



9ª Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes en la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)

“Los humedales y el agua: ¡mantienen la vida, nos dan el sustento!”

Kampala (Uganda), 8 a 15 de noviembre de 2005

Resolución IX.1 Anexo C ii

Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las características ecológicas de los humedales

Sumario

1. Antecedentes
2. Introducción
3. Panorama de los humedales relacionados con aguas subterráneas
 - 3.1 Tipos de aguas subterráneas y humedales relacionados con aguas subterráneas
 - 3.2 Vínculos funcionales entre aguas subterráneas y humedales
 - 3.3 La calidad de las aguas subterráneas y los humedales
4. El conocimiento de los humedales relacionados con aguas subterráneas
 - 4.1 Cálculo del potencial de conexión entre aguas subterráneas y humedales
 - 4.2 Conocimiento de los vínculos hidrológicos entre humedales y aguas subterráneas
 - 4.3 Cuantificación de los mecanismos de transferencia de agua
 - 4.4 Puesta a prueba del grado de comprensión mediante balances hídricos
 - 4.5 Incertidumbre en el uso de la ecuación del balance hídrico
 - 4.6 Definición de los límites de los balances hídricos
 - 4.7 Elección de la frecuencia temporal en el balance hídrico
 - 4.8 Período de registro
 - 4.9 Predicción de impactos hidrológicos mediante elaboración de modelos
5. Hacia un marco para el desarrollo de estrategias de manejo de las aguas subterráneas para la conservación de los humedales
6. Glosario
7. Referencias

Anexo 1: Mecanismos de transferencia de agua en humedales relacionados con aguas subterráneas

Anexo 2: Conexión entre el entorno paisajístico y los mecanismos de transferencia de agua

Anexo 3: Ejemplo de balance hídrico

1. Antecedentes

1. En la 8ª reunión de la Conferencia de las Partes en Ramsar (COP8, España, 2002) las Partes Contratantes reconocieron la necesidad de aumentar la comprensión de las relaciones entre humedales y aguas subterráneas. Concretamente, la Resolución VIII.1 pedía al Grupo de Examen Científico y Técnico (GECT) de la Convención “que examine la función de los humedales en la recarga y el almacenamiento de aguas subterráneas y la

función de estas aguas en el mantenimiento de las características ecológicas de los humedales, así como los efectos de su absorción en los humedales, y elabore los lineamientos correspondientes.” Además, la acción 3.4.7 del Plan Estratégico 2003-2008 de Ramsar (Anexo a la Resolución VIII.25) pedía al GECT “elaborar lineamientos sobre el uso sostenible de los recursos de aguas freáticas a fin de mantener las funciones de los ecosistemas de humedales”; y las Partes adoptaron también la Resolución VIII.40 relativa a “Lineamientos para compatibilizar el uso de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales”.

2. Estas peticiones de asesoramiento técnico reflejan el hecho de que el papel de las aguas subterráneas en el mantenimiento de los humedales, y de los humedales en la recarga de las aguas subterráneas, es menos conocido que el papel de las aguas superficiales y, sin embargo, es vital, para los responsables del manejo de los humedales y otros, poder comprender de qué manera el manejo de las aguas subterráneas, así como el de las aguas superficiales, afecta a los humedales cuando se trata de que la planificación del manejo a escala de cuenca y de sitio permitan el mantenimiento de las características ecológicas del humedal.
3. La información y los lineamientos existentes sobre los vínculos entre aguas subterráneas y humedales se basan en conceptos que quedaron obsoletos hace mucho tiempo. Aunque se trata de un tema aún mal comprendido, a lo largo de los últimos 20 años ha habido nuevas investigaciones que podrían aportar lineamientos técnicos más pertinentes y precisos sobre:
 - i) el papel de las aguas subterráneas en el mantenimiento de las características y funciones de los humedales;
 - ii) el papel de los humedales en la recarga y descarga de las aguas subterráneas; y
 - iii) el manejo de los impactos producidos en los humedales por los cambios de calidad y cantidad de las aguas subterráneas.
4. En particular, se dispone actualmente de nuevos conocimientos y técnicas (como el uso avanzado de trazadores a base de isótopos) que pueden facilitar una mejor cuantificación de los vínculos hidrológicos y ecológicos entre bolsas de agua subterránea y ecosistemas de humedales asociados con ellas. Estas cuestiones podrán abordarse en futuros documentos técnicos cuya elaboración se propone al GECT:
 - i) un documento técnico detallado que examine los aspectos hidrológicos y ecológicos de las interacciones entre aguas subterráneas y humedales; y
 - ii) un documento técnico detallado que examine los lineamientos para el uso y manejo de los recursos/acuíferos de aguas subterráneas a fin de mantener las funciones de los ecosistemas.
5. El presente documento proporciona a las Partes unos lineamientos generales para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las funciones de los ecosistemas de humedales. Está concebido para proporcionar orientación tanto a los responsables del manejo de los recursos hídricos (aguas subterráneas y aguas superficiales) como a los responsables del manejo de los humedales. Se recomienda que, una vez se hayan elaborado los lineamientos suplementarios en los dos documentos técnicos, los lineamientos aquí contenidos se examinen y, llegado el caso, se actualicen.

2. Introducción

La importancia de las aguas subterráneas

6. En muchos países, particularmente en zonas áridas, las aguas freáticas son de vital importancia para el sustento y la salud de la mayoría de la población, pues proporcionan casi toda el agua necesaria para uso doméstico, agrícola e industrial.
7. Los procesos de los ecosistemas que ayudan a mantener los suministros de agua subterránea deben protegerse y regenerarse cuando se degradan. Las aguas subterráneas sostienen también muchos ecosistemas que ofrecen una amplia gama de beneficios/servicios a la población. El manejo integrado de ecosistemas y recursos naturales es, por consiguiente, un elemento esencial para la conservación de nuestro planeta.
8. Muchos humedales de todo el mundo están estrechamente asociados con las aguas subterráneas. Por ejemplo, un humedal puede depender del caudal procedente de un acuífero¹ que le sirva de fuente de alimentación de agua, o bien la filtración hacia abajo del agua del humedal puede recargar un acuífero. En tales casos, la hidrología del acuífero y la salud del ecosistema de humedal están íntimamente conectados. Es importante tener en cuenta que esta relación puede verse alterada por cambios en el acuífero, como la extracción de aguas freáticas, o en el humedal, por ejemplo por disminución de la inundación natural de los humedales que cubren los acuíferos.
9. Los recursos hídricos (tanto las aguas superficiales como las aguas subterráneas) y los humedales deben ser objeto, por tanto, de un manejo integrado para garantizar la sostenibilidad del ecosistema y del agua que proporciona. El uso racional del agua y de los recursos de los humedales es particularmente importante en las tierras áridas donde el agua es a menudo el factor limitador para la salud humana y del ecosistema.
10. Deben calibrarse los efectos actuales o potenciales sobre el humedal o el acuífero, a la vez que se trata de hallar formas de mitigarlos allá donde se descubra o prevea una degradación importante del sistema. Dichos efectos pueden ir desde el cambio climático a escala regional y mundial hasta el manejo a escala local de los niveles de agua del humedal. Estos tipos de impacto pueden alterar los vínculos entre aguas subterráneas y humedales y, en consecuencia, las características ecológicas del humedal. Allá donde los humedales son fuentes de recarga de aguas subterráneas para los acuíferos, la conservación de los humedales es un elemento esencial para la conservación de los recursos hídricos.
11. Entre los aportes de agua a los humedales figuran a menudo las aguas de escorrentía y la afluencia de aguas subterráneas en diversas combinaciones. Por consiguiente, para asegurar la aportación efectiva del agua asignada a un humedal será necesario el manejo integrado de los recursos asociados de aguas superficiales y aguas subterráneas. Esto exigirá a su vez un correcto conocimiento cuantitativo de los orígenes (superficiales y/o subterráneos), las trayectorias y la variabilidad de las corrientes de agua que entran y salen del humedal, a fin de elaborar estrategias para la extracción de agua que reduzcan al mínimo o impidan niveles inaceptables de cambio en las características ecológicas del humedal.

¹ Acuífero: formación o estructura geológica que almacena y/o transmite agua, por ejemplo a pozos, fuentes y otros humedales (USGS: <http://ga.water.usgs.gov/edu/dictionary.html#A>).

12. Muchos acuíferos de todo el mundo están siendo actualmente objeto de intensa explotación o sobreexplotación para la obtención de agua (Custodio, 2002), especialmente en México, China, Oriente Medio y España (Morris *et al.*, 2003). Algunas formas de explotación son claramente insostenibles y han provocado la alteración del régimen hidrológico de humedales asociados con los acuíferos, así como una notable degradación de sus características ecológicas (valgan como ejemplo los humedales de Azraq, Jordania (Fariz & Hatough-Bouran, 1998) y Las Tablas de Daimiel, España (Fornés & Llamas, 2001)).
13. En algunos casos, como en Australia occidental, la subida de nivel de las aguas subterráneas, causado por la eliminación de eucaliptos, que evaporan grandes volúmenes de agua, ha provocado la salinización de suelos y la consiguiente degradación de los humedales y de otros ecosistemas.
14. El manejo de humedales asociados con aguas subterráneas, al igual que otros tipos de humedal, debe ir estrechamente ligado al manejo de los recursos hídricos. La cuenca fluvial o de captación constituye la unidad fundamental de manejo para ríos y otros sistemas de aguas superficiales. Sin embargo, en aquellos casos en que las aguas subterráneas dominan el régimen hidrológico, la unidad de manejo más adecuada será el acuífero, particularmente cuando los límites del acuífero no coincidan con los límites superficiales de la cuenca fluvial.

Objeto de los presentes lineamientos

15. El presente documento ofrece lineamientos generales que permitan asistir a las Partes Contratantes en el logro de una mejor comprensión de la interacción entre humedales y aguas subterráneas y elaborar así estrategias de evaluación de impacto y manejo sostenible de las aguas subterráneas que ayuden a asegurar el mantenimiento de las características ecológicas del humedal. Se centra principalmente en cuestiones relativas a la cantidad de agua y no se ocupa en detalle de cuestiones relacionadas con la calidad del agua.
16. El contenido del presente documento es el siguiente:
 - Un panorama general de los humedales relacionados con aguas subterráneas y los vínculos existentes entre aguas subterráneas y ecosistemas de humedales,
 - Una sección más detallada sobre la caracterización, comprensión y cuantificación de los vínculos existentes entre aguas subterráneas y humedales en cada sitio concreto,
 - Unos lineamientos generales sobre la elaboración de estrategias para el manejo integrado de los recursos de aguas subterráneas y los humedales asociados, con vistas a mantener las funciones de los ecosistemas de humedales,
 - Observaciones y recomendaciones finales.
17. La complejidad de las cuestiones quiere decir que algunas partes de los lineamientos tienen un contenido técnico destinado a los lectores que poseen ya algún conocimiento de la hidrología de las aguas subterráneas. Como ayuda para los no especialistas se adjunta un glosario de términos.

