboia y Rosario del Sur, en el Brasil y Buena Vista en el Uruguay; sedimentos eólicos desérticos del periodo Jurásico (208 - 144 millones de años); Formaciones Botucatú en Brasil, Misiones en Paraguay y Tacuarembó en Uruguay y Argentina (Rocha, 1997).

Las reservas permanentes de agua del Acuífero se estiman en el orden de los 45.000 km³ (45 trillones de metros cúbicos), considerando una espesura media del acuífero de 250 m y porosidad efectiva de 15%.

Las reservas explotables corresponden a la recarga natural (media plurianual) y fueron calculadas en 166 km³/año o 5.000 m³/s, representando el potencial renovable de agua que circula en el acuífero. La recarga natural ocurre por medio de la infiltración directa de las aguas de lluvia en las áreas de afloramientos de las rocas del Guaraní, y de forma indirecta por infiltración vertical a lo largo de las discontinuidades de las rocas del paquete confinante sobre yacente, en las áreas donde la carga piezométrica favorece los flujos descendentes.

Bajo condiciones naturales, apenas una porción de las reservas reguladoras es posible de explotación. En general, esta parte es calculada entre 25% y 50% (Rebouças, 1992) de las reservas reguladoras, respectivamente entre 40 a 80 km³/año. Este volumen puede aumentar dependiendo de la adopción de técnicas de desarrollo de acuíferos disponible. Sin embargo, los estudios deberán profundizarse para definir la tasa de explotación sostenible de las reservas, una vez que las sumas de las extracciones, con las descargas naturales del Acuífero para los ríos y océano, no pueden ser superior a su recarga natural.

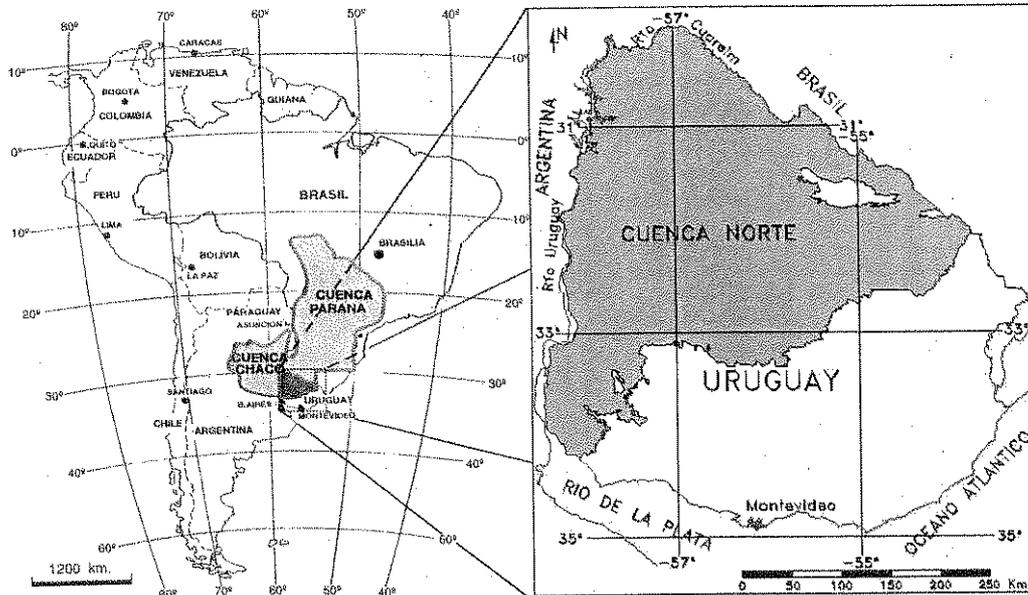
IV.3 Desarrollo en el Uruguay

Al área uruguaya, que es la parte SE de la cuenca Chaco-Paranense, se la denomina "Cuenca Norte". Dicha cuenca ocupa la mitad norte del país alcanzando un área de 98.000 km², es decir 55 % del área total de Uruguay, y su ubicación se puede apreciar en la Figura 4.3

Dicha cuenca es más extensa que el área de acuífero propiamente dicho, ya que comprende el desarrollo superficial del territorio uruguayo que tiene incidencia directa o indirecta con el acuífero.



Figura 4.3



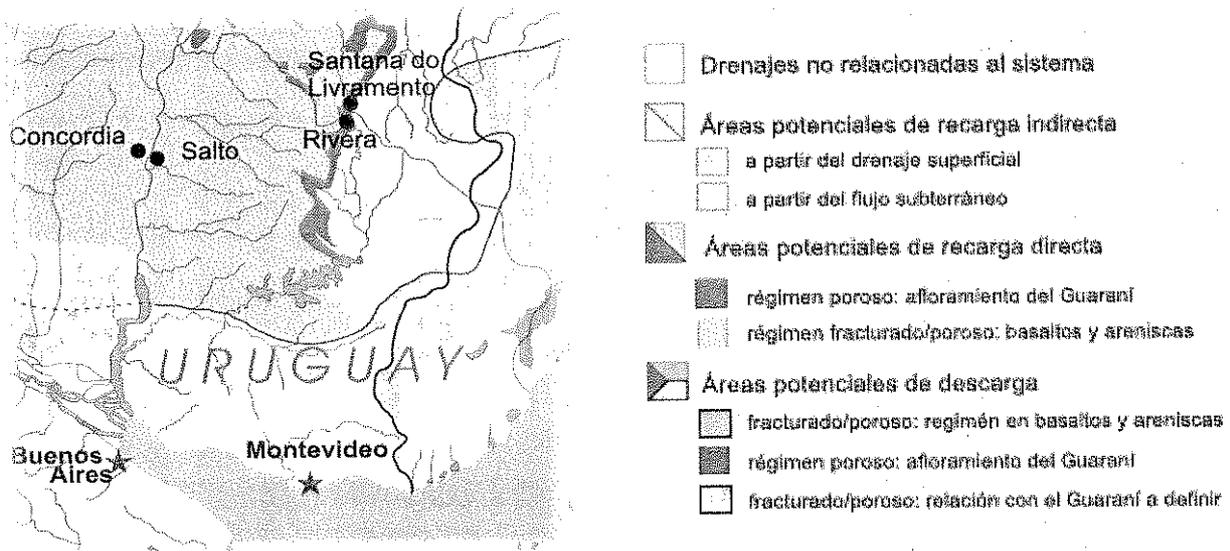
Fuente: Tesis de Maestría de Alejandro Oleaga - UDELAR

