



CAMBIO GLOBAL Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

MENSAJES CLAVES

- las aguas subterráneas constituyen un excelente “amortiguador” frente a la variabilidad climática de los abastecimientos del agua superficial (favoreciendo así la adaptación al cambio climático), debido a las reservas almacenadas en los sistemas acuíferos
- los impactos producidos por el calentamiento global antrópico en las aguas subterráneas siguen siendo inciertos, pero son motivo de preocupación dada su rápida evolución en comparación con las oscilaciones climáticas naturales
- los registros paleoambientales indican que se produjeron importantes cambios en los sistemas de aguas subterráneas como resultado del “cambio climático natural” producido en los últimos 10.000-500.000 años, y que se han producido variaciones cuantificables en la tasa de recarga y en su salinidad durante los últimos 50-100 años
- algunos cambios antropogénicos en los usos del suelo han causado grandes impactos en las aguas subterráneas, siendo la intensificación de la agricultura en respuesta al crecimiento de la población mundial y de la demanda de alimentos uno de los principales factores determinantes
- el descenso de los recursos de aguas subterráneas desde el decenio de 1950, principalmente por el bombeo de pozos destinados a la agricultura de regadío, ha dado lugar a una transferencia indirecta neta de agua de la superficie terrestre al mar, lo que ha contribuido al aumento del nivel del mar

¿Cómo se relacionan el cambio climático y el uso de la tierra a nivel global con las aguas subterráneas?

Las aguas subterráneas (contenidas en sedimentos y rocas) constituyen la reserva de agua dulce más importante del planeta, habitualmente con tiempos de almacenamiento que van de décadas a siglos y milenios. Los recursos hídricos subterráneos representan, por lo tanto, un excelente “amortiguador” contra los efectos de la variabilidad climática sobre los abastecimientos de aguas superficiales, debido a las importantes y distribuidas reservas generalmente almacenadas en los sistemas acuíferos. Sin embargo, se plantea la cuestión de hasta qué punto las propias reservas de aguas subterráneas son naturalmente adaptables al cambio global, y si estamos haciendo lo suficiente para ayudar a conservarlas y protegerlas.

Las aguas subterráneas fluyen hacia y desde los sistemas acuíferos en el subsuelo, y su almacenamiento se incrementa o se reduce como resultado de los cambios en este equilibrio, que varía temporalmente y está controlado tanto por las condiciones naturales como por las actividades humanas:

- los flujos de entrada en las zonas de recarga -principalmente por la infiltración del exceso de la precipitación y de los cuerpos de agua superficiales y como resultado de las prácticas de riego agrícola (y más localmente por las filtraciones de las fugas de agua urbana y la eliminación de aguas residuales).

UN OASIS DEL SAHARA - FORMADO POR LA DESCARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS ALMACENADAS EN GRANDES SISTEMAS ACUÍFEROS DURANTE 10.000 - 1.000.000 DE AÑOS





- las descargas naturales en manantiales y en cursos de agua, humedales y lagunas, así como por los bombeos desde los pozos.

Previo a la actividad antropogénica a gran escala (antes de 1850 como mínimo y antes de 1950 en muchas regiones), el impacto humano en los sistemas de aguas subterráneas (en términos de modificación, extracción y contaminación era minúsculo en comparación con el recurso disponible. La mayoría de los sistemas acuíferos mostraban un equilibrio entre la recarga y la descarga, y la calidad natural de las aguas subterráneas era, en general, excelente. Sin embargo, el crecimiento de la población, la intensificación de la agricultura, la urbanización/industrialización y la modificación del clima han incrementado las presiones sobre las aguas subterráneas.