18. Los lineamientos deben leerse en el contexto del *Marco integrado para los lineamientos de la Convención de Ramsar en relación con el agua* (Resolución IX.1, Anexo C) y en conjunción con otros lineamientos de Ramsar relativos a la determinación y ejecución de las asignaciones de agua con vistas a mantener las funciones de los ecosistemas de humedales (Resolución VIII.1 (Manual de Ramsar sobre el uso racional N° 12, “Asignación y manejo de recursos hídricos”), y Resolución IX.1, Anexo C i, “Ordenación de las cuencas fluviales: orientaciones adicionales y marco general para el análisis de estudios monográficos”, así como los “*Informes técnicos de Ramsar sobre la determinación y cobertura de las necesidades ambientales de los humedales en materia de recursos hídricos*”.

3. Panorama de los humedales relacionados con aguas subterráneas

3.1. Tipos de aguas subterráneas y humedales relacionados con aguas subterráneas

Las aguas subterráneas (o freáticas) son las aguas contenidas en rocas permeables, como la caliza, y en sedimentos no consolidados, como la arena y la grava.

19. El nivel de las aguas subterráneas por debajo del cual las rocas o los sedimentos están saturados recibe el nombre de “zona del agua de crecida” (figura 1). También por encima de dicha zona hay agua, en la zona no saturada, por ejemplo, como agua del suelo, pero esta clase de agua no suele extraerse para uso humano y, por lo general, no se la considera agua subterránea. En consecuencia, el agua presente en los suelos de un humedal se considera agua subterránea si el suelo está casi permanentemente saturado.
20. Todas las rocas, los sedimentos y los suelos pueden contener y transmitir agua, pero el ritmo de desplazamiento del agua es lento (a menudo, sólo unos metros por año: m año^{-1}) en comparación con la corriente de los ríos (normalmente, metros por segundo: m s^{-1}). Esto hace que las respuestas de las aguas subterráneas a la recarga o la extracción se hagan esperar.
21. El movimiento del agua en rocas y sedimentos puede variar en muchos órdenes de magnitud, y pueden distinguirse tres tipos generales:
- i) los que tienen poros (huecos) o fisuras (grietas) amplios: son los llamados “acuíferos”, entre los que figura el yeso, la caliza, la arenisca y la grava;
 - ii) los que contienen pequeñas cantidades de agua y permiten que ésta pase a través de ellos lentamente: son los llamados acuitardos y comprenden, por ejemplo, el mudstone grueso;
 - iii) los que contienen muy poca agua y detienen el movimiento de las aguas subterráneas: son los llamados acuicludos y comprenden la arcilla y el granito no fracturado.

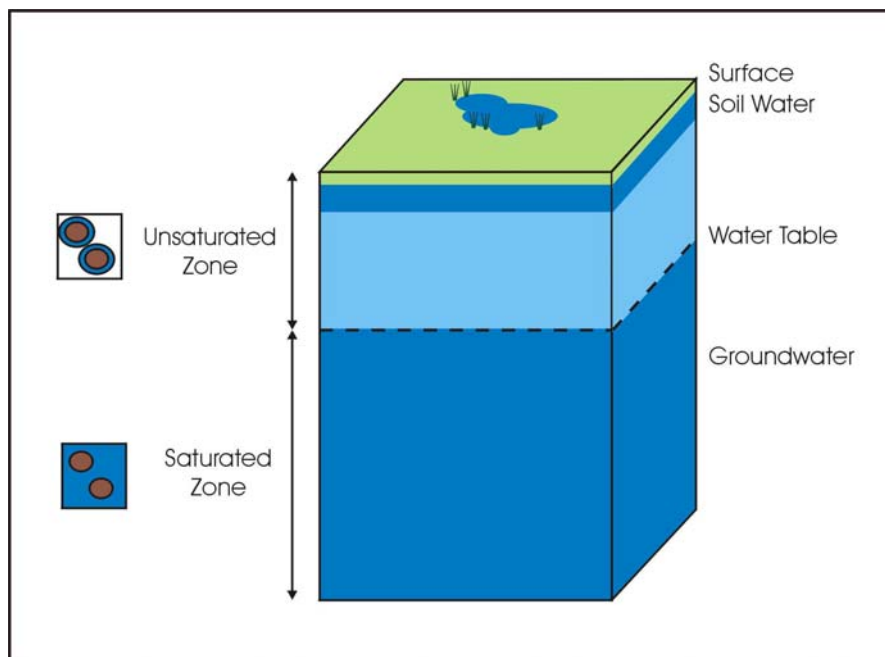


Figura 1. Definición de aguas subterráneas

<Leyenda: de izquierda a derecha y de arriba abajo:>

Superficie

Agua del suelo

Zona no saturada

Zona del agua de crecida

Agua subterránea

Zona saturada

22. Sin embargo, allí donde no hay acuíferos de elevada permeabilidad (v.g.: yeso o caliza), el agua se extrae a veces, con fines comerciales, de rocas de baja permeabilidad (v.g.: granitos fracturados en África), por lo que éstos pueden también denominarse acuíferos.
23. Los manantiales superficiales que brotan de acuíferos son la fuente visible de agua de muchos ríos y otros tipos de humedales. La base de un humedal, como el lecho de un río, puede estar en contacto con un acuífero y oculta a la vista. Prácticamente todos los tipos de humedales de Ramsar, incluidas las lagunas costeras, pueden tener importantes intercambios de agua con los acuíferos. No obstante, algunos tipos tienen más posibilidades de estar estrechamente conectados con aguas freáticas: entre ellos figuran los humedales subterráneos (en sistemas de cavernas), los manantiales de agua dulce y los oasis del desierto. Por el contrario, las albercas situadas en cimas, los estanques de tratamiento de aguas residuales y los embalses es poco probable que estén estrechamente asociados con aguas subterráneas.
24. La naturaleza exacta de las interacciones entre aguas subterráneas y humedales dependerá de las condiciones geológicas locales. Simplemente por el hecho de que un acuífero aparezca en un mapa geológico, eso no quiere decir que cualquier humedal que lo recubra esté necesariamente alimentado por aguas freáticas o pueda tener la función de recargar el acuífero. El margen de interacción depende de la permeabilidad de las rocas o los sedimentos situados entre el humedal y el acuífero.

25. Cuando son rocas impermeables (un acuicludo) las que recubren un acuífero, el agua no puede moverse verticalmente hacia arriba ni hacia abajo, y se dice entonces que el acuífero está “confinado” (Figura 2). En tales casos, el humedal y el acuífero están hidrológicamente separados y no habrá intercambio de agua. Allá donde haya rocas o sedimentos de baja permeabilidad (un acuitardo) cubriendo el acuífero, puede existir interacción, pero los ritmos de movimiento serán lentos y las cantidades de agua desplazadas, escasas. Cuando no hay recubrimiento de rocas de baja permeabilidad (ni acuitardos ni acuicludos), se dice que el acuífero está “no confinado”; en ese caso el humedal y el acuífero están en contacto directo y el grado de interacción puede ser alto.

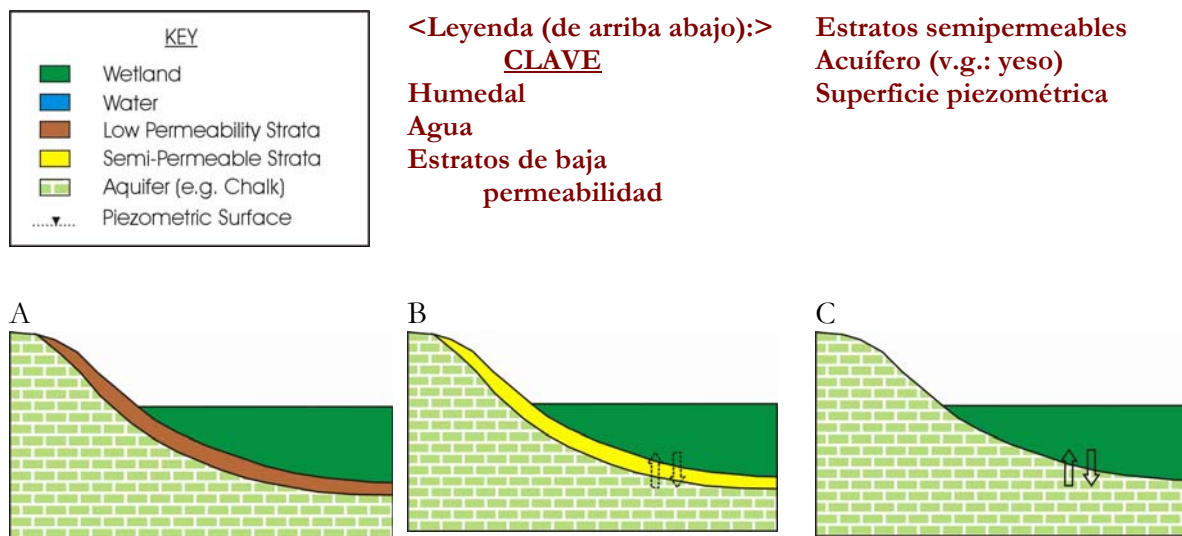


Figura 2. Diferentes tipos de acuíferos. a) acuífero y humedal separados por rocas impermeables (acuicludo): no hay interacción; b) acuífero y humedal separados por rocas de baja permeabilidad (acuitardo): escasa interacción; y c) acuífero y humedal separados por rocas de elevada permeabilidad o no separados: fuerte interacción (véase la figura 3 a propósito de la clave).

26. La interacción entre aguas subterráneas y humedales puede variar dentro de cada humedal (v.g.: a lo largo del curso de un río) y entre distintos humedales, incluso aquellos que están cerca el uno del otro. Por ejemplo, los tres Breckland Meres (pequeños lagos) del este de Inglaterra, Langmere, Ringmere y Fenmere, son visualmente similares y geográficamente próximos entre sí (figura 3). El Langmere está en contacto hidrológico directo con el acuífero de yeso subyacente y su régimen hídrico está controlado por las fluctuaciones de las aguas freáticas. El Ringmere está ligeramente separado del mismo acuífero por un revestimiento de materia orgánica (un acuitardo), pero sigue estando en gran medida controlado por aguas subterráneas. Por el contrario, el Fenmere está aislado del acuífero de yeso por una capa de arcilla (un acuicludo) y sus niveles de agua están controlados exclusivamente por las precipitaciones y la evaporación.

