

LAS EVALUACIONES AMBIENTALES EN EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Environmental evaluation of groundwater exploitation

Recibido: 12/01/09
Aprobado: 28/04/09

Igle Umbria Núñez*

* Profesora de la Universidad de los Andes. Núcleo Universitario Rafael Rangel.
Departamento de Ingeniería NURR-ULA-Trujillo-Venezuela
e-mail: igleumbria@gmail.com.

Resumen

En las últimas décadas se ha observado en los países desarrollados un incremento en el interés por la contaminación del agua subterránea y por ende el impacto ambiental que pueda ocasionar el aprovechamiento de la misma, desarrollándose diversos sistemas de evaluación de la vulnerabilidad regional de acuíferos con objeto de elaborar mapas de sensibilidad y vulnerabilidad. Los proyectos de explotación del suelo, extracción de recursos y eliminación de residuos pueden producir efectos indeseables sobre el suelo y/o las aguas subterráneas en forma de cambios en cantidad y calidad, por lo tanto, al considerar los impactos de distintos tipos de proyectos sobre los recursos del suelo y las aguas subterráneas, debe prestarse atención a estos temas. La extracción de aguas subterráneas da lugar a diversos tipos de problemas, entre los que cabe mencionar: la degradación de la calidad de las aguas bombeadas, principalmente en las zonas costeras, pero también en el interior del continente; el descenso excesivo de los niveles de agua en los pozos y en el acuífero, incluso con situaciones de agotamiento, y todo ello acompañado de un incremento de costos; la afección a cursos de aguas superficiales o lagos; la subsidencia o colapso del terreno, y los impactos ecológicos en ecosistemas acuáticos, principalmente en los humedales.

Palabras clave: agua subterránea, vulnerabilidad de acuíferos, aprovechamiento de aguas subterráneas, evaluación de impacto ambiental

Abstract

An increasing interest on groundwater contamination and the associated environmental impact of its use is being observed in the last decades in developed countries. This fact has brought the development of several evaluation systems for the regional vulnerability of aquifers that allows the generation of sensibility and vulnerability maps. Because projects of soil and natural resources exploitation, as well as residues elimination, might produce non-desirable effects over the soil and

groundwater quality and quantity, the consideration of project impacts has a paramount importance. Groundwater extraction might create several problems such as groundwater degradation, both in coastal and continental areas; decrease or extinction on groundwater storage, with the associated cost increment; negative effects on surface water and lakes; terrain subsidence and collapse, and ecological impacts over aquatic ecosystems such as wetlands.

Key words: groundwater, aquifer vulnerability, groundwater exploitation, environmental impact evaluation.

El Problema

A partir de la mitad del siglo pasado, el uso del agua subterránea comienza a tomar importancia en Iberoamérica, principalmente a consecuencia del menor costo de explotación y la escasa disponibilidad de agua superficial en algunas regiones.

En algunos países desarrollados, donde la información existe, la metodología para las evaluaciones de los impactos ambientales, puede llegar a ser tan simple que requiere solamente del análisis de datos cualitativos de las condiciones hidrogeológicas y de las fuentes de carga contaminante para exportarlos con posterioridad a un sistema de información geográfico.

Sin embargo, cuando se carece de información, como generalmente ocurre en Latinoamérica, los proyectos pueden llegar a ser tan complejos que deben de incluir, además de la descripción de las condiciones hidrogeológicas, la exploración y construcción de pozos de observación, muestreos de los materiales geológicos tanto en la zona no saturada como saturada, muestreos del agua, análisis físicos,

químicos y bacteriológicos, así como cuantificaciones de la recarga y descarga, evaluación de la carga contaminante, entre otros.

Ante esta situación se hace necesaria la evaluación de metodologías ya elaboradas que se apliquen en los estudios de acuíferos y modificarlas teniendo en cuenta los escenarios existentes en las regiones o zonas de estudio y/o establecer nuevos métodos con base a las condiciones y medios disponibles.

Hay que tener en cuenta que los estudios de acuíferos ayudan a establecer estrategias de protección del agua subterránea ya que el uso de los mapas de vulnerabilidad, susceptibilidad, manejo, niveles freáticos, salinidad, entre otros, permiten determinar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas lo cual se puede utilizar para identificar los acuíferos, o zonas de los acuíferos, más vulnerables y establecer que actividades pueden causar riesgo de contaminación. En la Figura 1 se muestran algunas fuentes de contaminación de agua subterránea.

¿Se puede aprovechar el agua subterránea?

La descarga de las aguas subterráneas a través de manantiales constituyó un elemento básico para la supervivencia de los primeros seres humanos y también para su progresivo desarrollo. El hombre fue aprendiendo a aprovechar mejor esas aguas mediante la excavación de zanjas, pozos y galerías subterráneas. Sin embargo, este tipo de aprovechamientos hídricos no exigió la cooperación o el acuerdo de colectivos humanos relativamente grandes.