Como parte del área de influencia dentro del territorio del Uruguay se han considerado las siguientes zonas:

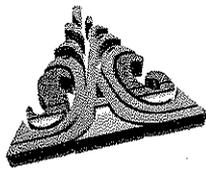
- Áreas potenciales de recarga directa.
- Áreas potenciales de recarga indirecta.
- Áreas potenciales de descarga.

Las zonas citadas anteriormente se pueden ver en la figura 4.4, donde es importante identificar las zonas de potenciales recargas por afloramiento del acuífero, zona que se extiende en una faja cartografiada con color verde oscuro, con dirección Sur - Norte, en cuyo entorno se identifican como principales centros poblados las ciudades de Tacuarembó, Rivera y Santana do Livramento (Brasil).

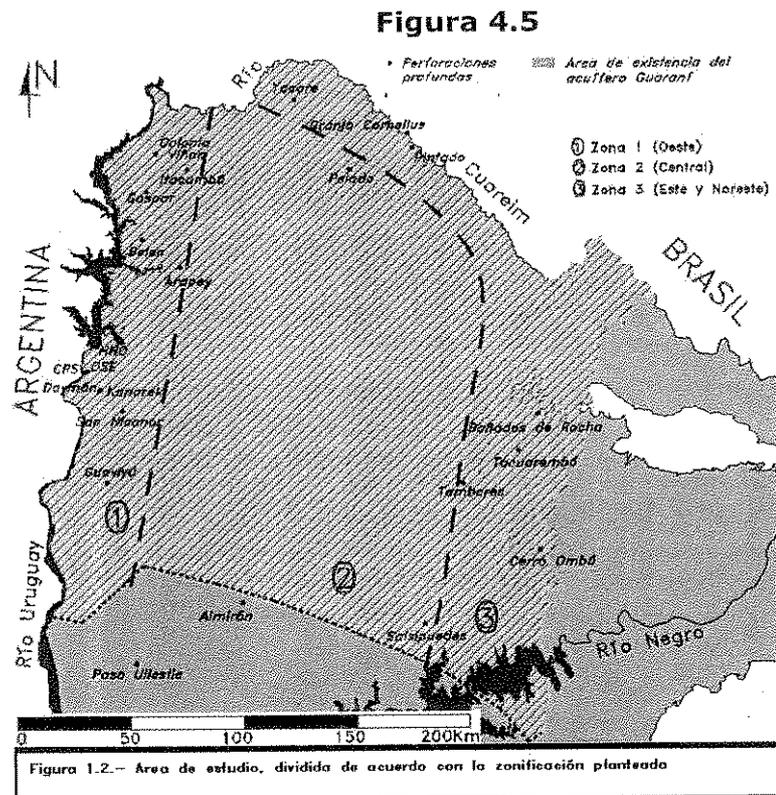
Figura 4.4



Fuente: Mapa Esquemático del Acuífero Guarani - Sistema Acuífero Guarani - 2001



Considerando el área del acuífero Guaraní en Uruguay se puede realizar una separación en tres zonas claramente diferentes (ver figura 4.5), de acuerdo a su uso, información geológica existente, la profundidad de extracción y el comportamiento hidráulico.

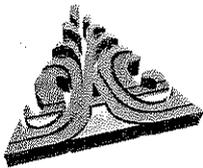


Fuente: Tesis de Maestría de Alejandro Oleaga - UDELAR

Zona 1: Corresponde a la zona Oeste de la cuenca Norte. En esta parte el acuífero presenta artesianismo, surgiendo el agua con una presión de hasta 7 kg/cm^2 y puede aportar entre 40 y $500 \text{ m}^3/\text{h}$ con pozos que están perforados en promedio hasta 1.200 m de profundidad. Estas características, sumado al hecho que en superficie la temperatura puede alcanzar los $50 \text{ }^\circ\text{C}$, ha inducido el desarrollo de importantes centros turísticos-termales, conformando actualmente el segundo polo turístico del país.

En ésta zona se ha construido una perforación para el suministro de agua potable, pero su uso actual es exclusivamente turístico-termal. Aunque su utilización brinda importantes ingresos asociados al desarrollo turístico, debido a su alto costo de construcción existen sólo nueve perforaciones, cuatro de las cuales fueron originadas en la búsqueda de hidrocarburos.

Zona 2: Corresponde a la zona Central de la cuenca Norte. Existen únicamente dos perforaciones que alcanzan el acuífero Guaraní luego de perforar más de 200 m (Salsipuedes, al sur, y Pelado, al norte), de las cuales no se extrae agua. Esto se debe a que existen pocas poblaciones (de menos de 3.000 habitantes), que junto a la población rural se abastecen de agua potable a partir de corrientes superficiales y/o perforaciones someras ($< 100 \text{ m}$ profundidad) que obtienen agua de un medio fisurado.



Dado que la base geológica de los suelos de esta zona es el basalto, los mismos han alcanzado escaso desarrollo y presentan baja productividad, por lo cual las prácticas agrícolas bajo riego no son significativas y no requieren caudales importantes que justifiquen perforar hasta alcanzar el acuífero Guaraní.