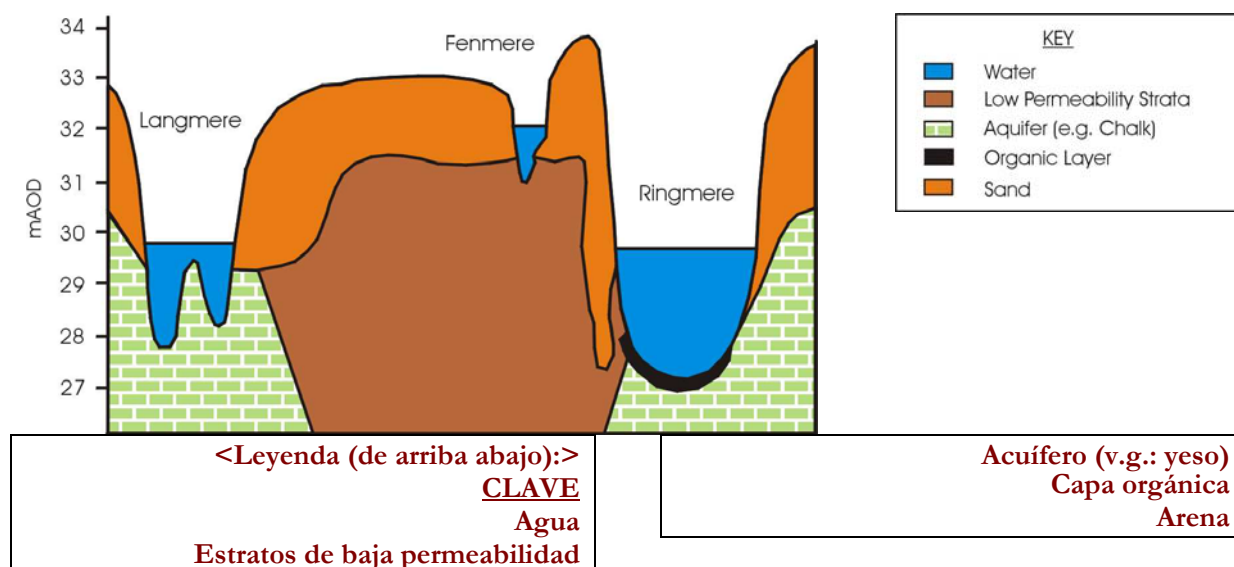


Figura 3. Corte geológico de los Breckland Meres, RU

3.2. Vínculos funcionales entre aguas subterráneas y humedales

27. El movimiento de agua entre acuíferos y humedales puede expresarse como una de estas dos funciones hidrológicas principales, dependiendo de la dirección del movimiento del agua. La corriente ascendente de agua del acuífero al humedal se denomina descarga de aguas freáticas, y la descendente del humedal al acuífero se denomina recarga de aguas freáticas (figura 4).
28. La descarga se produce cuando el nivel de las aguas subterráneas (o la punta piezométrica²) se encuentra por encima del nivel del agua del humedal. La recarga tiene lugar cuando el nivel del agua del humedal está por encima del de las aguas subterráneas. Los vínculos funcionales entre aguas subterráneas y humedales dependen, pues, de la geología (es decir, de la presencia de un acuicludo o un acuitardo) y de los niveles relativos del agua en el humedal y en el acuífero.
29. La interacción puede también variar con el tiempo y el espacio, por lo que siempre son necesarias investigaciones específicas para cada sitio a fin de determinar y confirmar las interacciones locales. Los niveles de las aguas subterráneas varían naturalmente con el tiempo, en función de las precipitaciones anteriormente habidas. Además, el manejo del nivel del agua, en el humedal o en el acuífero, por ejemplo mediante la extracción, puede alterar el nivel relativo de las aguas. Esos dos factores pueden cambiar la relación funcional, tal como se muestra en los tres ejemplos siguientes:

² La punta piezométrica es el nivel las aguas subterráneas alcanzarían si no se lo impidiera una capa de baja permeabilidad situada por encima del acuífero (un acuicludo o un acuitardo) o su agotamiento debido, por ejemplo, a la evaporación o las extracciones.

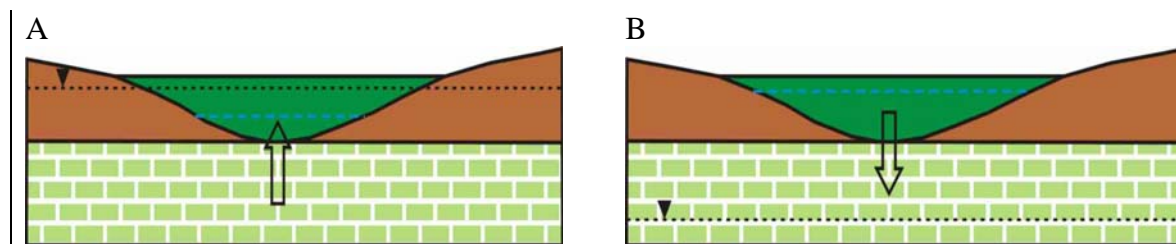


Figura 4. Descarga y recarga de aguas freáticas. A) descarga de aguas freáticas: cuando la zona del agua de crecida del acuífero está por encima del nivel del agua del humedal; y B) recarga de aguas freáticas: cuando el nivel del agua del humedal está por encima de la zona del agua de crecida del acuífero (para la clave, véase la figura 2).

- i) En la *cuenca Azraq, de Jordania*, las aguas subterráneas ascendentes constituyen la fuente de alimentación de los humedales del Oasis de Azraq (un sitio Ramsar), es decir, el acuífero descarga en el humedal (Fariz & Hatough-Bouran, 1998). El bombeo de agua del acuífero para abastecimiento público de la capital, Amman, ha reducido los niveles freáticos, lo que ha reducido la descarga de agua en el humedal, lo que ha dado como resultado cambios en las características ecológicas del humedal.
 - ii) En la *cuenca del río Hadejia-Jamare, en Nigeria*, el anegamiento natural de los humedales de la llanura inundable de Hadejia-Nguru, causado por el río, provoca la recarga de las capas freáticas gracias al movimiento descendente de agua hacia el acuífero subyacente, que proporciona recursos hídricos a poblaciones que viven fuera de la llanura inundable (Thompson & Hollis, 1995). La reducción del caudal del río, debida al embalsamiento de agua en represas situadas aguas arriba, ha provocado una menor inundación de los humedales y, en consecuencia, una menor recarga de aguas subterráneas para el acuífero.
 - iii) *Los humedales de las Tablas de Daimiel, en el centro de España*, se alimentan a partir del curso superior del río Guadiana y de la descarga de aguas procedentes del acuífero de La Mancha cuando los niveles freáticos son altos; pero cuando los niveles freáticos son bajos, la dirección de la corriente de aguas subterráneas se invierte y el agua desciende de los humedales para recargar el acuífero (Llamas, 1989). Hasta el decenio de 1970, la relación funcional era predominantemente de descarga (figura 5a). Sin embargo, la escasez de lluvias y el bombeo de agua del acuífero para la agricultura de regadío ha hecho que los niveles de las aguas subterráneas caigan, y la recarga hacia el acuífero predominó durante el decenio de 1990 (figura 5b). Ello produjo una grave desecación de los humedales. En años recientes se ha trasvasado agua de la cuenca del río Tajo a Las Tablas de Daimiel, dentro de un plan de emergencia. Sin embargo, ello ha ocasionado algunos cambios fisicoquímicos y ecológicos en el humedal, debido a las diferentes características del agua trasvasada (Cirujano *et al.*, 1996).
30. En muchos humedales, el nivel del agua depende de una combinación de precipitaciones directas, escorrentía y descarga/recarga de aguas subterráneas. A menudo las aguas subterráneas adquieren mayor importancia en la estación seca y pueden llegar a ser la única fuente de suministro de agua para el humedal. De modo que incluso pequeñas aportaciones de aguas subterráneas pueden resultar vitales para el mantenimiento de las características ecológicas del humedal.

31. Además, en regiones del mundo donde las precipitaciones son muy escasas, como la cuenca del río Tempisque en Costa Rica, las aguas subterráneas pueden llegar a ser la única fuente de abastecimiento de agua para los humedales: la recarga del acuífero puede tener lugar a muchos kilómetros de distancia, por ejemplo en zonas montañosas, de clima más húmedo.