El aumento del aprovechamiento del agua subterránea se ha debido especialmente a tres factores que, con cierto orden de prioridad, son: la invención de la bomba de turbina, que permite extraer con facilidad agua de pozos tubulares desde profundidades elevadas, siendo posible caudales de varios a algunos centenares de litros por segundo; la gran mejora y abaratamiento de las técnicas de perforación de pozos, y el progreso de la ciencia hidrogeológica, que está contribuyendo decididamente a suprimir la idea de que el origen, movimiento y localización de las aguas subterráneas es algo inasequible, misterioso y propio de adivinos.

De hecho, estas aguas son susceptibles de evaluación cuantitativa con incertidumbres similares o menores que el agua en las otras fases del ciclo hidrológico. En general, este gran desarrollo de las aguas subterráneas ha sido muy positivo, pues ha contribuido por una parte a reducir de modo muy significativo la escasez de alimentos y, por otra parte, ha facilitado el suministro de agua potable a centenares de millones de seres

humanos, tanto en las zonas rurales y económicamente deprimidas, como en países altamente industrializados. Sin embargo, este espectacular aumento en el uso de las aguas subterráneas se ha efectuado con frecuencia al margen de las instituciones públicas nacionales responsables de las grandes estructuras hidráulicas, que bien por falta de conocimientos hidrogeológicos, bien por inercias institucionales o por otros motivos, han tenido una participación reducida en la planificación y control de esos aprovechamientos de aguas subterráneas, cuando no opuesta.

Los potenciales efectos negativos del desarrollo del uso de las aguas subterráneas, si somos realistas, han sido frecuentemente exagerados hasta convertirlos en auténticos "hidromitos". Es como atribuir a la humanidad la condición de enfermiza, cuando sólo algunas personas tienen fiebre. Parece, pues, conveniente destacar algunas diferencias entre el comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas que tienen especial incidencia para conseguir una gestión adecuada de este recurso. Estas diferencias no sólo se refieren al comportamiento hidrológico, sino también a los aspectos socioeconómicos.

En la mayor parte de los acuíferos, las aguas subterráneas se mueven con gran lentitud. Su velocidad casi siempre es inferior a 1 m/día. En cambio, las aguas superficiales fluyen en los ríos con velocidades del orden de 100 km/día, es decir, son unas 100.000 veces más rápidas que las aguas subterráneas (Custodio et al, 1983). Ahora bien, el flujo de aguas superficiales o subterráneas que fluye a través del terreno puede no ser tan distinto ya

que el agua superficial circula por unos cauces de sección muy pequeña, en comparación a la sección del acuífero a través de la cual fluyen las aguas subterráneas. En cambio, el volumen de agua almacenada en superficie (lagos, embalses artificiales y ríos) es muy pequeño en comparación con el volumen de agua dulce almacenada en los primeros dos o tres kilómetros de la corteza terrestre.

Con frecuencia, en muchos países el agua dulce subterránea almacenada y extraíble en los acuíferos suele ser del orden de diez a cien veces superior al agua almacenada en los lagos naturales y/o en los embalses hechos por el hombre; tal es, por ejemplo, el caso de California, donde hoy es generalmente admitido que el agua dulce extraíble almacenada en sus acuíferos es del orden de veinte veces superior al agua máxima que puede ser almacenada en los embalses superficiales con una capacidad del orden de 50 km³. Esto hace que el tiempo medio de permanencia de una partícula de agua en un embalse o lago superficial y en un acuífero sea muy distinto; desde semanas o meses en un lago, a decenios y hasta milenios en la mayor parte de los acuíferos. Este almacenamiento sensiblemente mayor del agua subterránea en los acuíferos concede a este recurso una gran inercia, de modo que los acuíferos o embalses subterráneos sufren menos la variabilidad del clima. Esta característica de las aguas subterráneas es muy importante desde el punto de vista práctico, especialmente al programar acciones para mitigar los efectos de la sequía.

Otra diferenciación muy relevante entre las aguas superficiales y subterráneas es su vulnerabilidad a

la contaminación y su posible recuperación una vez contaminadas. Como es bien sabido, las aguas superficiales son muy sensibles a los vertidos de sustancias tóxicas. Considerando que una partícula de agua (contaminada o no) viaja en un río con una velocidad típica del orden de 100 km/día, esto supone, por ejemplo, que un vertido tóxico en la cabecera del río Rin en Suiza estaría en la desembocadura del río en Holanda en un par de semanas, aproximadamente. En cambio, las aguas subterráneas contaminadas se mueven con extraordinaria lentitud y antes de que un vertido contaminante en un acuífero, por ejemplo, por fugas de un tanque de gasolina, aparezca en un manantial, pozo o río, pueden fácilmente transcurrir algunos años.