El objetivo de este documento estratégico es examinar el conocimiento actual sobre los efectos a gran escala del cambio climático y del uso antropogénico de la tierra en los recursos de aguas subterráneas, tanto en términos de cantidad como de calidad ⁽¹⁾. En el futuro, cuando se haga un balance acerca de la sostenibilidad social de las actividades humanas, será esencial considerar

(1) Otros informes de esta Serie han abordado los temas de la producción agrícola (Seguridad alimentaria y aguas subterráneas), la urbanización (Ciudades resilientes y aguas subterráneas) y la contaminación industrial (Salud humana y aguas subterráneas)

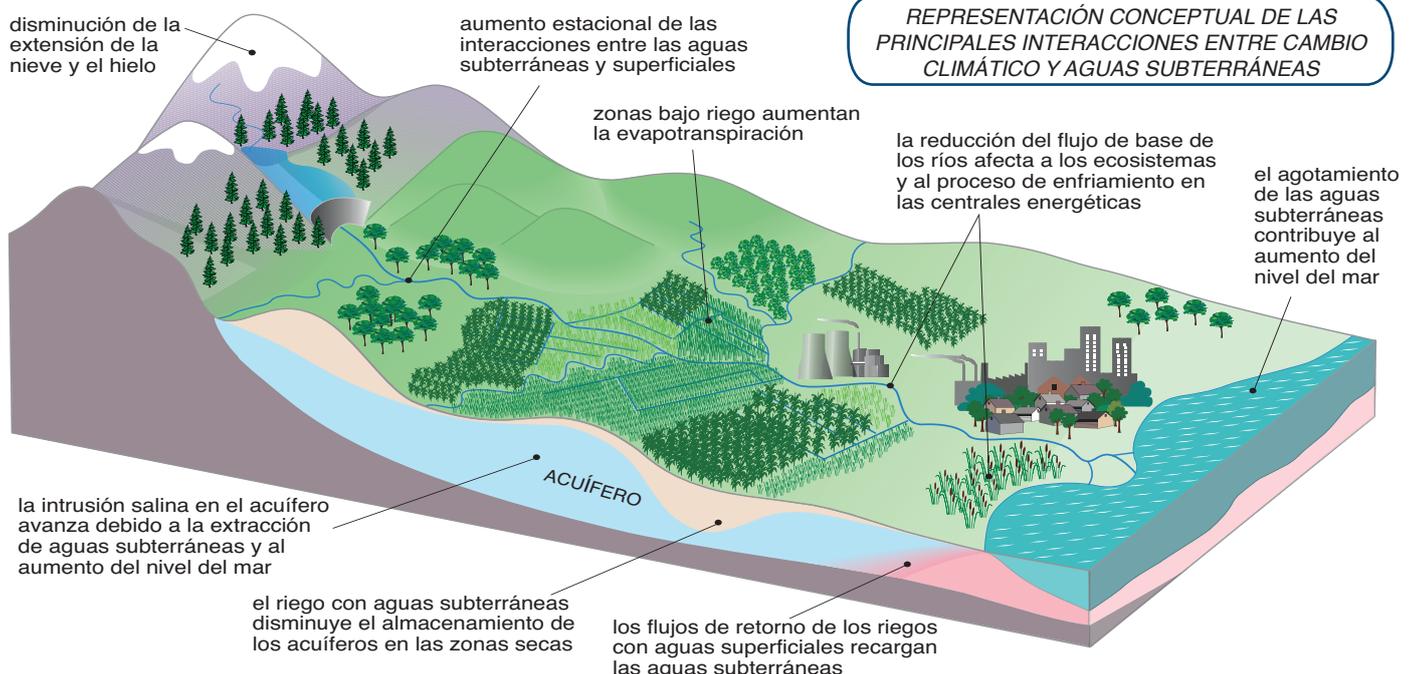
cuidadosamente el consumo y deterioro de las aguas subterráneas, así como su impacto en el patrimonio ambiental.

¿Cuál es el probable efecto del calentamiento global en las aguas subterráneas?