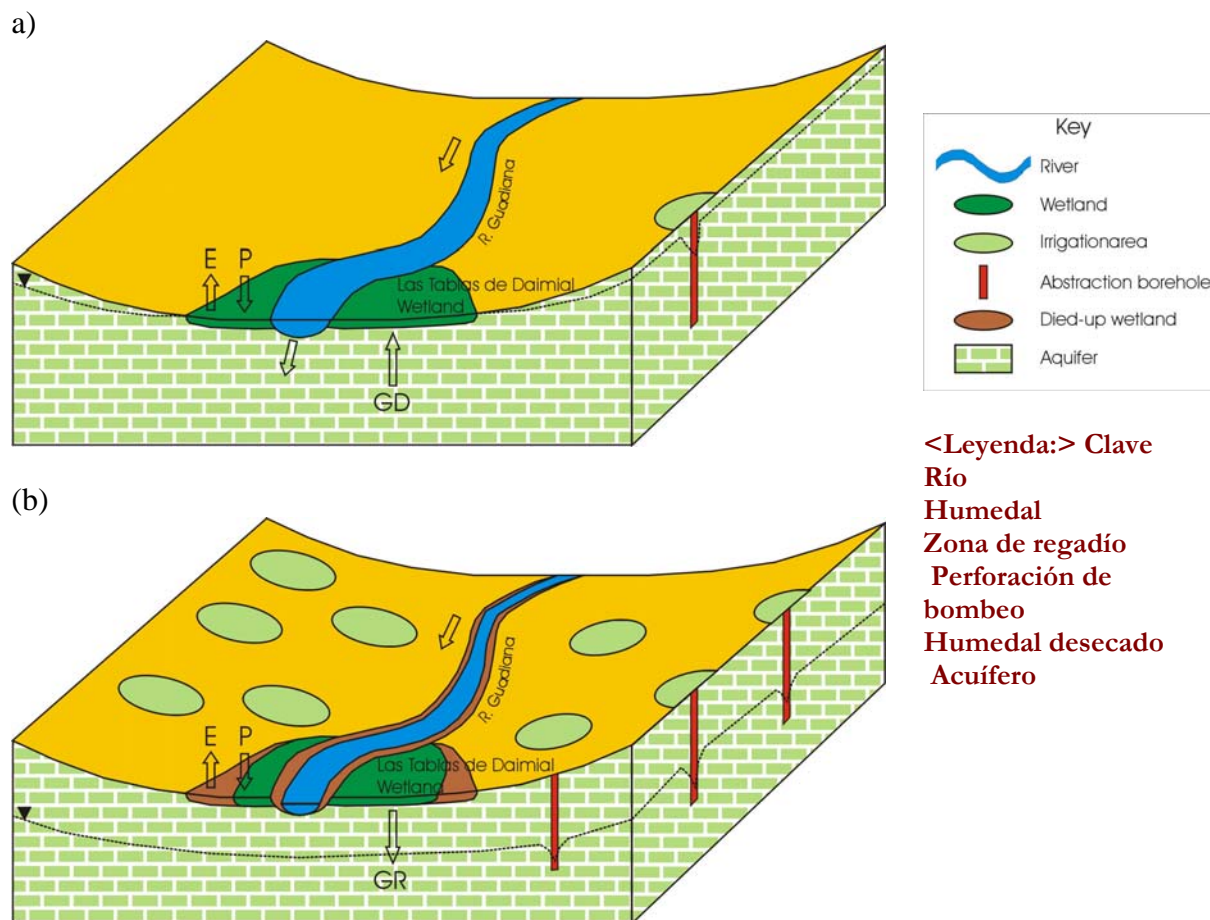


Figura 5. Diagrama tridimensional del curso superior del río Guadiana y los humedales de Las Tablas de Daimiel. a) en el decenio de 1960, con escasa extracción de aguas subterráneas, altos niveles de la zona del agua de crecida y descarga de aguas subterráneas al humedal; y b) en el decenio de 1990, con baja pluviosidad, considerable extracción de aguas subterráneas, bajos niveles de la zona del agua de crecida, zona de humedal reducida y recarga de aguas subterráneas del humedal al acuífero.

32. Los sistemas hidrológicos kársticos subterráneos y de grutas se añadieron como tipos específicos de humedales en la Resolución VI.5, Brisbane, 1996. Dichos humedales subterráneos están íntimamente vinculados con las aguas subterráneas.
33. El sitio Ramsar *Škocjanske jame (gruta)*, en Eslovenia (figura 6), brinda un excelente ejemplo del vínculo existente entre humedales subterráneos y aguas subterráneas. El sistema se basa en la zona *Kras/Karst*, que da nombre a los fenómenos kársticos en todo el mundo. Škocjanske jame es excepcional por sus dimensiones y presenta tres características hidrológicas dominantes:
- i) agua que se desplaza como un río subterráneo alimentado por agua de lluvia;

- ii) acumulaciones de agua estancada en el sistema de grutas; y
 - iii) grandes fluctuaciones de nivel de las aguas subterráneas, de más de 130 metros en las partes del sistema de grutas que han sido estudiadas.
34. La comprensión de los procesos hidrológicos de la Škocjanske jame ha proporcionado conocimientos generales acerca de los fenómenos hidrológicos que tienen lugar en las zonas kársticas. La zona de captación del sistema de grutas abarca 337 km². La superficie barrida por la corriente del río Reka varía entre 0,12 y 400 m³s⁻¹, con una media de 8,32 m³s⁻¹. Tras hundirse en la Škocjanske jame, el agua recorre bajo tierra unos 41 km y vuelve a la superficie en Italia para formar el río Timavo. Dentro de la Škocjanske jame, el río Reka puede seguirse bajo tierra a lo largo de 2,4 km, pasando de una altitud de 317 metros a 214 metros sobre el nivel del mar en el sumidero o sifón terminal. Unos 900 m hacia el noroeste, en Kačja jama (gruta Kačja), el río Reka corre a través de galerías a 182 m (el sifón de entrada está a una altitud de 204 metros) y desaparece por el sumidero final a 156 m sobre el nivel del mar.

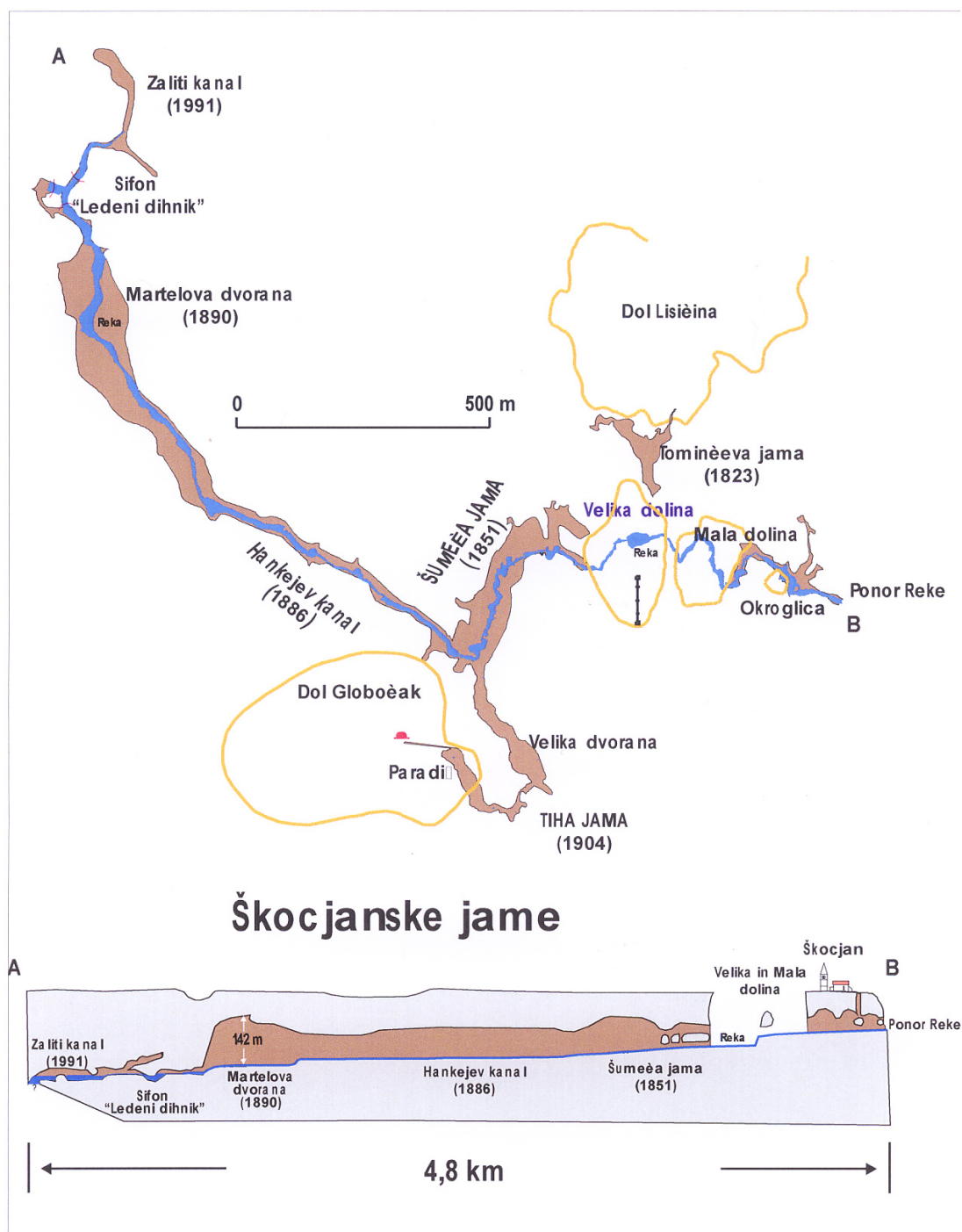


Figura 6. El sitio Ramsar del sistema de la Škocjanske jame (gruta), en Eslovenia

35. El principal valor hidrológico de este sistema de humedal es su capacidad para almacenar agua: sus aguas se usan para el suministro público en zonas urbanas de Italia. Los valores hidrogeológicos, hidrogeomorfológicos e hidrológicos (incluidos los beneficios/servicios) pueden resumirse así:

- drenaje kárstico y de aguas superficiales desde la zona de captación;
- formación de los característicos rasgos kársticos subterráneos;

- ponores kársticos (“chupadores”) y manantiales;
- almacenamiento de agua; y
- suministro de agua potable a zonas urbanas (v.g.: Trieste y su zona metropolitana).

3.3. La calidad de las aguas subterráneas y los humedales

36. A medida que el agua fluye a través de un acuífero, disuelve los minerales que hay en la roca, tales como el calcio, el sodio, bicarbonatos y cloruros, y la temperatura del agua acaba siendo igual a la de las rocas. A consecuencia de ello, las propiedades químicas y térmicas de las aguas subterráneas suelen ser bastante diferentes de las de las aguas superficiales. Por tanto, los humedales alimentados por aguas subterráneas suelen albergar comunidades de flora y fauna diferentes de los que se alimentan únicamente de aguas superficiales. Efectivamente, en algunos casos, la presencia o ausencia de determinadas especies que se sabe que necesitan de las aguas subterráneas puede ser un indicador de si un humedal depende o no en gran medida del aporte de aguas subterráneas.
37. Además, si bien las aguas subterráneas pueden ser volumétricamente una fuente menor de suministro de agua para algunos humedales, incluso una pequeña cantidad de agua subterránea puede ejercer un considerable impacto sobre la calidad del agua y, por tanto, sobre los procesos ecológicos y la biota del humedal. Por ejemplo, en Wicken Fen, en Inglaterra, unos cambios en las características ecológicas se atribuyeron primeramente a la desecación del humedal. Sin embargo, el análisis hidrológico demostró que una menor inundación por un río de elevada alcalinidad alimentado por aguas subterráneas debido a unas actividades de control de las inundaciones había alterado la acidez del humedal.