En ocasiones, cuando se ha detectado una contaminación de aguas subterráneas, el agente causante de la contaminación –por ejemplo, una filtración de un tanque enterrado de sustancias tóxicas– puede no existir física o legalmente. Esa contaminación suele deberse esencialmente a los usos del terreno, entre los que la fertilización agrícola y la ganadería suelen ser importantes agentes. Tal es el caso de la severa contaminación por nitratos que padecen numerosos acuíferos en el Reino Unido, Holanda, Dinamarca y Alemania. Dentro de este contexto, planear y administrar los recursos hídricos de manera sustentable no es una tarea fácil.

Cuando se habla de la sensibilidad ambiental en Aguas Subterráneas, el origen de los problemas diverge según la actividad económica, tal es el caso que cuando se trata de la agricultura el mayor riesgo de contaminación de las aguas subterráneas procede, sobre todo, aunque no exclusivamente, del uso de

productos agroquímicos en el cultivo intensivo de regadío. La mayoría de la información disponible, incompleta, se refiere a los nitratos. Otros problemas, principalmente en tierras de regadío, son los aumentos de sulfatos y bicarbonatos, debido al uso de fertilizantes y correctores del suelo, y el incremento de la actividad biológica en los suelos ricos en carbonatos. Generalmente se produce un aumento progresivo de la dureza del agua subterránea. Los pesticidas se utilizan de forma extensiva e intensiva, pero se conoce poco su comportamiento, el posible movimiento a través de la zona no saturada y su incorporación a los acuíferos. En el caso de la industria alimentaria, el impacto en las aguas subterráneas aparece cuando los residuos orgánicos de origen animal o vegetal se vierten en los campos, generalmente infiltrando lixiviados concentrados, ricos en materia orgánica.

Así mismo, la contaminación industrial presenta formas diferentes. Sólo las fábricas modernas han tenido en cuenta su impacto ambiental. Muchas instalaciones industriales están situadas encima de acuíferos importantes y vulnerables, y los que autorizaron su funcionamiento ni eran conscientes de ello ni muy sensibles respecto al medio ambiente. Un gran número de fábricas son pequeñas y carecen de la capacidad de controlar y eliminar sus residuos de forma segura, que suelen acabar en vertederos clandestinos, absorbidos por pozos o infiltrándose en el suelo. Muchos de los problemas de contaminación de las aguas subterráneas se refieren a la eliminación de residuos industriales. Los vertederos industriales son escasos y pequeños y algunos, que ayudaron a aliviar la situación en los alrededores de las zonas urbanas e industriales, han sido cerrados a

causa de su mala gestión (lo que es parcialmente cierto), de la falta de permisos o del rechazo popular, orientado políticamente, pero sin justificación técnica. Así, disolventes, metales pesados, aceites, lubricantes y otros de diversa índole, recogidos y aislados parcialmente, se añaden a los residuos vertidos o enterrados de forma incontrolada en canteras, minas de grava a cielo abierto y arena y depresiones naturales, como sumideros, yendo a parar de este modo a las aguas subterráneas. En el caso del aporte de contaminación por índole urbano, los afluentes sin depurar o parcialmente tratados suelen acabar en ríos locales; no resulta extraño, pues, que en las zonas cársicas se introduzcan en sumideros. A pesar del gran esfuerzo llevado a cabo por las autoridades responsables de la gestión del agua en algunas regiones y/o países, el problema todavía sigue siendo grave porque se requieren grandes inversiones para reconducir la situación de partida. Asimismo, las ciudades pequeñas carecen de la capacidad técnica y de la sensibilidad ambiental necesaria para poner en marcha plantas depuradoras. A menudo, los organismos provinciales, regionales o estatales sufragan el costo total o parcial de la construcción, pero su funcionamiento es responsabilidad de las autoridades locales.

Los estudios de impacto ambiental y vulnerabilidad, representan una necesidad para propósitos de regulación, dirección y toma de decisiones en todos los niveles de gobierno; así como para la planificación, definición de políticas y gestión a nivel operacional concerniente al manejo de los recursos hídricos y la protección de las aguas subterráneas. Los resultados de estos estudios se

pueden utilizar para identificar áreas susceptibles de contaminación, priorizar esfuerzos para una evaluación más detallada, diseñar redes de observación y evaluar situaciones de contaminación y sobreexplotación, para un mejor manejo del recurso aprovechable. Si se alcanzan los objetivos planteados al realizar la evaluación, se tendrá a disposición de la comunidad científico-técnica, así como también de las instituciones gubernamentales, entidades públicas y privadas y del resto de los actores involucrados, un conjunto de metodologías para aprovechar, adaptar y validar en diferentes condiciones hidrogeológicas, de explotación, geográficas, sociales y para distintos tipos de contaminantes, los acuíferos. Todo este trabajo servirá de pauta para que las autoridades definan políticas y elaboren normas donde se aborde los estudios de evaluación de impacto ambiental.