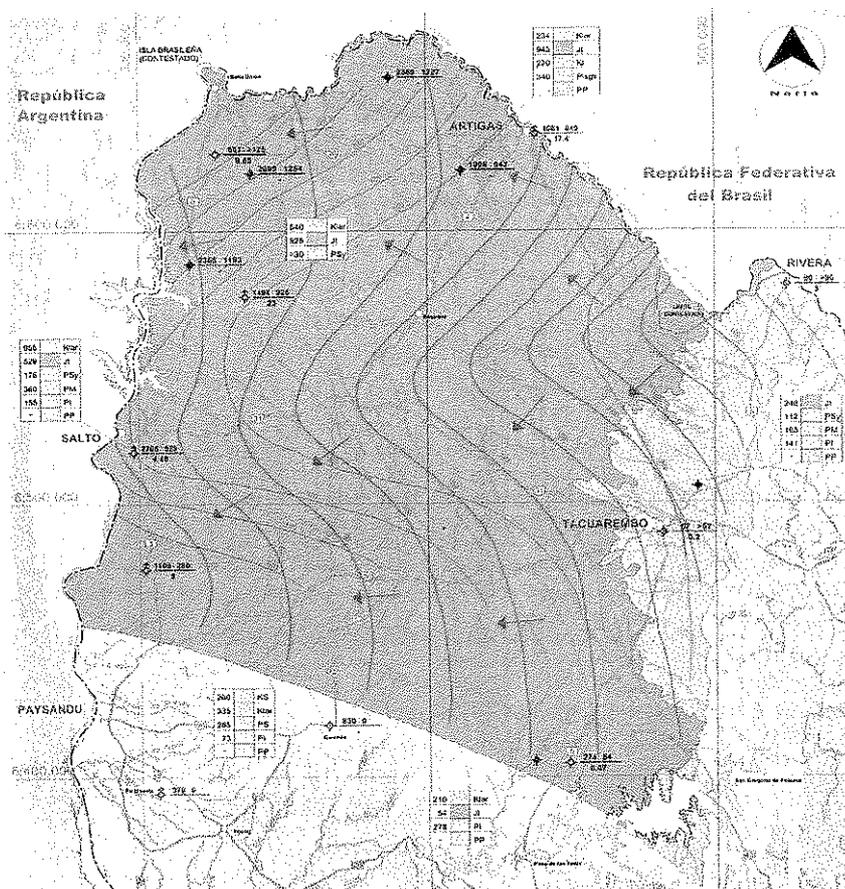
Zona 3: Corresponde al área Este y Noreste de la cuenca Oeste. En esta zona existen tres ciudades importantes: Tacuarembó, Rivera y Artigas, todas ellas capitales departamentales, cuya población alcanza los 70.000 habitantes para las dos primeras y 40.000 habitantes para la última de ellas.

En algunas partes de esta zona es escasa la presencia de recursos hídricos superficiales respecto del resto del área de estudio, lo que incide en un incremento de la demanda de agua subterránea para múltiples actividades antrópicas, destacando el uso para el abastecimiento público, principalmente en las ciudades Rivera y Artigas, que obtienen agua del acuífero Guaraní a una profundidad de entre 10 y 150 m, y para el riego de cultivos.

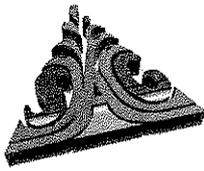
En esta zona, las areniscas que constituyen el acuífero afloran o están a poca profundidad, por lo que existen más de 200 perforaciones en explotación, encontrando en esta zona las áreas de recarga del acuífero.

Como cartografía de detalle sobre el acuífero Guaraní dentro del territorio del Uruguay se presenta la Figura 4.6, correspondiente a una parte de la Carta Hidrogeológica elaborada por la Dirección Nacional de Minería y Geología, en la cual se puede apreciar en celeste claro la zona de recarga del acuífero (aflorante).

Figura 4.6



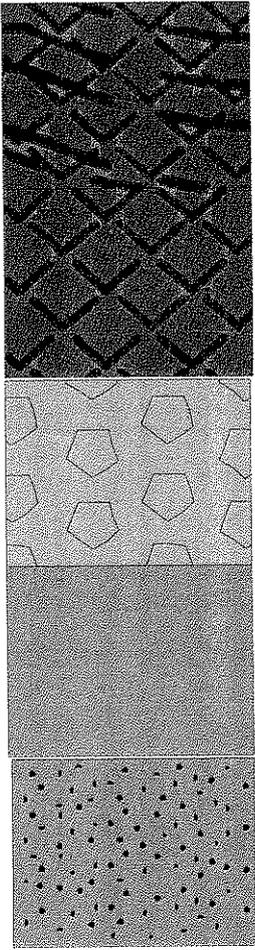
Fuente: Carta hidrogeológica del Uruguay – Junio de 2003 - sitio Web DIANAMIGE



IV.4 Modelo Hidrogeológico local⁵

Las distintas formaciones geológicas que integran el relleno de la Cuenca Norte se presentan en la Tabla 4.1, pueden ser agrupadas en cuatro unidades hidrogeológicas de extensión regional, con base a las propiedades físicas e hidráulicas de las rocas:

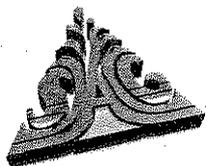
Tabla 4.1

| | |
|--|--|
|  | Acuífero superior: Constituido por sedimentos de edad Cretácico Superior, así como los primeros 200 m de los derrames basálticos (Cretácico Inferior). (De 70 a 130 millones de años) |
| | Acuitardo superior: constituido por el sector no alterado de los basaltos (Cretácico Inferior) (130 millones de años) |
| | Acuífero inferior (Guaraní): constituido por rocas sedimentarias de edad triásico jurásica (De 130 a 230 millones de años) |
| | Acuitardo inferior: constituido por rocas sedimentarias de edad devónica a pérmica (De 230 a 400 millones de años) |
| | Basamento: constituido por rocas precámbricas (600 millones de años) |

En la Figura 4.7 se muestran 2 secciones hidrogeológicas representativas del modelo principal de flujo en dirección E-W. La primera corresponde a Artigas-Constitución y la segunda a Tacuarembó-Salto.