4. El conocimiento de los humedales relacionados con aguas subterráneas

4.1. Cálculo del potencial de conexión entre aguas subterráneas y humedales

38. Muchos humedales están hidrológica y ecológicamente unidos a masas adyacentes de aguas subterráneas, pero el grado de interacción puede variar enormemente. Algunos humedales pueden ser completamente dependientes de la descarga de aguas subterráneas en cualesquiera condiciones climáticas, en tanto que otros pueden tener un grado de dependencia muy limitado, por ejemplo, sólo en condiciones de extrema sequedad; y algunos pueden carecer por completo de conexión con aguas subterráneas. Algunos acuíferos dependen casi enteramente de la recarga a partir de humedales, por ejemplo, el acuífero Kuiseb, en Namibia; puede haber otros acuíferos, en cambio, que no reciban recarga alguna de los humedales.
39. Es esencial que los encargados del manejo del humedal y los organismos a quienes compete la protección y el mantenimiento de las características ecológicas de los humedales tengan la posibilidad de influir y contribuir a la elaboración de los planes y estrategias de manejo de las aguas subterráneas. Es también necesario, sin embargo, determinar el nivel de contribución técnica al manejo de los recursos hídricos que es preciso recabar de los responsables de la gestión del humedal. Puede haber casos en que la interacción entre humedales y aguas subterráneas quede muy limitada o falte por completo, y la extracción de aguas subterráneas a partir de acuíferos locales puede tener muy pocas repercusiones para los humedales. En cambio, hay casos en que la extracción de aguas

subterráneas de un acuífero profundo situado a considerable distancia del humedal puede tener efectos no previstos, pero muy importantes, para la hidrología y, por ende, para las características ecológicas de un humedal.

40. Tanto los responsables del manejo de los humedales como los del manejo de las aguas subterráneas deben emprender exploraciones selectivas a escala de cuenca fluvial o de acuífero regional para evaluar las posibilidades de interacción entre humedales y aguas subterráneas. El grado de conectividad vendrá en gran parte determinado por una combinación de factores geológicos, de hidrología regional y de topografía.
41. Una exploración selectiva a escala de cuenca o regional, emprendida por un equipo de especialistas, expertos en cuestiones geológicas, hidrológicas y ecológicas, ha de permitir a los responsables del manejo de humedales y de recursos hídricos determinar en qué zonas existen grandes posibilidades de que los humedales sean en alguna medida dependientes de las aguas subterráneas y, en consecuencia, dónde podrían ser necesarios estudios detallados o evaluaciones sobre el terreno a fin de asegurarse de que las necesidades de aguas subterráneas de los humedales existentes en dichas zonas se tienen en cuenta en cualquier plan de manejo de las aguas subterráneas.
42. Normalmente, este tipo de exploraciones selectivas se prestan a un enfoque basado en GIS, posiblemente con el uso complementario de instrumentos de teledetección, a fin de proporcionar una indicación del riesgo potencial, para los humedales, de la extracción de aguas subterráneas regionales u otras formas de explotación, tales como la recarga artificial con aguas residuales. Muchos de los análisis pueden ser de despacho, si bien en el mejor de los casos, a ese nivel de resolución, no pueden hacer más que colocar “banderitas rojas” para indicar la situación de zonas de alto riesgo donde la explotación extensiva de aguas subterráneas debe descartarse si no se llevan a cabo estudios suplementarios a fin de evaluar el impacto potencial sobre los humedales de la región. Los estudios de despacho requieren mapas geológicos, de usos del suelo y de vegetación, así como una amplia gama de datos sobre las propiedades de los acuíferos y el uso de aguas subterráneas, datos que deberían estar disponibles en los ministerios encargados de la gestión de los recursos hídricos. Entre los estudios suplementarios, por otro lado, figuran investigaciones específicas de los humedales tal como se describen con más detalle en las secciones siguientes.

4.2. Conocimiento de los vínculos hidrológicos entre humedales y aguas subterráneas

43. Un requisito previo para valorar las consecuencias que pueden tener para un humedal cualquier tipo de impactos hidrológicos externos es conocer la manera en que el agua entra y sale del humedal (los llamados mecanismos de transferencia de agua) y cuantificar los correspondientes ritmos de movimiento del agua.
44. La mayoría de los responsables del manejo de humedales están muy familiarizados con los análisis geográficos (horizontales o planiformes) de humedales, mediante la utilización de mapas de masas de agua a cielo abierto y zonificación de la vegetación. Sin embargo, comprender las interacciones con las aguas subterráneas exige una visión geológica en tres dimensiones, es decir, mirar también las secciones verticales de los suelos y rocas que yacen bajo el humedal. El Anexo 1 aporta detalles sobre los 14 tipos diferentes de mecanismos de transferencia de agua, descritos esquemáticamente en forma de secciones verticales. En ellos se muestra que las aguas subterráneas pueden entrar en un humedal

directamente desde un manantial (afluencia de manantiales), por movimiento lateral desde un acuífero adyacente (filtración), o por movimiento ascendente desde un acuífero subyacente (descarga). Normalmente, el agua se mueve de un humedal a un acuífero por movimiento descendente (recarga).

45. El primer paso para la comprensión de la hidrología de un humedal consiste en determinar qué mecanismos de transferencia de agua están presentes y cuáles de ellos son los más importantes. Que el movimiento de aguas subterráneas a un humedal o desde él sea un mecanismo importante depende no sólo de la presencia de un acuífero, sino también de la naturaleza de los suelos y las rocas existentes entre el acuífero y el humedal. Si el humedal está en contacto directo con el acuífero, el intercambio de agua es muy probable. Sin embargo, si hay una capa de baja permeabilidad (un acuitardo o un acuicludo) entre el humedal y el acuífero subyacente, puede que haya escaso o nulo intercambio de aguas subterráneas.
46. Para ayudar al usuario a descubrir los mecanismos de transferencia de agua, Acreman (2004) ha elaborado una tipología hidrológica de los humedales, basada en el entorno paisajístico. Dicha tipología se describe en el Anexo 2 y es complementaria de otras clasificaciones tales como las existentes para las turberas vegetalizadas (“ciénagas”) (Steiner, 1992).
47. Es importante tener presente que el humedal estudiado es poco probable que encaje precisamente en uno de los tipos de humedal descritos: muchos humedales pueden exhibir características propias de más de un tipo. No obstante, la tipología proporciona una indicación de las situaciones más comunes.
48. El resultado de una investigación hidrológica ha de ser un diagrama en forma de corte transversal del humedal estudiado donde se indiquen los mecanismos de transferencia de agua (véase el Anexo 1) y los suelos y las rocas subyacentes al humedal. Los humedales reales suelen ser complejos y mostrar simultáneamente muchos mecanismos de transferencia de agua, aunque a menudo ciertos mecanismos dominarán en diferentes zonas de un mismo humedal.
49. La figura 7 muestra el corte transversal de un hipotético humedal donde diferentes mecanismos de transferencia de agua predominan en diferentes zonas del humedal. Los aportes hidrológicos a la zona A están dominados por un aporte de manantiales (S) y las salidas, por actividades de bombeo (PU), mientras que en la zona B domina el agua procedente del desbordamiento del río (OB). La zona C es un área de intercambio con aguas subterráneas (GD, GR), mientras que la hidrología de la zona D está dominada por la precipitación (P) y la evaporación (E). En la zona E, los aportes proceden de la filtración de aguas subterráneas (GS) y la escorrentía desde las laderas adyacentes (R). Es probable que deban elaborarse diagramas de corte transversal para diferentes períodos (sobre todo para las estaciones húmeda o seca), pues el mecanismo de transferencia de agua puede cambiar: por ejemplo, la interacción entre el acuífero y el humedal puede alterar la descarga y la recarga en función de los cambios de la zona del agua de crecida.

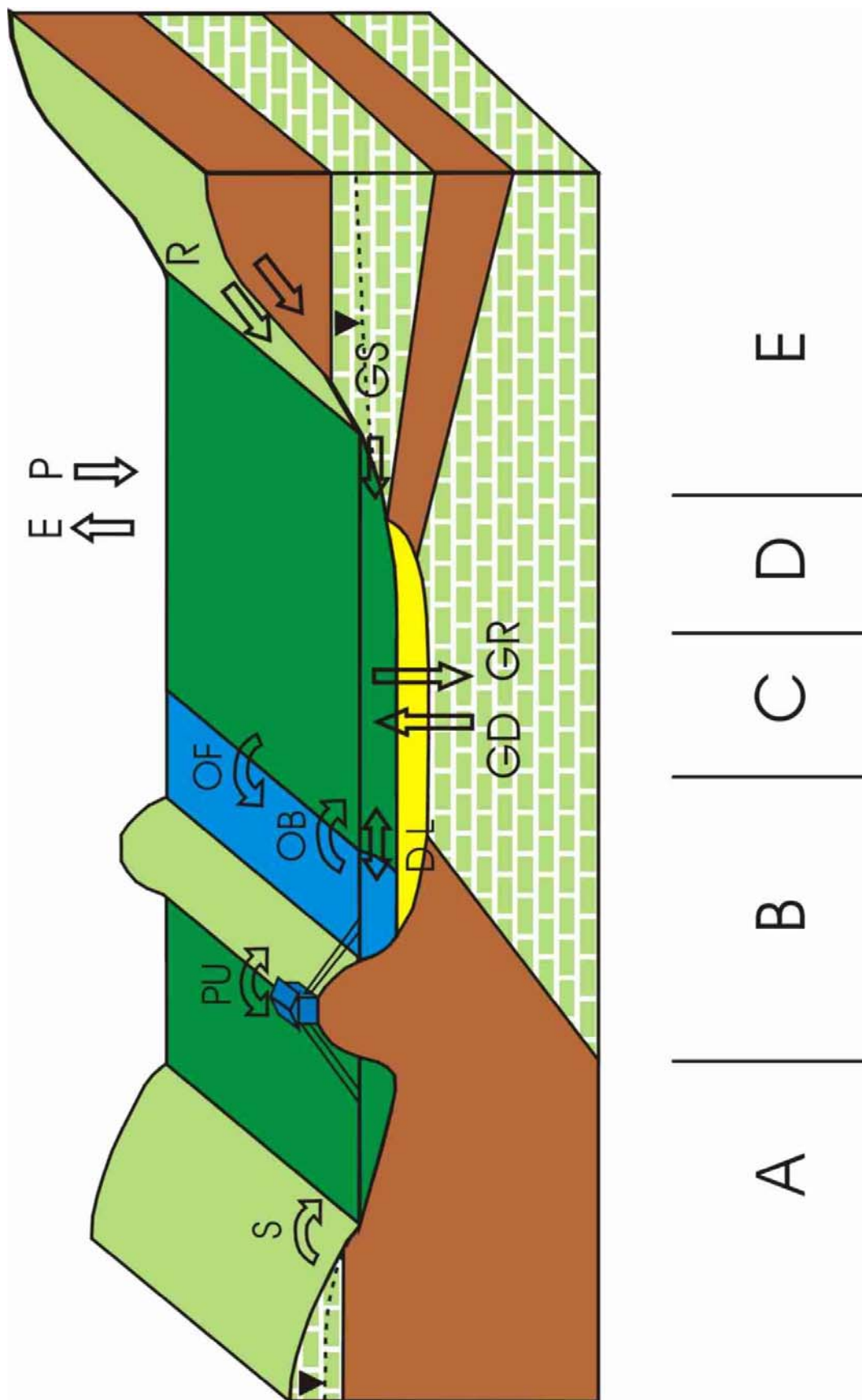


Figura 7. Diagrama tridimensional de un hipotético humedal, donde se muestran los mecanismos de transferencia de agua que operan en diferentes zonas.