La estimación de las tasas de recarga actuales de las aguas subterráneas (así como la predicción de las futuras) tiene una importancia fundamental a la hora de considerar la sostenibilidad de los recursos: en zonas de aridez creciente la recarga de las precipitaciones será menos significativa que la recarga indirecta por la escorrentía superficial y la recarga ocasional por la actividad humana.

Sigue existiendo una incertidumbre considerable sobre el efecto preciso del calentamiento de la Tierra en la recarga de las aguas subterráneas en las distintas regiones. Por una parte, el aumento de la temperatura ambiente provocará menos precipitaciones pero más intensas y puede producirse un aumento de la recarga (que compensaría el aumento de la evapotranspiración), de modo que en algunos acuíferos fisurados (de escaso almacenamiento) la capa freática puede elevarse a niveles más altos que los registrados hasta ahora, causando daños en los bienes y los cultivos. Por otra parte, si las precipitaciones son

REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE LAS PRINCIPALES INTERACCIONES ENTRE CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS



menores, pero más intensas, la humedad del suelo disminuirá, lo que podría dar lugar a su erosión y a la formación de cárcavas, o a la compactación del suelo, que reduciría la capacidad de infiltración y, por lo tanto, la recarga de los acuíferos.

Es importante señalar que las “tasas naturales” de cambio climático y de la cobertura de la tierra que se han experimentado regularmente en los últimos 400.000 años han sido más lentas que las de los cambios inducidos por el hombre. La tasa de calentamiento global más baja prevista es unas 10 veces mayor que la que se ha registrado anteriormente, lo que suscita preocupación por su efecto en la recarga de las aguas subterráneas, especialmente en los acuíferos de bajo almacenamiento de los que dependen millones de personas en las regiones tropicales. No obstante, dada la inercia que presenta el almacenamiento de muchos de los grandes acuíferos, sólo un cambio climático sostenido en el largo plazo afectaría sensiblemente a las reservas disponibles de aguas subterráneas.

Sin embargo, la mayor extracción de aguas subterráneas y algunos cambios importantes en el uso de la tierra pueden llegar a ejercer un impacto relevante en la recarga y en la calidad de las aguas subterráneas en un plazo de décadas. Por lo tanto, al considerar los efectos combinados del futuro calentamiento de la Tierra, deben tenerse en cuenta los cambios de usos del suelo y de la explotación de las aguas subterráneas.

¿Qué demuestra el registro paleoambiental sobre la influencia de la variabilidad natural del clima en las aguas subterráneas?

La respuesta a largo plazo de los acuíferos a frente a la variabilidad climática natural, independientemente de la actividad humana, puede identificarse mediante estudios paleoambientales. La mayoría de los sistemas de aguas subterráneas y su cobertura se han adaptado, en su estado natural, a los principales ciclos de cambio climático acaecidos durante los últimos 200.000 años o más. Más a corto plazo, en algunas regiones semiáridas (como la del Sahel), los per-

files de isótopos y cloruros medidos en la “humedad de la zona no saturada” revelan que, en los últimos 50-100 años, la tasa de recarga de las aguas subterráneas y su salinidad han oscilado notablemente por causa de ciclos de sequía.

Además, las aguas subterráneas de grandes sistemas acuíferos presentes en lo que hoy son las zonas más áridas del mundo, revelan que la mayor parte de las aguas subterráneas se recargaron hace miles o centenares de miles de años, durante épocas pasadas de climas más fríos y húmedos (esto sucede, por ejemplo, en el acuífero de Arenisca de Nubia en el Sahara). En estas zonas el “perfil de humedad de la zona no saturada” indica que posteriormente la recarga por las precipitaciones ha sido muy escasa (<5 mm/a). Dado que la recarga actual es responsable de sólo una pequeña fracción de las aguas subterráneas de tales acuíferos, sus recursos pueden considerarse como “no renovables”, y los suministros de agua que proporcionan son muy resilientes a la actual variabilidad climática. Sin embargo, tarde o temprano, su uso será limitado en el tiempo y, como tal, merece una consideración cuidadosa — en la actualidad los países más dependientes de tales recursos son Libia, Arabia Saudita y Argelia, con un uso significativo también en Australia, China, Irán, Egipto, Túnez, Botswana, Mauritania, Perú y los Estados Unidos.