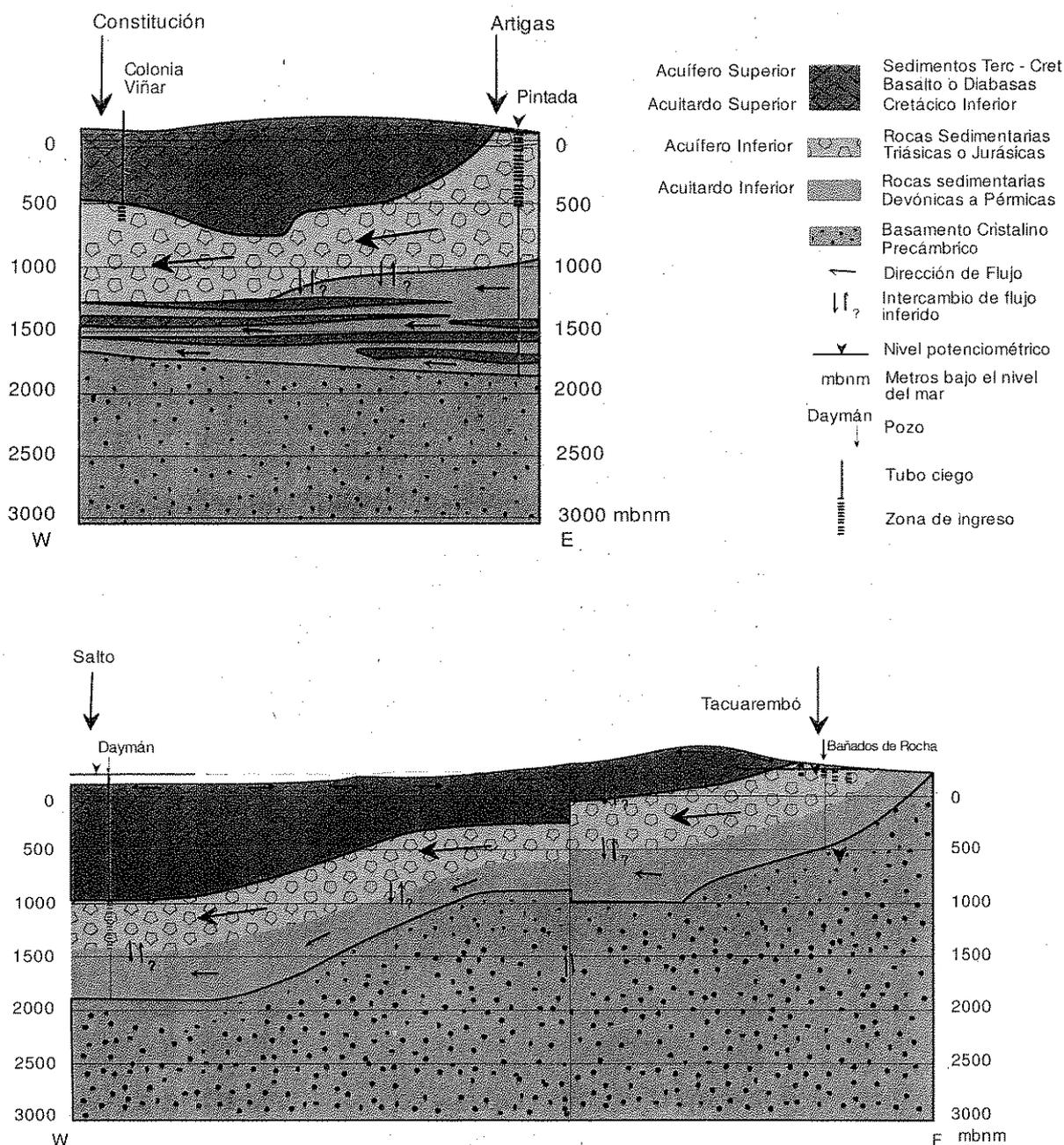
El agua escurre de Este a Oeste, ingresando en la zona donde las areniscas que contienen el acuífero se encuentran en superficie y desplazándose casi horizontalmente en dirección de Argentina, donde las areniscas se ubican debajo de los derrames basálticos a una profundidad de entre 400 a 1400m. Este desplazamiento es muy lento, estimándose que el agua demora más de 10,000

⁵ Extraído de la tesis de maestría de Alejandro Oleaga, "Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral"



años en alcanzar las cercanías del río Uruguay a partir de su ingreso en el Oeste de Tacuarembó y Rivera.

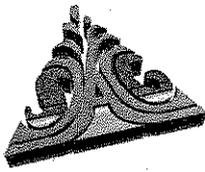
Figura 4.7



Modificado Fuente: Tesis de Maestría de Alejandro Oleaga - UDELAR

IV.5 La problemática ambiental en el SAG

Para la protección del Acuífero Guaraní se ha formulado el "Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní" con el



objetivo de apoyar a los 4 países involucrados a elaborar e implementar un marco común (legal y técnico) que permita explotar y preservar el SAG para las generaciones futuras.

Dentro de las bases de la formulación del proyecto ya se identificaron varias zonas con conflictos ambientales en torno al uso del acuífero, habiéndose identificado problemas de contaminación del recurso y sobreexplotación con interferencias entre perforaciones.