4.3. Cuantificación de los mecanismos de transferencia de agua

50. Debido a que los acuíferos permanecen ocultos a la vista, es muy difícil medir con precisión la naturaleza y el alcance de cualquier interacción de aguas subterráneas con humedales. Sin embargo, hay varios medios para obtener información. La intensidad y el alcance de las actividades de recogida de información dependerán de la confianza en los resultados y el grado de cuantificación exigido.
51. Un estudio exploratorio para determinar el potencial (presencia/ausencia) de conectividad apreciable entre un humedal y las masas de aguas subterráneas relacionadas con él puede exigir únicamente una evaluación inicial de despacho (véase la sección 4.1). Sin embargo, determinar el rendimiento sostenible y el grado de extracción permisible de un acuífero es probable que exija intensos estudios especializados sobre el terreno y un proceso de seguimiento.
52. En general, hay tres niveles de evaluación que pueden contribuir a la comprensión y cuantificación de los mecanismos de transferencia de agua:
 - i) **Información de despacho.** Las investigaciones comienzan normalmente con la información de que se dispone en la oficina. Entre los datos espaciales figurarán con frecuencia mapas topográficos, de usos del suelo y vegetación, y mapas geológicos y fotografías tomadas desde aviones o satélites. Las fotos antiguas han demostrado ser muy útiles para explicar los vínculos hidrológicos con humedales en Costa Rica, donde las prácticas de restauración se benefician del conocimiento histórico. Los mapas geológicos pueden revelar la proximidad de acuíferos a los humedales. Sin embargo, dichos mapas se han levantado por lo general a base de extrapolar información a partir de datos geológicos limitados (como, por ejemplo, sobre núcleos). Por esa razón, en algunos puntos de dichos mapas la presencia y el espesor de estratos impermeables entre un humedal y un acuífero puede ser muy insegura. Además, el mapa no permitirá descubrir la permeabilidad (o conductividad hidráulica) de los estratos.
 - ii) **Visitas sobre el terreno.** En una fase temprana de cualquier investigación se deben llevar a cabo visitas *in situ*. Allá donde sea posible, el equipo que actúe sobre el terreno deberá abarcar múltiples disciplinas, incluyendo un hidrólogo, un hidrogeólogo y un botánico. Los botánicos pueden lograr identificar plantas que sean indicadoras de la existencia de descargas de aguas subterráneas en el sitio; sin embargo, ello presupone que la vegetación del momento refleja realmente la hidrología actual del humedal. Resulta especialmente aconsejable explorar y visitar el humedal a) después de precipitaciones prolongadas para ver si pueden descubrirse manantiales o cursos efímeros de agua y b) después de un período prolongado sin lluvias, cuando los perfiles de vegetación pueden indicar zonas donde el humedal depende de las aguas subterráneas durante la estación seca o las sequías. Deben tomarse fotografías para guardar registro de rasgos concretos, como puedan ser compuertas o esclusas, distribución de la vegetación y redes de canales. Es preciso practicar agujeros de barrena³ para investigar las propiedades del suelo del humedal,

³ Una barrena es un utensilio manual, por lo general en forma de tornillo, para extraer pequeños nódulos (<5 cm de diámetro y 30 cm de largo) del suelo.

particularmente para descubrir zonas de registro permanente de agua en la estación seca que pueden ser indicio de dependencia respecto de aguas subterráneas. Donde sea posible, debe entrevistarse a la población local, por ejemplo, a los agricultores, a fin de obtener información empírica sobre los posibles mecanismos de transferencia de agua o los cambios experimentados en la zona: por ejemplo, ¿hay manantiales que alimenten el humedal, y son manantiales perennes? Esta información debe brindar un control sobre el terreno del modelo conceptual elaborado en la oficina, o descubrir nuevos aspectos no estudiados.

- iii) **Programas de medición y vigilancia sobre el terreno.** La cuantificación de los intercambios de aguas subterráneas con humedales precisa de datos tomados sobre el terreno. Aunque algunos datos, como los niveles de aguas subterráneas, pueden obtenerse a partir de los servicios hidrométricos, la mayoría de los estudios sobre humedales exigen la recogida de datos sobre el terreno para el sitio en cuestión. Entre dichos datos pueden figurar los niveles de los tubos de registro o piezómetros del suelo del humedal o del acuífero subyacente y las propiedades del suelo, tales como el rendimiento concreto o la conductividad hidráulica. Basándose en los conocimientos iniciales, deberán establecerse programas de monitoreo sobre el terreno para recoger los datos necesarios, es decir, a lo largo de un período de tiempo determinado, y no mediante una evaluación hecha una sola vez. Los datos servirán de base para la obtención de un conocimiento más detallado y la correspondiente construcción de modelos numéricos.

53. Aunque estos tres niveles de recogida de información se presentan como etapas consecutivas, no siempre es el caso que hayan de seguirse en este orden. Además, el proceso puede ser cíclico. Por ejemplo, puede reconocerse, en una fase temprana de la evaluación del impacto sobre un humedal, que será necesario un modelo detallado, de modo que puede comenzar la recogida de los datos oportunos y la elaboración del modelo. Más adelante podría recogerse información anecdótica que perfeccionara o modificara el conocimiento previo, v.g.: el descubrimiento de manantiales durante una visita en la estación húmeda.

4.4 Puesta a prueba del grado de comprensión mediante balances hídricos

54. Una vez se ha logrado en principio una cierta comprensión de cómo trabaja hidrológicamente un humedal, y se ha trazado un diagrama de corte transversal como el de la figura 7, dicho conocimiento debe ponerse a prueba y confirmarse o perfeccionarse. El cálculo de un balance hídrico, que entraña la cuantificación de las tasas de transferencia de agua, brinda un medio de poner a prueba el grado de comprensión hidrológica alcanzado. El principio de equilibrar las entradas, el almacenamiento y las salidas sirve de prueba de que todas las transferencias de agua se han tenido en cuenta y cuantificado correctamente.

Entradas en el humedal por el mecanismo de transferencia de agua	Salidas del humedal por el mecanismo de transferencia de agua
P: precipitación (lluvia, nieve, rocío, etc.) directa sobre el humedal + R: flujos superficiales y próximos a la superficie que entran en el humedal +	E: evaporación del humedal + δV : cambio en el volumen de agua almacenada dentro del humedal + D: drenaje + DE: salidas de agua por tierra + PU _o : agua bombeada desde los humedales
=	

L: flujos laterales de entrada +	+
OB: entradas por desbordamiento +	GR: recarga de aguas subterráneas a los acuíferos +
PU _i : agua bombeada hacia el humedal +	TO salidas de agua del humedal hacia el mar por efecto de las mareas
S: afluencia de manantiales +	
GD: descarga de aguas subterráneas en el humedal +	
GS: filtración de aguas subterráneas en el humedal +	
TI: entradas de agua de mar en el humedal por efecto de las mareas	Donde δV puede ser positivo o negativo

Figura 8. Balance de las posibles entradas y salidas de agua de un humedal por el mecanismo de transferencia de agua (la figura 7 proporciona una representación esquemática)

55. El balance hídrico es una prueba cuantitativa clave del conocimiento hidrológico, pero normalmente constituye solo un primer paso, pues atiende sólo a las transferencias globales en volumen de agua, y no a los procesos hidrológicos *per se*. Por consiguiente, en sí mismo puede que no dé respuesta completa a las evaluaciones del impacto de los cambios de régimen experimentados por los humedales.
56. Aunque simple en principio, la cuantificación de un balance hídrico no siempre es directamente posible en la práctica. Muchos humedales presentan una multitud de canales superficiales tanto naturales como artificiales que enlazan con cursos de agua o mantienen complejas conexiones con un acuífero subyacente, todo lo cual hay que tener en cuenta en el balance hídrico.
57. El balance hídrico de un humedal se basa en la comparación entre la cantidad total de agua transferida a un humedal y la cantidad total de agua transferida fuera de él (véase la figura 8). Para utilizar la lista de mecanismos de transferencia de agua del Anexo 1, el balance hídrico de un humedal puede resumirse mediante una simple adición de las entradas y las salidas de los humedales (véase la figura 7 para la representación esquemática de entradas y salidas). Los elementos de la figura 8 pueden expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$(P + R + L + OB + PU_i + S + GD + GS + TI) - (E + D + DE + PU_o + GR + TO) = \delta V \quad [1]$$

entradas en el humedal **salidas del humedal**

58. Así, por ejemplo, si las entradas exceden a las salidas, el almacenamiento (V) aumentará y el nivel del agua del humedal se elevará. Si las entradas son inferiores a las salidas, el almacenamiento (V) disminuirá y el nivel del agua del humedal descenderá.
59. Algunos mecanismos de transferencia de agua pueden no tener lugar en algún humedal en particular, de modo que tendremos un valor cero en el balance hídrico. Si las entradas totales de un balance hídrico no son aproximadamente iguales al total de las salidas, ello puede indicar que un mecanismo de transferencia de agua potencialmente importante se ha omitido o no se ha medido con exactitud. De ahí que el balance hídrico puede ayudar a descubrir zonas concretas en las que hacen falta investigaciones nuevas o más detalladas.