El uso del agua subterránea, ha producido unos beneficios socioeconómicos indudables, pues ha facilitado el aprovechamiento de agua potable a aproximadamente la mitad de la población mundial, y también la producción de alimentos en zonas económicamente deprimidas como la India o China, donde el problema de las hambrunas no sólo prácticamente ha desaparecido, sino que incluso alguno de estos países se ha convertido en exportador de alimentos básicos. Es significativo que hace ya más de diez años (Dains et al, 1987) estimaban que el 70% u 80% de la producción agrícola de la India dependía del agua subterránea. Por lo general, hay pocos datos específicos y cuantitativos sobre los aprovechamientos de aguas subterráneas, pero a veces se encuentran interesantes excepciones. Por ejemplo, (Klohn et al, 1998),

expertos de la FAO, dicen lo siguiente: "Aunque los sistemas más grandes de regadío se hacen con aguas superficiales, el agua subterránea tiene un papel estratégico. Como su garantía de suministro es mayor que la de las aguas superficiales, los regadíos basados en aguas subterráneas suelen tener un mayor rendimiento. El agua subterránea constituye también un recurso de reserva cuando la sequía reduce la disponibilidad de agua superficial. Los agricultores acceden al agua y la extraen de modo individual, y por ello tienen su gestión directa con la correspondiente atención a su mantenimiento y a los costos. El agua subterránea normalmente es sana, y no implica peligro de enfermedades hídricas. El acceso al agua subterránea es con frecuencia un factor crítico, que permite a las poblaciones rurales salir de la pobreza, pues este recurso puede ser conseguido cerca de donde va a ser utilizado".

¿Cómo se plantea el estudio de los impactos ambientales sobre las aguas subterráneas?

Como base para contemplar los impactos sobre el medio ambiente del suelo y/o del agua subterránea, Canter (1999) propone un modelo en seis etapas o actividades. Este modelo es flexible y puede adaptarse a diversos tipos de proyectos mediante modificación, en caso necesario, para contemplar aspectos específicos de proyectos determinados en localizaciones extraordinarias. Debe observarse que este modelo se centra sobre el proyecto y sus impactos sobre el agua subterránea; sin embargo, el modelo también puede aplicarse a planes, programas y acciones reguladoras.

Etapa 1: Identificación de los impactos sobre cantidad y calidad del agua subterránea sobre el proyecto de explotación propuesto.

Etapa 2: Descripción del estado de los recursos del suelo y/o aguas subterráneas.

Etapa 3: Obtención de estándares de cantidad y calidad para el suelo y/o aguas subterráneas.

Etapa 4: Predicción de los impactos para el medio ambiente del suelo y/o aguas subterráneas.

Etapa 5: Valoración de la importancia del impacto.

Etapa 6: Identificación e incorporación de las medidas correctoras.

Por tanto, la vinculación entre el procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental y los proyectos o actuaciones sobre las aguas subterráneas, puede exponerse desde dos puntos de vista:

- Cuándo y cómo los proyectos o captaciones de aguas subterráneas están sometidos a dicho procedimiento, según la normativa ambiental vigente.

- El tratamiento que el recurso hídrico subterráneo y los acuíferos tienen en los Estudios de Impacto Ambiental, así como sus dificultades específicas, tanto para el promotor como para el evaluador.

En relación a las características que debe presentar un proyecto de estas características, además de las de localización, los aspectos constructivos y cualquier otra que informen sobre el mismo, debe hacerse mención expresa a la justificación de la demanda, las medidas para el ahorro y uso eficaz, la ausencia de alternativas de uso del recurso, los caudales a extraer y el régimen de extracción. Teniendo en cuenta que entre los aspectos más significativos a desarrollar en el

Estudio de Impacto Ambiental, se encuentran:

- La Climatología, en la que se hace necesaria una caracterización climática y una frecuencia de sequías.
- La Hidrología superficial, teniendo en cuenta la red hidrológica, el grado de regulación y el régimen de caudales.
- La Hidrogeología, que involucra la geología de detalle (en función de la Unidad Hidrogeológica o Acuífera), un inventario de captaciones, caudales, régimen de explotación, calidad del agua y planteamiento de balance hídrico recarga/descarga del acuífero.
- Vertidos, toma en cuenta la generación o incremento de volúmenes y tratamiento.
- Vegetación-Fauna, en relación a los ecosistemas que puedan verse afectados por la alteración de los procesos de recarga hídrica y variación de nivel o niveles freáticos.

Se indica así mismo la necesidad de que el Estudio dé respuesta a las consideraciones y especificaciones que señalan los distintos organismos y entidades consultados en el período de sugerencias.

Algunas variables a ser estudiadas en una evaluación de impacto ambiental de aguas subterráneas.

El acopio de las informaciones depende del nivel de intensidad que se decide dar al estudio. En igual situación están los demás datos requeridos. Si se dispone de la información, la decisión de efectuar el estudio en un determinado nivel dependerá de factores tales como el financiamiento disponible, plazo de entrega o finalidad que se persigue: estudio de alternativas, evaluación de un anteproyecto para fines presupuestarios, etc. En todo caso el primer paso consiste en indagar qué

tipo de información se encuentra disponible conjuntamente con su calidad, y definir de esta manera hasta qué etapa se puede llegar con dicha información.