Estas áreas críticas han sido definidas como las áreas piloto de trabajo donde se han comenzado a centrar estudios para el abordaje de los problemas ya identificados. A continuación se presenta una descripción de los problemas ambientales en dichas zonas.

IV.5.1 Proyecto Piloto Itapúa

Esta área piloto se encuentra al sur del departamento de Itapúa en Paraguay y abarca un área aproximada de 800 km². Se trata de una zona de amplia explotación agrícola-ganadera, siendo la soja el principal cultivo y el ganado vacuno el más representativo. Existen planes de riego con el fin de intensificar aún más la agricultura.

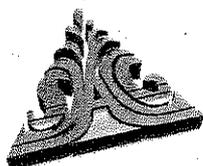
Las presiones de cambio del uso del suelo y el posible impacto ambiental de estas actividades, produce la necesidad de estudiar la factibilidad técnico-económica de realizar un uso sostenible del territorio, protegiendo el Acuífero Guaraní que subyace.



Vistas de zonas con afloramiento de Guaraní

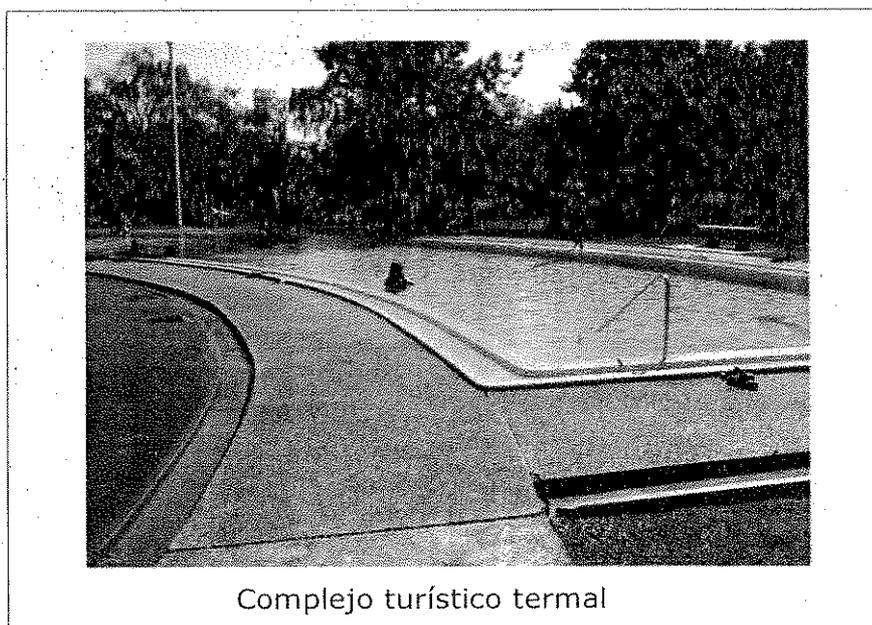
IV.5.2 Proyecto Piloto Concordia - Salto

Esta área piloto se ubica a ambos lados del río Uruguay, límite internacional entre Argentina y Uruguay, con centro en las ciudades de Salto y Concordia. Abarca una superficie aproximada de 500 km² y concentra la mayor densidad de población de la zona del litoral argentino-uruguayo con aproximadamente 200.000 habitantes. Constituye uno de los polos de desarrollo turístico termal del SAG



previéndose que se transformará a mediano plazo en el corredor turístico termal del cono sur.

En esta zona el Sistema Acuífero Guaraní no presentaría riesgos de contaminación antrópica por la espesa cobertura de basaltos, que en esa zona alcanza los 1000 metros. No obstante, existen otros problemas ambientales generados por interferencia de uso entre pozos cercanos utilizados para complejos turísticos termales, que puede traer como consecuencia la pérdida de caudales de surgencia y una posible disminución de la temperatura del agua, lo que provocaría conflictos entre perforaciones vecinas a nivel nacional y transfronterizo.



Complejo turístico termal

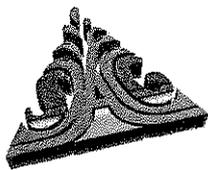
Las estrategias de gestión se enfocan hacia la protección de las fuentes de agua termal, identificando riesgos de contaminación en zonas de poca cobertura o fracturas profundas, controlando riesgos potenciales de salinización (dado que el tenor salino de las aguas del SAG ha aumentado en estos últimos 10 años), determinando radios de influencia de las perforaciones para asegurar la explotación del SAG basada en el aprovechamiento de la surgencia y la racionalización del uso de agua termal promoviendo su reutilización entre otras medidas.

IV.5.3 Proyecto Piloto Ribeirão Preto

El área seleccionada para el piloto tiene centro en el municipio de Ribeirão Preto. Dicho municipio tiene una superficie de 651 km² con una población aproximada a los 500.000 habitantes y se sitúa en la parte noreste del estado de San Pablo.

La región cuenta con un importante desarrollo agrícola, contando con la mayor producción mundial de azúcar y alcohol, con extensas áreas cultivadas de caña de azúcar y cítricos (naranja). En la región están instaladas industrias de procesado de soja, café, industrias alimenticias, de raciones y fertilizantes, entre otras.

La región presenta un importante proceso de crecimiento urbano y existe una intensa actividad productiva, agrícola e industrial, como consecuencia de la



cual se desarrolla un uso intenso del agua del Acuífero Guarani para abastecimiento público e industrial. Con la información disponible se ha identificado como principal problema la demanda excesiva de agua subterránea, por encima de la media regional, lo que ocasiona una disminución de los niveles piezométricos, y un mayor riesgo de contaminación, al estar gran parte de la presión antrópica sobre la zona aflorante de recarga.



Pozo para suministro de agua

En una cantidad de pozos en explotación ya se evidencian problemas de interferencia, al mismo tiempo que se aumento el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por incremento de fuentes instaladas sobre el acuífero.