4.5 Incertidumbre en el uso de la ecuación del balance hídrico

60. No es posible medir con exactitud todas las tasas de transferencia de agua, por lo que es inevitable que la cuantificación del balance hídrico carezca de precisión. Aunque la incertidumbre se percibe a menudo como un factor negativo (asociado con frecuencia en la mentalidad de la gente a un error del usuario), es un hecho de la vida real, especialmente al tratar con sistemas naturales, y debe mencionarse explícitamente en lugar de ocultarlo. Donde sea posible, debe calcularse la incertidumbre (o nivel de confianza) que acompaña a todo mecanismo de transferencia de agua. Los esfuerzos futuros pueden centrarse entonces en una mejor medición de los mecanismos menos conocidos. Un posible planteamiento del cálculo del grado de incertidumbre consiste en cuantificar el índice de flujo en cada mecanismo de transferencia de agua utilizando varios métodos diferentes. El abanico de resultados obtenidos empleando diferentes métodos ayuda a definir el grado de certidumbre con el que el mecanismo de transferencia de agua ha sido definido. Si no es posible elegir entre diferentes cálculos de mecanismos de transferencia de agua, puede adoptarse un valor medio, pero el abanico de valores es útil cuando se trata de comprobar el balance hídrico.
61. El balance hídrico se comprueba comparando el volumen de entradas con el volumen de salidas. Si los volúmenes coinciden aproximadamente, entonces se dice que el balance hídrico está “cerrado”. Sin embargo, dado que todas las mediciones de mecanismos de transferencia de agua tienen un margen de incertidumbre, el balance hídrico no podrá cerrarse nunca exactamente. En la práctica, se considera que el balance es satisfactorio si el desequilibrio está dentro del margen de incertidumbre de las mediciones.
62. Existe a menudo en los estudios de balances hídricos la tentación de dar por supuesto que cualquier volumen residual (o no contabilizado) de agua debe ser igual a un determinado mecanismo de transferencia de agua que se supone que existe, pero para el que no se dispone de datos. Por ejemplo, si en un humedal que se piensa que está alimentado por aguas subterráneas el volumen de precipitación es menor que el volumen de desagüe, es tentador concluir que la descarga de aguas subterráneas ha de ser igual a la diferencia entre precipitación y desagüe. Sin embargo, esa agua aparentemente no contabilizada puede ser el resultado de unos datos inexactos de pluviometría o de volumen de desagüe, o bien de una entrada debida a otro mecanismo, como puede ser un manantial que no ha sido reconocido. En consecuencia, cada mecanismo de transferencia de agua debe ser objeto de una estimación independiente, por imprecisa que ésta pueda resultar, y debe contrastarse utilizando el balance hídrico. Definir un balance hídrico puede, por consiguiente, ser proceso iterativo, juntamente con el desarrollo de una imagen conceptual completa del humedal.
63. En el Anexo 3 figura un ejemplo de balance hídrico.

4.6 Definición de los límites de los balances hídricos

64. Donde sea posible, debe realizarse el balance hídrico para el humedal mismo como una unidad hidrológica. Sin embargo, donde sea conveniente subdividir el humedal en unidades hidrológicas distintas, el balance hídrico debe calcularse separadamente para las diferentes unidades hidrológicas. Tal sería el caso, por ejemplo, cuando una compuerta controla el nivel del agua en diferentes partes de un humedal. Puede también ser prudente dividir el humedal en diferentes unidades hidrológicas si son evidentes diferentes mecanismos de transferencia de agua, tal como se indica para las diferentes zonas en la figura 7.

65. En algunas situaciones se han adoptado unidades hidrológicas mayores que el propio humedal y se ha realizado un balance hídrico regional o a gran escala para todo el acuífero en el que se halla situado el humedal, más que para el humedal mismo. Esto se justifica a menudo por el conocimiento de una fuerte conectividad hidráulica entre el acuífero y los humedales. En este planteamiento es necesario medir o estimar los mecanismos de transferencia de agua entre el humedal y el acuífero. Sin embargo, hay que procurar evitar en lo posible este planteamiento, pues la relación entre los humedales y el acuífero puede ser compleja y los efectos sobre el humedal de la extracción de dicho acuífero no pueden determinarse mediante un planteamiento regional o a gran escala.

4.7 Elección de la frecuencia temporal en el balance hídrico

66. La frecuencia temporal (mensual, estacional, anual) usada para el balance hídrico se escoge normalmente en función de las necesidades de información y los objetivos del estudio. Si es necesario disponer rápidamente de resultados, deben utilizarse datos que sean fácilmente accesibles. Los datos pluviométricos son ampliamente accesibles como valores diarios, mientras que los datos sobre aguas subterráneas tienden a registrarse mensualmente. Los tubos de registro colocados en los humedales, que permiten observar los niveles de la zona del agua de crecida, suelen leerse a intervalos quincenales o mensuales. Ello se debe a que la relativamente baja conductividad hidráulica de algunos suelos de humedal significa que los niveles de los tubos sólo cambian apreciablemente a lo largo de esos intervalos, por lo que mediciones diarias o de mayor resolución no suelen ser decisivas.
67. En algunos casos, los objetivos propuestos en el manejo de un humedal pueden estar centrados en parte del ciclo vital de una especie en particular. Aun así, debe tenerse en cuenta el ecosistema general y sus necesidades de agua a lo largo del año. Por ejemplo, aun cuando el objetivo primario pueda ser la conservación de las zancudas (aves de orilla) durante su estación de cría, la estructura global de la vegetación es también importante para el mantenimiento del hábitat de las aves, por lo que hay que ocuparse del régimen hídrico a lo largo de todo el año.

4.8 Período de registro

68. No hay una respuesta simple a la pregunta de cuál es la longitud de registro necesaria para evaluar un balance hídrico.
69. En general, el período analizado debe ser todo lo largo que sea posible y debe incluir etapas húmedas, secas y más “normales” que abarquen toda la variabilidad fundamental del clima propio del sitio. Es obvio que allí donde existen registros largos, cabe la posibilidad de realizar análisis de los impactos de las fluctuaciones o cambios climáticos, pero dichos conjuntos de datos son raros. Allí donde sólo se dispone de registros cortos para el humedal de interés, el período de registro debe clasificarse como seco, húmedo o normal por referencia a otros datos de más largo plazo sobre precipitaciones, movimientos de aguas fluviales o niveles de aguas subterráneas.
70. Cualquiera que sea la escala temporal empleada, es siempre aconsejable proseguir o realizar el monitoreo después de haber efectuado la evaluación, a fin de poder calibrar posteriormente los resultados, cuando se hayan recogido más datos, y ajustar en ese momento el balance hídrico.

4.9 Predicción de impactos hidrológicos mediante elaboración de modelos

71. El planteamiento del balance hídrico descrito más arriba puede ayudar con la puesta a prueba del conocimiento adquirido sobre qué mecanismos de transferencia de agua están presentes y cuál es el volumen de agua que se mueve en cada uno. Sin embargo, el balance hídrico no puede aportar una determinación y predicción definitivas de las consecuencias para el humedal de los impactos hidrológicos, tales como la extracción de aguas subterráneas. Tampoco contiene información sobre el ritmo y la frecuencia de los sucesos hidrológicos. Para definir esas propiedades hidrológicas es necesaria una modelización más detallada.
72. Son varios los tipos de modelos que se han empleado para estudiar las interacciones entre los humedales y las aguas subterráneas. Por ejemplo, donde los suelos son permeables (v.g.: los pantanos de turbera), se han trazado modelos del comportamiento de la zona del agua de crecida del suelo utilizando teorías sobre el drenaje y la física del suelo. Los modelos van desde soluciones analíticas hasta complejos modelos multidimensionales finitos.
73. No entra en el propósito de los presentes lineamientos asesorar sobre tipos concretos de modelos: deberá consultarse a los expertos especialistas en modelización. En general, cuanto más complejo el modelo, más aspectos del sistema pueden representarse y más confianza cabe tener en los resultados. Como norma, para los estudios generales de exploración pueden usarse métodos simples, mientras que para los estudios de impacto ambiental puede ser necesario recurrir a modelos más detallados.
74. No obstante, es importante señalar que la mera recogida de más datos y la utilización de modelos más complejos no garantizan por sí mismas que mejore la comprensión de los fenómenos. Incluso cuando se sabe de antemano que hará falta un modelo complejo, el análisis debe siempre empezar con una simple imagen conceptual del humedal, que se hará más compleja a medida que avance el conocimiento del mismo. Es esencial que se dé una primera comprensión conceptual correcta de los mecanismos de transferencia de agua. A partir de ahí puede recurrirse a la modelización:
 - para generar información cuantitativa acerca de los procesos que impulsan los mecanismos de transferencia de agua;
 - para entender la variabilidad temporal y espacial de los procesos; y
 - para predecir lo que sucederá en distintas posibles situaciones climáticas o de manejo del agua más allá de los datos disponibles para el humedal.
75. La hidrología de los humedales es una ciencia relativamente nueva y todavía no se han elaborado modelos que contemplen explícitamente tanto los procesos hidrológicos que tienen lugar en los humedales como los mecanismos de transferencia de agua hacia dentro y hacia fuera del humedal. En lugar de ello, modelos elaborados para el análisis de las inundaciones fluviales, el drenaje del suelo y el estudio de las aguas subterráneas se han adaptado para evaluar los procesos hidrológicos que se dan en los humedales y los impactos que los afectan.
76. Modelos como MODFLOW se han utilizado en todo el mundo para elaborar modelos de los sistemas de aguas subterráneas, incluyendo en algunos casos una representación de un

humedal local. Detalles de dichos modelos aparecen en libros de texto como Fetter (1994). Se han escrito diversos módulos para estos modelos de sistemas de aguas freáticas que permiten la inclusión de ríos, canales de drenaje y algunos rasgos propios de los humedales. En consecuencia, proporcionan medios para el análisis detallado que pueden aplicarse a la evaluación de impactos del manejo de aguas subterráneas. Algunos estudios (v.g.: Thompson *et al.*, 2004) han combinado modelos de aguas superficiales y aguas subterráneas para evaluar humedales, pero dichas aplicaciones se hallan todavía en fase de investigación. Detalles de dichas técnicas de modelización pueden encontrarse en libros de texto como Kirby *et al.* (1994); MODFLOW puede obtenerse gratuitamente en <http://agua.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow.html>.