Guevara, 1987 propone los antecedentes con los que se debe contar para el desarrollo de proyectos hidráulico o agroambientales tal como se señalan en la Tabla 1. Se consideran antecedentes básicos (B) aquellos que son fundamentales sobre todo para el diseño final de las obras, y antecedentes deseables (D) aquellos que sirven para poder iniciar por lo menos un estudio semidetallado y que durante la etapa final dan una mayor seguridad a los resultados obtenidos.

Evaluación de acuíferos mediante métodos geoestadísticos.

En 1.962, Matheron, considerado el padre de la geoestadística en su forma actual, desarrolla las bases conceptuales de la teoría de las variables regionalizadas. Sin embargo las aplicaciones iniciales de la metodología de estimación fueron hechas en 1.951 por Krige, geólogo y estadístico sudafricano, para la evaluación de minas de plata y algunas de las grandes minas de oro sudafricanas. En honor a Krige, los geomatemáticos franceses han popularizado este tipo de estimación bajo el nombre de *kriging* o *krigeado* en español; Mora (1.996). Por otro lado Davis (1.972), plantea que el método es poco conocido por los geólogos de Norte América puesto que a la fecha se había publicado poca literatura en inglés sobre los nuevos conceptos de la teoría de variables regionalizadas. Aunque los postulados originales de esta teoría fueron aplicados, en principio, para la

evaluación y estimación de reservas mineras, los conceptos de esta teoría se adaptan particularmente a los problemas encontrados en ciencias hídricas, permitiendo evidenciarla relación existente entre la variabilidad espacial de fenómenos hidroclimáticos e hidrogeológicos y la precisión en el conocimiento de estos fenómenos. Delhomme (1.978) aplica estos postulados en la realización de cartografía automatizada, la obtención de datos básicos para modelos matemáticos, la estimación de precipitaciones medias en cuencas hídricas y la optimización de redes de medición.

El “*Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)* perteneciente al Ministerio del Ambiente de Francia, ha producido valiosos documentos en el ámbito hidrogeológico en los que se encuentran, además de los trabajos básicos de Matheron, los de Landreau, et al (1.985). En estos trabajos se esbozan, bajo un enfoque geoestadístico, las bases para la concepción de redes de vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas, y se establece que la concepción de una red de calidad depende del objetivo que se ha previsto para ésta; estos usualmente son: redes de alerta contra contaminación, control de una fuente de contaminación y conocimiento de la variabilidad espacial y de la evolución en el tiempo de la calidad o parte del acuífero; Mora (1.996).

Calidad del agua subterránea.

Sin duda alguna, el agua es el solvente más abundante, y es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias al estar en contacto con los terrenos en los cuales circula. Las aguas subterráneas tienen una mayor

oportunidad de disolver materiales por las mayores superficies de contacto, lentas velocidades de circulación y mayores presiones y temperaturas a las que están sometidas y facilidad para disolver CO₂ del suelo no saturado. Por ello, sus concentraciones salinas son superiores a las de las aguas superficiales, en general (Custodio et al, 1.976). La calidad de un agua queda definida por su composición, y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización, clasificando así, de acuerdo con límites estudiados, su destino para bebida, usos agrícolas, industriales, etc.

Cabe considerar la calidad natural de un agua y la calidad afectada por actividades humanas (factores antropogénicos o antrópicos), que en general llevan a su degradación (polución y contaminación). Agua natural y buena calidad no son sinónimos y en muchos casos las aguas naturales pueden ser de muy baja calidad, e incluso tóxicas. (Custodio et al, 1.976).

Calidad del agua subterránea para usos agrícolas y ganaderos.

En general, el análisis de una muestra de agua será insuficiente para determinar sobre su posible utilización para el riego puesto que, además, deben considerarse otros factores, como son la permeabilidad y calidad del suelo, tipo de cultivo, sistemas de riego, entre otros.

Los efectos que deberán considerarse al aplicar un agua de calidad determinada para el riego de

un suelo, al que puede modificar por la presencia de sus sales disueltas, son:

- a) La concentración del agua del suelo.
- b) La composición iónica del agua del suelo.
- c) El antagonismo frente a los iones del agua del suelo.
- d) La toxicidad específica.

El agua destinada a la bebida de los animales debe cumplir unas características químicas de potabilidad similares a las del consumo humano. (Custodio et al, 1.976).

Contaminación de las aguas subterráneas.

Las actividades humanas producen gran cantidad de desechos y provocan perturbaciones en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas. El resultado es con frecuencia una contaminación de las mismas, unas veces de forma depurable pero otras veces prácticamente irreversible.

La contaminación de las aguas de superficie es muy visible y por ello es capaz de poner en movimiento acciones y remedios para evitarla, o por lo menos para tratar de palearla. No sucede normalmente lo mismo con las aguas subterráneas, que al no ser visibles y estar su explotación muy distribuida, la acción protectora o paleadora llega con frecuencia tarde, y ello en el supuesto de que llegue a producirse.