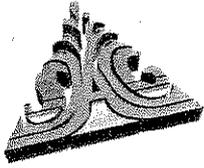
El uso excesivo de agua del acuífero ha provocado un abatimiento importante del nivel del acuífero a límites extremos, y según estudios estadísticos de pozos en la región urbana de Ribeirão Preto han demostrado una tendencia hacia una inclinación regional de 5 grados en la superficie piezométrica de Sudeste a Norte.

Las estrategias de gestión se enfocan hacia el ordenamiento del uso del suelo en la zona de la recarga del acuífero Guarani, el control del riesgo de contaminación actuando sobre el control del saneamiento urbano, las actividades industriales y prácticas agrícolas, y la racionalización de la explotación del agua para uso doméstico entre otras medidas.

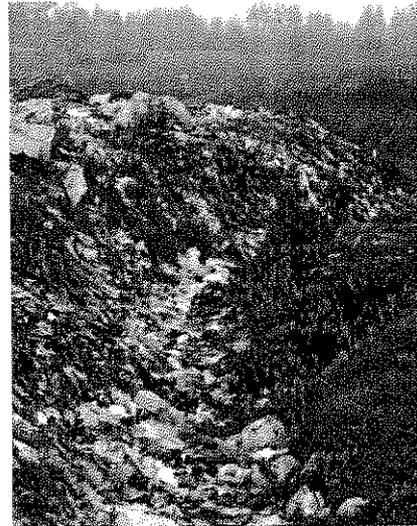
IV.5.4 Proyecto Piloto Rivera - Santana do Livramento

El área del piloto Rivera / Santana do Livramento se ubica en la frontera seca que divide a la República de Brasil, Estado de Río Grande do Sul y la República Oriental del Uruguay, Departamento de Rivera. Este proyecto piloto abarca una superficie aproximada de unos 750 Km², y concentra una población urbana de aproximadamente 168.500 habitantes, repartiéndose por partes iguales entre las dos ciudades (Rivera- Santana).

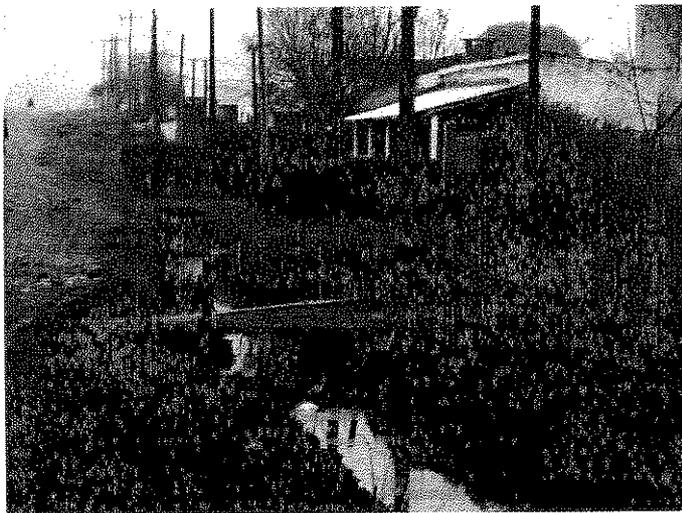
Por encontrarse el acuífero expuesto en zonas de afloramientos y presentar niveles de agua muy superficiales, en algunos casos surgentes, se vuelve muy



vulnerable a la contaminación como se ha dado el caso en Rivera, donde se han debido cerrar varios pozos por haberse constatado elevados índices de nitratos (Pérez - Rocha, 2002).



Relleno Sanitario - Rivera



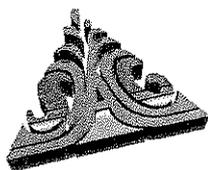
Contaminación - agua cloacal que escurre por cunetas



Alumbramiento de agua

La actividad económica de la región está basada en la producción primaria, siendo los rubros más importantes la cría de ganado ovino y bovino, lanas, cueros, uva, maíz, soja, arroz y la forestación que se da fundamentalmente del lado uruguayo y tiene un enorme desarrollo. Existen otras actividades como las plantaciones de tabaco que no tienen gran extensión, pero son importantes por su influencia sobre el acuífero.

El sector industrial tiene poca relevancia en relación a los establecimientos agropastoriles, pero sin embargo, algunas actividades allí desarrolladas pueden tener fuerte impacto, como ser frigoríficos y mataderos. El sector comercial por su parte representa una actividad importante de sustento de ambas ciudades, donde



se destacan por su cantidad y potencial riesgo de contaminación del subsuelo, las estaciones de servicio que solo en la ciudad de Livramento alcanzan las 16. En Livramento, si bien se ha clausurado el vertedero municipal, alejando los residuos a 300 km de la ciudad, se mantiene como un potencial foco de contaminación.

Las dos ciudades hacen un uso intensivo del agua del acuífero para uso como fuente de agua bruta para el abastecimiento de agua potable. La ciudad de Livramento se abastece en un 100% del recurso subterráneo, mientras que en Rivera el uso del agua del acuífero varía dependiendo de las reservas superficiales. Si es época de sequía donde el nivel del reservorio superficial disminuye, se aumenta el consumo del agua del acuífero.

Para esta zona se proyectan estudios de inventarios y muestreo de pozos, elaborando base cartográfica con información hidroquímica, geoquímica, hidrológica, mapas de vulnerabilidad incluyendo la ubicación de las principales áreas de carga potencial de contaminación con fuentes puntuales y difusas, y se evaluará la potencialidad del uso acuífero a escala local.