¿De qué forma contribuye el uso de las aguas subterráneas al cambio global?

Las aguas subterráneas han sido una fuente vital de abastecimiento de agua para uso doméstico y para el riego agrícola a lo largo de la historia de la humanidad. No obstante, la extracción intensiva de aguas subterráneas comenzó a partir de la década de 1950 gracias a los grandes avances que sucedieron en el conocimiento geológico, la perforación de pozos de agua, la tecnología de bombeo y la electrificación rural. A nivel mundial, las extracciones de aguas subterráneas siguen aumentando, habiendo alcanzado los 900 km³/a en 2010, y proporcionan alrededor del 36% del abastecimiento de agua potable, el 42% del agua para la agricultura de regadío y el

24% del abastecimiento directo de agua para la industria. La intensidad de la extracción es más elevada en gran parte de China, India, Pakistán y Irán, y también en zonas de Bangladesh, México, los Estados Unidos, la Unión Europea, el África septentrional y el Oriente Medio. Las estimaciones de las tasas de descenso en el almacenamiento oscilaron entre 100 y 145 km³/a durante el periodo 2000-08⁽²⁾.

El descenso de los recursos de aguas subterráneas contribuye indirectamente a la elevación del nivel del mar a nivel mundial (con sus graves consecuencias para las zonas costeras), al crear una transferencia de agua desde el almacenamiento subterráneo a largo plazo a la circulación hidrológica superficial. Este proceso está sujeto a incertidumbre debido a la imprecisión propia de los balances hídricos de los acuíferos a largo plazo, el promedio de almacenamiento drenable unitario del acuífero explotado y la proporción de agua subterránea extraída que permanece en el microclima local. Las estimaciones recientes oscilan hasta 0,6 mm/año, siendo el valor de 0,3 mm/año (equivalente a 106 km³/año de transferencia de agua o el 18% del aumento actual del nivel del mar), el más probable durante el periodo 2000-08⁽³⁾.

(2) Doell et al (2012), Wada et al (2016)

(3) Konikow (2011), Wada et al (2016)

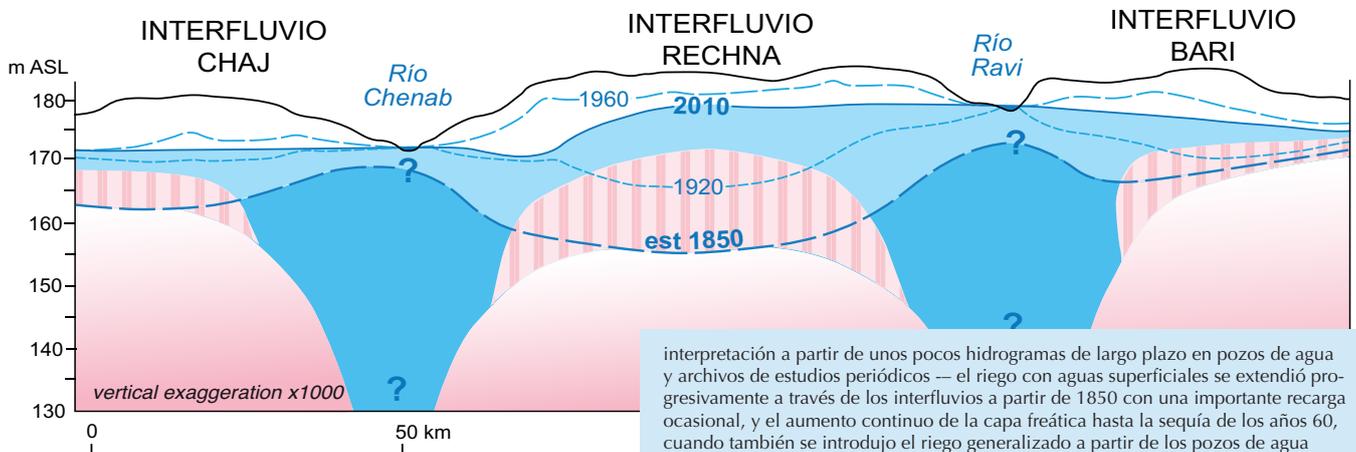
¿Qué cambios en los usos del suelo están causando impactos importantes en los recursos de aguas subterráneas?