Los acuíferos subterráneos, por lo lenta circulación de las aguas, capacidad de absorción de los terrenos y pequeño tamaño de los

canículos, pueden tardar mucho en mostrar la contaminación y presentan un notable poder depurador frente a muchos agentes contaminantes, aunque aquel tiene un límite, que varía mucho según sea el agente que se considere.

Desde un punto de vista de planificación y control, es preciso conocer bien los posibles caminos a recorrer por los agentes de contaminación en base a los condicionantes geológicos, hidráulicos y químicos. (Custodio et al, 1.976).

Sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas.

No es fácil establecer unos valores concretos para las sales que pueden aportar los diferentes tipos de rocas no sólo porque existen importantes diferencias de composición y alterabilidad de minerales dentro de cada uno de ellos, sino también porque las condiciones climáticas, composición del agua de recarga, tiempo de contacto, longitud del recorrido, grado de aireación, permeabilidad, etc., influyen de forma importante y a veces dominante. No obstante pueden establecerse unos criterios generales que se exponen a continuación: (Custodio et al, 1.976).

Geoestadística.

La geoestadística, según definición de Matheron (1.962) citado por Jégat (2.000), “es la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y evolución de los fenómenos naturales”. Posteriormente Matheron (1.965) citado por Fili (1.999), la

definió como un conjunto de procedimientos metodológicos para el estudio de los procesos geológicos. Journel (1.979) citado por Jégat (2.000), es la rama de la estadística dedicada al estudio de los fenómenos espacialmente distribuidos.

La geoestadística basa sus conceptos en herramientas ya existentes en otros campos de la estadística tales como procesos estocásticos estacionarios, técnicas de análisis de varianza, y predicción por mínimos cuadrados. Estas herramientas ya han sido utilizadas en el análisis de series temporales y su extensión al caso de funciones aleatorias en dos o más dimensiones, es una de las principales contribuciones de la Geoestadística. En caso multidimensional aportado por esta metodología se desvanece el concepto de pasado – presente – futuro y normalmente se hace más énfasis en la estimación dentro de cierto dominio de la extrapolación (Samper et al, 1.990).

- Profundidad hasta el agua subterránea.
- Tasa de recarga.
- Medio del acuífero.
- Medio del suelo.
- Topografía (pendiente).
- Conductividad hidráulica del acuífero.
- Coeficiente de almacenamiento.
- Transmisividad.
- Impacto de la zona no saturada o vadosa.

Conclusiones

En concordancia con lo expresado sobre los aspectos más significativos a tener en cuenta en el Estudio de Impacto Ambiental, se pueden hacer algunas consideraciones en relación con las

aguas subterráneas. De la mayoría de las consultas que se realizan a las entidades y organismos nacionales relacionados con el tema, se deduce que la preocupación general, además de poner en cuestión en muchas ocasiones el destino del agua extraída, estriba en conocer lo siguiente: cuál es el grado de explotación real del acuífero, cuál es el límite de explotación para considerarlo en situación de equilibrio, qué indicadores se van a utilizar durante la explotación que permitan la comprobación de los supuestos establecidos en el proyecto, y garanticen la ausencia de efectos negativos significativos. Las respuestas a estos interrogantes implican, técnicamente, en los Estudios de Impacto Ambiental, la necesidad de establecer correctamente algunos parámetros, y ello con sus incidencias particulares. Entre dichos parámetros destacan: la elección del ámbito de estudio; el alcance e información existente para la realización del inventario ambiental y caracterización del medio y, por último, la forma y elementos para el seguimiento de los condicionales ambientales del proyecto. De ellos deriva la posibilidad de corrección de impacto en fase de explotación.

Para la definición del ámbito de estudio, o ámbito de referencia, hay varias posturas en la metodología general de impacto ambiental, teniendo en cuenta que los distintos factores ambientales pueden tener un ámbito de influencia diferente al general del estudio. Puede adoptarse para todos ellos uno común, casi como una envolvente de los ámbitos particulares de cada factor.

En la evaluación ambiental de los proyectos de aguas subterráneas, la determinación del ámbito a estudiar suele ser una de las incógnitas más

frecuentes. La diferencia existente entre la cuenca de afección de factores como ocupación del suelo, destrucción de vegetación y ruido, por ejemplo, frente a otros como pueden ser población servida o alteración del régimen hidrodinámico, es fácil de comprender. También aparecen dificultades específicas en la realización del inventario, o prospección del medio, en la situación pre-operacional. Un primer enfoque para la definición del ámbito de estudio, categorías de inventario y controles posteriores, es factible establecerlo a partir del alcance de las acciones del proyecto, los sistemas de relaciones de medio y socioeconómico. Una aproximación se ofrece en el esquema adjunto, como propuesta inicial, en el caso de un proyecto de captación de aguas subterráneas para abastecimiento.