IV.6 Marco para la gestión en el Uruguay

Uno de los desafíos más importantes que tiene por delante el proyecto Sistema Acuífero Guaraní es lograr un marco Institucional y Legal que articule la protección ambiental y la explotación del acuífero. Dicha tarea, por ejemplo, deberá salvar diferencias sustanciales como que en la Argentina la responsabilidad de la gestión de los recursos hídricos recae sobre las provincias, en tanto que en Uruguay, la responsabilidad de gestión se concentra en instituciones de alcance nacional.

En Uruguay presentan competencias directas el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) en lo referente a la calidad del recurso agua, a través del control de la contaminación de los cuerpos de agua, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en lo referente a la gestión de uso del recurso, y los Gobiernos Municipales a través del ordenamiento del territorio.

Se puede destacar un conjunto instituciones involucradas, como ser la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE) participando en la realización de estudios técnicos y perforaciones, la Administración de Obras Sanitarias del Estado (OSE) realizando estudios, perforaciones y explotación de pozos para el abastecimiento agua potable, la Universidad de la República a través de estudios técnicos específicos, e Instituciones Privadas también realizando estudios, perforaciones y explotación de pozos.

IV.6.1 El rol de la Dirección Nacional de Medio Ambiente

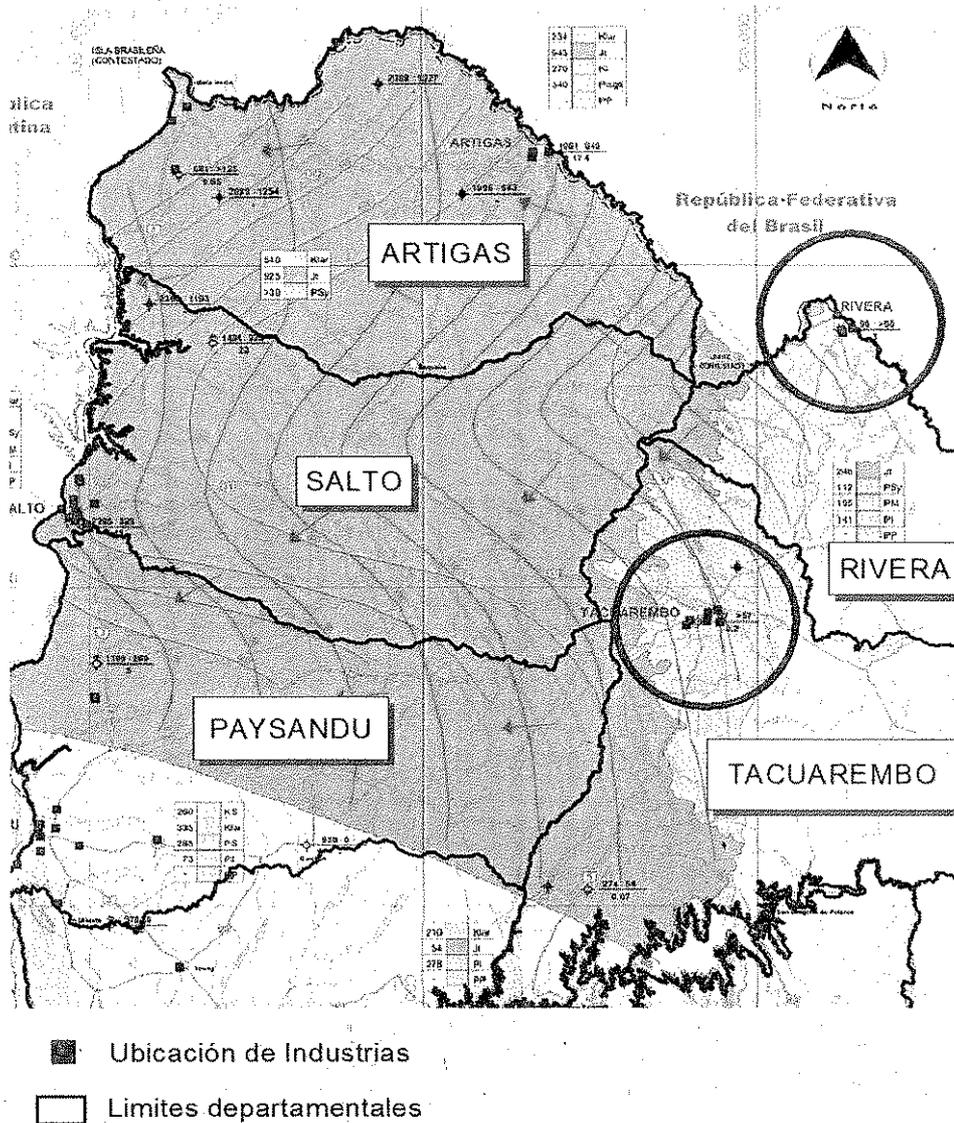
El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), a partir de su año de creación (año 1990), tiene la potestad de control de la calidad del recurso agua, consistente en proteger las aguas contra los efectos nocivos y daños al medio ambiente.

Dicha tarea es llevada adelante a través del control de la contaminación según se establece en el Decreto 253/79, en el cual se establecen las pautas para el vertido de efluentes líquidos. DINAMA realiza un control de industrias llevando un registro de su ubicación y controlando los parámetros de vertido acorde a las condiciones definidas por cada proyecto industrial.



Figura 4.7

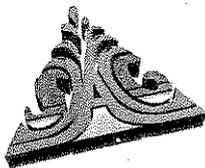
UBICACION DE INDUSTRIAS ZONA SOBRE ACUIFERO GUARANI



Base gráfica: Carta hidrogeológica del Uruguay - Junio de 2000

En lo que refiere específicamente a posibles efectos de contaminación de acuíferos la DINAMA debe evaluar y aprobar los proyectos de tratamiento de las industrias incluyendo su modalidad de disposición final de los efluentes, entre las cuales está definida disposición final a través de la infiltración al terreno, práctica que puede tener incidencia con la calidad de las aguas subterráneas.