Cada práctica y cada cambio en el uso del suelo deja su huella en los recursos hídricos. Esto es particularmente importante para las aguas subterráneas porque algunos cambios en el uso del suelo pueden tener efectos de larga duración que son extremadamente costosos de mitigar. Los cambios más significativos para las aguas subterráneas incluyen el desmantelamiento de la vegetación natural y los bosques, la conversión de los pastizales en tierras de cultivo, la ampliación de los límites de la agricultura de regadío, la intensificación tanto de la agricultura de secano como de la agricultura de regadío, la introducción del cultivo de biocombustibles, la reforestación/aforestación con bosques comerciales y, por supuesto, la urbanización⁽¹⁾. Estas diversas prácticas en los usos del suelo dejan diferentes señales:

- sobre la calidad de la recarga — en algunos casos resultando en una contaminación difusa de las aguas subterráneas independientemente de las condiciones climáticas
- sobre las tasas de recarga y la salinidad, especialmente significativa en condiciones más áridas.

En los últimos 250 años, más de la mitad de las zonas del mundo sin hielo han sido modificadas

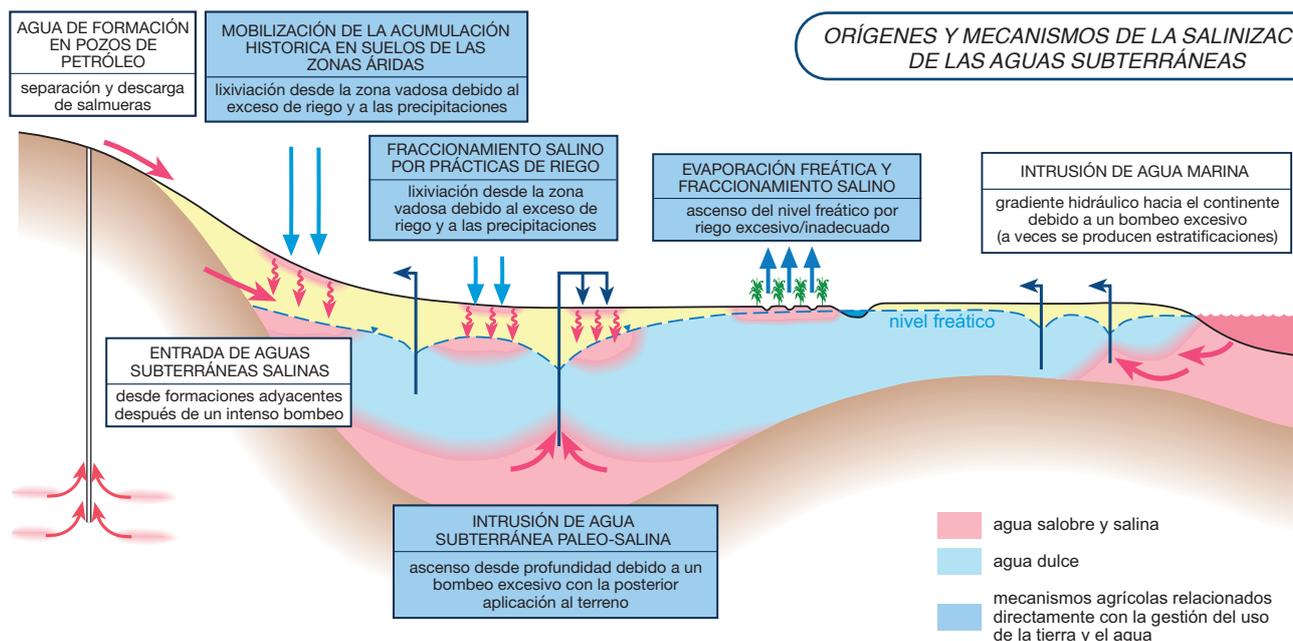
REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS CAMBIOS EN EL SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA LLANURA INDIA DEL PUNJAB MEDIO DURANTE 1850-2010