La obtención de datos del territorio que permitan su diagnóstico antes de la ejecución de un proyecto, puede llegar a ser una tarea muy costosa, en tiempo, personal calificado y recursos económicos. En muchas ocasiones, cuando se pretende una evaluación detallada de impacto ambiental, se necesita un nivel de conocimiento que generalmente requiere campañas de muestreo, toma de datos en ciclos de un año o varios, etc. No es extraño, por tanto, que a la hora de realizar la Evaluación existan ciertas deficiencias en el contenido de los Estudios.

El establecimiento del sistema de relaciones de un territorio y, dentro del mismo, el papel del régimen hídrico subterráneo, es básico para una correcta determinación de los efectos, en las Evaluaciones de Impacto Ambiental, de las extracciones de agua subterránea. Como ejemplo cabe citar, para estos estudios, la posibilidad de determinar

con cierta seguridad el origen y permanencia de descargas naturales en la superficie del terreno, dando lugar a zonas húmedas. Censo, en su caso, de fauna específica asociada; el grado de rareza de ésta; posibilidad de hábitats alternativos; ciclos biológicos y dependencia de usos anejos al área. Igual puede establecerse para su relación con el caudal base de algunos cursos de agua.

Para la caracterización del flujo subterráneo se necesitará contar con los datos geológicos de extensión y disposición de los materiales que lo albergan, así como un inventario de puntos de agua correctamente georeferenciado y actualizado.

Una buena definición, por tanto, de los factores territoriales citados y su sistema de relaciones, permitiría sectorizar zonas de similares características en el caso de acuíferos o unidades hidrogeológicas de importancia regional, o el establecimiento de indicadores generales para toda la formación permeable, en el caso de un acuífero de carácter local.

Por las mismas razones que han ido exponiéndose, se produce también controversia cuando se asignan atributos a los impactos detectados o previsibles de un proyecto, tales como Extensión, Persistencia y Reversibilidad, si no es suficientemente conocido el régimen hidrodinámico de un acuífero. Esta cuestión se encuentra íntimamente ligada al concepto de sostenibilidad.

Bibliografía

CANTER, LARRY W. **Manual de evaluación de Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto.** Segunda edición. Mc Graw Hill / Interamericana de España. 841 pag. 1999.

CUSTODIO E. Y LLAMAS M. Hidrología Subterránea. **Ediciones Omega. S.A. Casanova. Barcelona, España. 220 págs. 1.976.**

CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R., **Hidrología Subterránea**, Barcelona: Editorial Omega, 2 vol., pp. 1-2350. 1983.

CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R. **"Consideraciones sobre la génesis y evolución de ciertos "hidromitos" en España"**, en En Defensa de la Libertad - Homenaje a Víctor Méndoza. Madrid: Instituto de Estudios Económicos, pp. 167-179. 1997.

DAINES, S.R., POWAR, J.R. **"Economic Returns to Irrigation in India"**, Report prepared by SRD Research Groups Inc. for the U.S. Agency for International Development. 1987.

DAVIS J. **Statistics and data analysis in geology.** New York, John Wiley and Sons. 550 págs. 1.972.

DELHOMME, J-P. **Application de la théorie des variables regionalisées dans les sciences de l'eau.** Orleáns. Bureau de Recherches Géologiques et Minières., BRGM. III(4): 341 – 375. 1.978.

FILI M. et al. **Variables Hidrogeológicas Regionalizadas. Metodologías y casos de estudio.** Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina. 156 págs. 1.999.

GUEVARA, J. **Métodos de estimación y ajustes de datos climatológicos**. Caracas: Ediciones UCV. 126 p. 1987.

JÉGAT H. **Fundamentos del G.I.S. y Geoestadística Aplicados a los Recursos Hídricos**. Curso Internacional Pre – Congreso. Santiago del Estero, Argentina. 2.000. JOURNAL, A. Y HUIJBREGTS. CH. **Mining geostistics**. London. Academic Press. 600 Pp. 1.979.

KLOHN, W.E., APPELGREN, R.G., OHLSSON, L. **"Water and Food"**, UNESCO Congress on "Water into the 21st Millenium: a Looming Crisis?", Paris 2-5 June 1998, vol. 2, preprint: 1-14. 1998.

LANDREAU, A, LALLEMAND – BARRES, A Y SEGUIN J.J. **Conception des réseaux de surveillance de la qualité des eaux souterrâines**. Orleâns, Bureau de Recherches Geológicas et Minières., BRGM. Note technique 85 SGN 627 EAU. 1.985.