En la figura 4.7 se presenta la ubicación de las industrias registradas ante la DINAMA que están ubicadas sobre la zona del acuífero Guaraní, ubicadas sobre una base cartográfica tomada de la carta hidrogeológica elaborada por DINAMIGE. La ubicación ha sido indicada con un cuadrado rojo, y se ha resaltado con un círculo rojo el conjunto de industrias que están ubicadas sobre zonas de recarga del Acuífero Guaraní.



IV.6.2 El rol del Ministerio de Transporte y Obras Públicas

Al Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MOTOP) compete supervisar, vigilar y regular las actividades y obras relativas al estudio, captación, uso, conservación y evacuación de las aguas, independientemente de su uso y finalidad, y también disponer la suspensión o eliminación de obras efectuadas en contravención. Tiene a su cargo el inventario de los recursos hídricos del país y el Registro Público de Aguas donde se inscriben los derechos de aprovechamiento.

Las competencias se remontan al año 1978 con la aprobación del Código de Aguas (Ley 14.859/78). Luego se formulan un conjunto de leyes y decretos complementarios hasta que en el año 2000, luego de un proceso de elaboración de documentos de base y de discusión con los usuarios, se acuerda un Plan de Gestión para el Acuífero Guaraní que se formula a través del **Decreto 214/00**.

Dicho Decreto faculta a la Dirección Nacional de Hidrografía a otorgar permisos de perforación para estudio del acuífero y permisos para la extracción y uso del agua. Crea además una Junta Asesora del Acuífero Guaraní, previendo el desarrollo de mecanismos de participación pública a través de audiencias, junta que está integrada por delegados del MOTOP, MGAP, MVOTMA, MIEM, Ministerio de Turismo, 1 de los usuarios públicos y 2 de los usuarios privados.

Como forma de complementar esta herramienta de gestión con prácticas adecuadas para la construcción de perforaciones, en el año 2003 entra en vigor una Norma Técnica de Construcción de Pozos Perforados para la Captación de Aguas, en la cual se establecen pautas bien definidas sobre buenas prácticas a seguir en la construcción de un pozo, responsabilizando de dicha tarea a un profesional competente en la materia, el cual debe participara en el desarrollo de las perforaciones en conjunto con empresas perforadoras habilitadas.

IV.6.3 El rol de los Gobiernos Departamentales

Los Gobiernos Departamentales están facultados para mantener la higiene sanitaria en el departamento, y en tal sentido, una de las principales tareas desarrolladas es la gestión de la recolección y disposición final de los residuos sólidos, participando además algunas comunas en el servicio de saneamiento para aguas de tipo cloacal.

El desarrollo de tales servicios coloca a los gobiernos departamentales al frente de un conjunto de actividades que están relacionadas con el ambiente ya que constituyen actividades potencialmente contaminantes en la medida que las mismas no se desarrollen con un marco de criterios técnicos adecuados.

Estos gobiernos además son los encargados de promover el desarrollo departamental, y por lo tanto disponen de facultades para promover y regular el desarrollo urbano, industrial, turístico, etc., incidiendo por tanto sobre el desarrollo antrópico y su efecto sobre el ambiente a través de pautas de ordenamiento de uso del territorio.



V. BIBLIOGRAFIA

1. Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays - Hidrología aplicada - 1994 McGraw-Hill Interamericana
2. Ken R. Rushton, Gideon P. Kruseman - Groundwater studies - 2004 Unesco Tno
3. FOSTER, S. - Protección de la calidad del agua subterránea - 2003 Banco Mundial UNESCO
4. Curso de Hidrología Aplicada - Agua Subterránea - UdelaR - FI - IMFIA - J. L. Genta & F. Charbonnier
5. Revista Super Interessante Nº 07 al Nº 13
6. Alejandro Oleaga, Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral - Tesis de maestría
7. Alejandro Oleaga - Artículo: "Hidrogeología y acuíferos en Uruguay" Revista Ambiente Uruguay Año I Nº 3
8. Sitio Web <http://www.cec.uchile.cl/> - Universidad de Chile
9. Nadia Boscardin, José Botghetti, Ernani da Rosa - Aquífero Guaraní, a verdadeira integração deos países do Mercosul
10. Stephen Foster, Adrian Lawrence, Brian Morris - Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano - Documento técnico del Banco Mundial Nº 390
11. Jorge de los Santos, Claudia Bessouat - Carta de vulnerabilidad del Acuífero Raigón -1999
12. Dra. Ana Vidal, MTOP - Las aguas subterráneas en el Uruguay - Diciembre 2003
13. Sitio Web <http://www.rel-uita.org>
14. <http://revista.consumer.es/> Revista Consumer, Número 77
15. http://www.igc.usp.br/geologia/aguas_subterranas.php
16. Instituto Geológico e Mineiro (2001). *Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro*. Instituto Geológico e Mineiro Versão Online no site do IGM. (http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm)
17. Sitio Web Secretaría General del Acuífero Guaraní <http://www.sg-guarani.org>
18. <http://www.ambientum.com/documents/temas/36/temas.htm>
19. http://www.ambientum.com/enciclopedia/aguas/2.01.11.06_2r.html
20. http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2002/01march_water.htm
21. Carlos Amorín Cáceres - Apuntes del curso de gestión de calidad de agua - 2003
22. FAO - Estudio Legislativo Nº 81 - Administración de derechos de agua - Experiencias, asuntos relevantes y lineamientos
23. Ralph Peck - Walter Hanson - Thomas Thornburn - Ingeniería de cimentaciones
24. Sitio Web de la Dirección Nacional de Medio Ambiente <http://www.dinama.gub.uy>
25. Carta hidrogeológica del Uruguay - Junio de 2003 - sitio Web DIANAMIGE