interpretación a partir de unos pocos hidrogramas de largo plazo en pozos de agua y archivos de estudios periódicos — el riego con aguas superficiales se extendió progresivamente a través de los interfluvios a partir de 1850 con una importante recarga ocasional, y el aumento continuo de la capa freática hasta la sequía de los años 60, cuando también se introdujo el riego generalizado a partir de los pozos de agua

posición del agua connata inferida antes de riego de 1850

aumento aproximado de las aguas subterráneas significativamente salinas como resultado del bombeo intensivo de los pozos de agua para riego durante 1960-2010 — también se producirá cierta salinización superficial (no mostrada) cerca de la red de canales de riego y en las zonas regadas sólo con aguas subterráneas



por la actividad humana, principalmente la conversión de bosques nativos en terrenos cultivables (70%) y en terrenos de pasturas (30%)⁽⁴⁾. Hasta 1950 la tasa de conversión era superior al crecimiento de la población, y se produjo principalmente en Asia, Europa y América del Norte. Últimamente la conversión mundial se ha desacelerado y la mayor parte de la deforestación se produce en América tropical y Asia. Estos cambios son el resultado del crecimiento de la población y del aumento de la demanda de alimentos, aunque no es una relación sencilla. Desde 1960 la población mundial se ha duplicado con holgura, pero el consumo de alimentos se triplicó con sólo un 10% de expansión de las tierras agrícolas (ya que el aumento de la producción se debió a la intensificación y mejora en el rendimiento de los cultivos).

Entre los principales cambios en el uso de la tierra, el desmantelamiento de la vegetación y la extensión de la agricultura de regadío (utilizando aguas superficiales importadas) son los que más influyen en las aguas subterráneas; estas últimas aumentan significativamente la recarga y modifican la calidad del agua porque el exceso de agua de riego se infiltra en los acuíferos poco profundos. Pero la intensificación del cultivo de hortalizas y frutas de regadío mediante el “riego de precisión” (como los sistemas de goteo a presión y de microaspersores) puede reducir considerablemente las tasas de recarga y aumentar su salinidad.

Existen muchos ejemplos gráficos, en tipos de clima muy variados, de los principales efectos de los cambios en el uso de las tierras agrícolas sobre las aguas subterráneas:

- la introducción de riegos a gran escala con aguas superficiales en algunas zonas semiáridas ha dado lugar a una importante acumulación de aguas subterráneas a lo largo de decenios a partir de mediados del siglo XIX, sobre todo en el Punjab pakistaní e indio
- en la Europa mediterránea y en los Estados Unidos el desarrollo de una actividad intensiva de horticultura para la producción de frutas y hortalizas ha dado lugar a una grave contaminación de las aguas subterráneas con nitratos e insecticidas persistentes
- en la agricultura de secano, la conversión generalizada de las zonas de pastoreo extensivo a tierras de cultivo intensivo de cereales, provocó que en Europa se produjera, a partir del decenio de 1950, un cambio notable en la calidad de la recarga de las aguas subterráneas, con una contaminación difusa por nitratos y herbicidas persistentes.