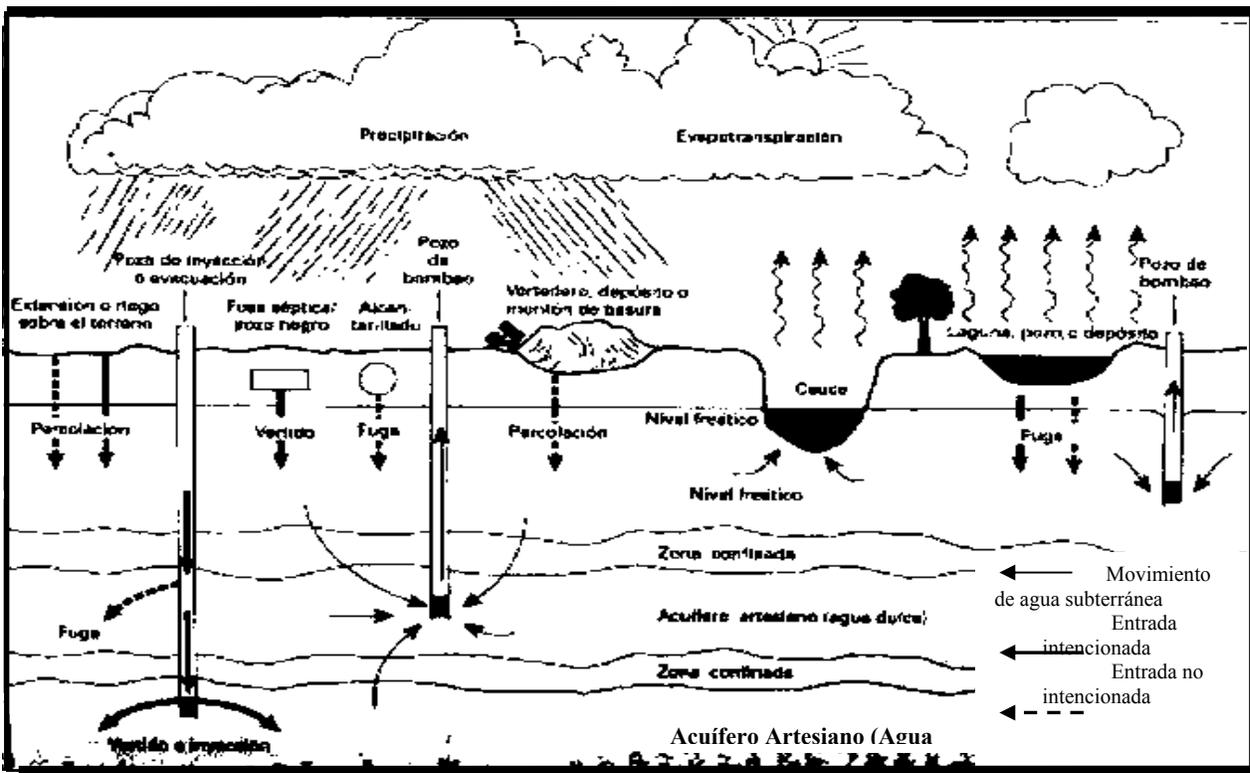
LLAMAS, M.R. **"Groundwater Overexploitation"**, Proceeding of the UNESCO Congress on "Water in the 21st Century: a Looming Crisis?", Paris, 2-5 June 1998, vol. 2, preprint: 1-20. 1998.

MATHERON G. **Traité de Geoestatistique Apliquée** , Tome 1 and 2, Memories du Bureau De Recherches Geologiques et Minières, Technip. París, Francia. 1.962.

MORA M. LUIS E. **Aplicación de Métodos Geoestadísticos para el Análisis de Parámetros de Calidad de Agua en Acuíferos**. Tesis de Maestría. CIDIAT. Mérida – Venezuela. 1.996.

SAMPER, F. J. Y CARRERA, J. **Geoestadística, aplicaciones a la hidrología subterránea**. Barcelona. Centro internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1.990.

Figura 1.- Ejemplos de fuentes de contaminación de agua subterránea (Franck y Brownstone, 1992).



Fuente: Canter 1999.

Tabla 1

Antecedentes hidrológicos e hidrometeorológicos básicos (B) y deseables (D) para proyectos de investigación agroambientales.

Antecedentes hidrológicos e hidrometeorológicos básicos (B) y deseables (D) para proyectos de investigación agroambientales	Sistemas de Riego	Obras de drenaje Natural	Obras de captación	Vertederos o Compuertas	Trazados de Vías Agric.
Precipitación Medias Regionales, Anuales	B	B	D	D	B
Precipitación Medias Regionales, Mensuales	B	B	D	D	B
Precipitación Medias Regionales, Diarias	B	B	D	B	B
Precipitación Puntuales Anuales	D	D		D	D
Precipitación Puntuales Mensuales	D	D		D	D
Precipitación Puntuales Diarias	D	D		D	D
Evaporación Anual	D	D			D
Evaporación Mensual	D	D			D
Humedad Relativa	D	D			D
Radiación Solar	D	D			D
Temperaturas Anuales	D	D			D
Temperaturas Mensuales	B	D			D
Temperaturas Diarias	D	D			D
Velocidad y dirección del Viento	D	D			D
insolación	D	D			D
Caudales Medios Anuales	D	B			
Caudales Medios Mensuales	B	B			D