A nivel mundial, una superficie de tierras agrícolas en constante aumento (actualmente 1,6 millones de hectáreas) se ve afectada por la salinización, lo que contrarresta gran parte del aumento de la productividad agrícola en otros lugares⁽⁴⁾. Muchas de las causas están relacionadas con las aguas subterráneas:

- la evaporación directa de las capas freáticas

⁽⁴⁾ Foster & Cherlet (2016)



CAMBIO GLOBAL Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

poco profundas, a menudo asociada a un riego ineficiente que utiliza aguas superficiales importadas en zonas de drenaje natural deficiente

- la salinidad natural que se moviliza desde la profundidad en los sistemas de aguas subterráneas mediante la construcción y el bombeo de pozos de agua no controlados, y por la lixiviación del subsuelo salino tras la eliminación de la vegetación natural
- la salinidad del suelo se acumula cuando se riega con aguas subterráneas mineralizadas, que posteriormente se lixivian hacia acuíferos poco profundos.

La comprensión de la relación entre el uso de las tierras agrícolas y las aguas subterráneas es una base esencial para el manejo integrado de los recursos hídricos y, aunque esas relaciones se han reconocido desde hace mucho tiempo, todavía no se han plasmado de manera generalizada en la política y la práctica del manejo de las tierras.

Hoy en día, las tendencias a gran escala, especialmente la globalización de los mercados de productos básicos, se han convertido en los principales impulsores de los cambios de uso del suelo, y ciertos factores nacionales y locales atenúan o amplifican sus efectos. Influyen no sólo en las opciones de uso de la tierra de millones de pequeños productores, sino también en las de los grandes inversores internacionales (privados y estatales). Se estima que los proyectos de tierras agrícolas en gran escala en los países menos adelantados han involucrado por lo menos 36 M de ha desde el año 2000. Cuando se realizan transacciones de tierras a gran escala sin el consentimiento abierto e informado de los actuales usuarios locales, se denominan “ apropiación de tierras”, y esas adquisiciones suelen suponer también un acceso privilegiado (y no totalmente investigado) a las aguas subterráneas.

En los países de bajos ingresos existe una necesidad acuciante de aumentar la producción de cultivos básicos como maíz, arroz y trigo, cuyos rendimientos suelen ser del orden del 30 al 50% con respecto a los conseguidos en la agricultura más “ desarrollada “. Podría buscarse un aumento de la producción mediante la introducción de riego y/o la mejora de las prácticas de gestión de suelos y aguas, aunque podría no ser apropiado en algunos ámbitos ecológicos. Cada vez es mayor la preocupación por el impacto que tiene el aumento del uso consuntivo en las aguas subterráneas, la salinidad y la lixiviación de nutrientes y/o plaguicidas.

ACCIONES PRIORITARIAS

- se necesita una investigación más detallada y un monitoreo a largo plazo de los sistemas de aguas subterráneas para establecer el estado actual de los recursos y la dinámica de los flujos, así como para confirmar las tendencias actuales en los cambios de almacenamiento y calidad.
- es necesario realizar un esfuerzo sistemático para perfeccionar la práctica operativa de la gestión flexible de los recursos hídricos, y especialmente para promover el uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales, en lugar de tratarlas como recursos separados
- se requiere una investigación detallada (en una variedad de escenarios topográficos e hidrogeológicos) de la respuesta de la recarga de las aguas subterráneas a las variaciones de la intensidad de las precipitaciones, el aumento de la temperatura en la Tierra y el cambio de uso del suelo, a fin de mejorar la información hasta un nivel comparable al que se ha logrado para los recursos hídricos superficiales
- se necesita mejorar la capacidad de simulación numérica temporal y espacial a gran escala de los sistemas de aguas subterráneas (con mejores datos de campo) para avanzar en la comprensión de la forma en la que dichos sistemas pueden responder a las presiones creadas por un incremento en el uso de la tierra y un cambio climático acelerado.