5. Hacia un marco para el desarrollo de estrategias de manejo de las aguas subterráneas para la conservación de los humedales

77. Una vez ha sido posible para el GECT elaborar los exámenes técnicos a los que se hace referencia en la sección 1 de los presentes lineamientos, el Grupo tiene la intención de examinarlos y actualizarlos con el fin de aportar unos lineamientos técnicos más detallados sobre la elaboración de estrategias para el manejo de las aguas subterráneas con la vista puesta en la conservación de los ecosistemas de humedales, y también en el empeño por minimizar o mitigar los efectos de la extracción de aguas subterráneas para uso comercial, doméstico o agrícola.
78. Por ahora se ha elaborado un marco preliminar en siete etapas (cuadro 1). En él figuran cuestiones clave o esferas de interés sobre las que los responsables del manejo de los humedales deben comunicarse y colaborar con los encargados del manejo de los recursos hídricos a fin de asegurar que la protección y el mantenimiento de los ecosistemas de humedales se tenga en cuenta al planificar el manejo de las aguas subterráneas y las aguas superficiales.
79. El marco en siete etapas para las aguas subterráneas es esencialmente una serie de actividades técnicas, comprendidas en una más amplia correspondiente al “camino crítico” para la ordenación de cuencas fluviales (véase la Resolución IX.1, Anexo C i.), y concebidas para proporcionar la información y los conocimientos pertinentes en relación con las aguas subterráneas a fin de apoyar la integración de las aguas subterráneas dentro del manejo de los humedales a escala de cuenca hidrográfica.
80. En el cuadro 1 se indica la correspondencia entre las etapas para el manejo de las aguas subterráneas y las etapas del camino crítico para el manejo de cuencas hidrográficas (MCH).
81. Cuando una etapa corresponde tanto a la columna de las aguas subterráneas (lado izquierdo) como a la columna MCH (lado derecho), como por ejemplo en las etapas MCH 1 y 2, ello significa que la etapa en cuestión de la metodología clave para MCH comprende implícitamente aspectos propios de las aguas subterráneas y no se ofrecen lineamientos independientes en relación con las aguas subterráneas.
82. Donde existe una etapa específica en la columna de las aguas subterráneas, por ejemplo la etapa A, ello significa que se ofrecen lineamientos específicos en relación con las aguas subterráneas, y las actividades descritas en dicha etapa sobre aguas subterráneas deben integrarse con las actividades que se llevan a cabo como parte de la correspondiente etapa

de la metodología clave para el MCH. Así, a título de ejemplo, cuando la ejecución de la etapa 3 i), tomada del marco de metodología clave para el MCH (inventario de los humedales de una cuenca), es esencial la etapa A sobre aguas subterráneas (exploración selectiva) a fin de identificar los humedales potencialmente asociados a aguas subterráneas en el inventario de la cuenca.

83. Las siete etapas (de la A a la G) se describen a continuación.

Cuadro 1. Correspondencia, en relación con el mantenimiento de las características ecológicas de los humedales, entre las etapas contempladas en el marco para el manejo de las aguas subterráneas y las etapas incluidas en la metodología clave para el manejo de cuencas hidrográficas (MCH) (tomado de la COP9 DR1, Anexo C i).

Marco para el manejo de aguas subterráneas (Etapas A a G)	Metodología clave para el MCH (Etapas 1 a 9)
Etapa 1: Marcos de políticas, reglamentarios e institucionales.	
Etapa 2: Proceso de participación de los interesados directos en la configuración de las etapas.	
Etapa A: Exploración selectiva para identificar los humedales potencialmente asociados con aguas subterráneas.	Etapa 3 i): Inventario de los humedales de la cuenca.
Etapa 3 ii): Evaluación del estado actual y las tendencias	
Etapa B: Modelo conceptual de las interacciones entre aguas subterráneas y humedales.	Etapa 3 iii): Determinar la función de los recursos hídricos de los humedales.
Etapa C: Análisis de situación de los impactos combinados, estado actual y tendencias, centrado en la interfaz entre aguas subterráneas y humedales.	
Etapa 4: Establecimiento de prioridades acordadas para los humedales de la cuenca.	
Etapa D: Determinar las necesidades de aguas subterráneas de los humedales.	Etapa 5: Establecimiento de objetivos de manejo cuantitativos para los humedales.
Etapa E: Convenir y fijar asignaciones de aguas subterráneas para los humedales, y límites a la explotación de las aguas subterráneas.	
Etapa F: Especificar acciones y estrategias de manejo respecto de las aguas subterráneas para los humedales de la cuenca, e incluirlas en el plan de manejo de tierras y aguas para la cuenca.	Etapa 6: Plan de manejo de los usos del agua y el suelo para la cuenca.
Etapa 7a: Ejecución a nivel de humedal. Etapa 7b: Ejecución a nivel de cuenca.	
Etapa G: Monitoreo y evaluación de las aguas subterráneas.	Etapa 8: Seguimiento y elaboración de informes a nivel de cuenca y de humedal.
Etapa 9: Examen, reflexión y revisión de las prioridades.	

Etapa A: Exploración selectiva para identificar humedales potencialmente asociados con aguas subterráneas

84. Los humedales deben considerarse en tres dimensiones dentro del paisaje: las más comúnmente conocidas del contorno lateral y el tamaño de un humedal, así como su morfología, están más fuertemente influidas por la topografía y la hidrología. Sin embargo, no pueden entenderse completamente las funciones de un humedal en relación con el agua sin considerar también el marco geológico de un humedal. Según cómo sea la geología del

subsuelo y el entorno, un humedal estará más o menos fuertemente asociado y en dependencia con aguas subterráneas. La exploración selectiva a escala de cuenca hidrográfica indicará la probabilidad de que los humedales de la cuenca estén fuertemente asociados con aguas subterráneas, y puede indicar asimismo los tipos de interacción que cabe esperar. Sin embargo, harían falta estudios más detallados, posiblemente con visitas *in situ* incluidas, para confirmar dichas asociaciones en el caso de humedales concretos.

85. La exploración selectiva exigirá la superposición de mapas geológicos, de vegetación y de usos del suelo. Además, deberán reunirse cifras generales sobre índices de recarga y de extracción (dichas cifras podrán obtenerse probablemente a partir de los planes de manejo de recursos hídricos ya existentes) a fin de determinar el lugar de explotación de los recursos freáticos. El resultado del ejercicio será descubrir humedales que estén conectados con aguas subterráneas (como sitios de recarga o descarga) y que exijan ulterior estudio detallado.

Etapas B: Modelo conceptual de las interacciones entre aguas subterráneas y humedales

86. Para cada humedal, identificado en el ejercicio de exploración selectiva, que pueda sufrir las consecuencias de una explotación actual o futura de las aguas subterráneas debe elaborarse un modelo conceptual. Éste podría ser un simple ejercicio de despacho o podría comprender detallados estudios de campo y modelos numéricos. La elaboración de modelos conceptuales ha de comenzar por definir los mecanismos de transferencia de agua mediante los cuales el agua entra y sale de cada humedal. Calcular un balance hídrico puede ayudar a cuantificar las contribuciones de agua de diversas fuentes y posibles recargas de aguas subterráneas a los acuíferos. El balance hídrico debe calcularse para diferentes estaciones y tanto para condiciones de humedad como de sequía. Debe explicitarse el margen de incertidumbre en la estimación de la magnitud de los mecanismos de transferencia de agua a fin de presentar un contexto de riesgo.
87. Esta información es necesaria para cuantificar el grado de dependencia de un humedal con respecto a las aguas subterráneas e, inversamente, la dependencia potencial de un acuífero respecto de los humedales con él asociados, de modo que las necesidades de aguas subterráneas de los humedales asociados puedan cuantificarse e, inversamente, la necesidad de contribución de los humedales para la recarga de aguas subterráneas pueda cuantificarse igualmente.

Etapas C: Análisis de situación de los impactos combinados, estado actual y tendencias, centrado en la interfaz entre aguas subterráneas y humedales

88. En la mayoría de las cuencas fluviales que poseen recursos explotables de aguas subterráneas puede haber numerosos individuos y/o empresas que extraigan agua de perforaciones, y esa extracción puede no estar suficientemente controlada, especialmente cuando las aguas subterráneas se consideran legalmente propiedad privada. Es posible que extracciones suplementarias de aguas superficiales no sean conocidas ni controladas.
89. Es de vital importancia que toda evaluación del estado actual de los humedales asociados a aguas subterráneas incluya también la evaluación de los impactos, separados y combinados, de la extracción y la descarga de aguas subterráneas y aguas superficiales de la cuenca.

90. Es igualmente importante estudiar cómo los cambios de la cubierta superficial de las tierras y las características del suelo pueden afectar la recarga de un acuífero y, en consecuencia, el suministro de agua al humedal. Por ejemplo, se cree que en el intermitente río Kuiseb, que fluye a través del desierto de Namib (África), la vegetación del lecho del río desempeña un papel clave en cuanto a retardar las corrientes superficiales en condiciones de inundación, y por ello fomenta la recarga local del importantísimo acuífero del Kuiseb. Es preciso estudiar posibles situaciones más complejas de cambio climático o cambio en los usos del suelo, pues debe utilizarse la unidad de captación o de acuífero para estimar cómo pueden cambiar en el futuro las interacciones entre aguas subterráneas y humedales.

Etapas D: Determinar las necesidades de aguas subterráneas de los humedales

91. La cuantificación de los mecanismos de transferencia de agua proporciona el componente hidrológico de la evaluación de las interacciones entre humedales y aguas subterráneas. En general, el ecosistema de humedal (incluidos sus componentes, v.g.: sus suelos, plantas y animales; sus funciones, v.g.: recarga de aguas subterráneas o ciclo de nutrientes; y sus atributos, v.g.: la biodiversidad) se adaptará al régimen hidrológico, incluida la magnitud, la frecuencia, la duración, y el ritmo temporal de los mecanismos de transferencia de agua. Aunque los cambios de gran envergadura en la hidrología del humedal provocarán normalmente importantes cambios en las características ecológicas, algunos cambios de menor alcance en la hidrología pueden no desembocar en alteraciones ecológicas.
92. La etapa D exige determinar las necesidades preferentes de agua del ecosistema de humedal y su sensibilidad al cambio hidrológico, su capacidad de resistencia y su capacidad de adaptación. Ello permite definir las consecuencias del cambio hidrológico para el ecosistema de humedal. En los *Informes técnicos de Ramsar*, elaborados por el GECT, se ofrecerán lineamientos sobre las necesidades de agua de los humedales.

Etapas E: Convenir y fijar asignaciones de aguas subterráneas para los humedales, y límites a la explotación de las aguas subterráneas

93. Las necesidades de aguas subterráneas de los humedales deben explicitarse de manera que puedan incluirse al determinar el rendimiento sostenible del acuífero y la consiguiente asignación de los recursos hídricos disponibles para los diferentes usos. De este modo, las consecuencias para la salud del humedal de las diferentes opciones de asignación de aguas subterráneas pueden resultar visibles para los responsables del manejo de los recursos hídricos y para la sociedad en su conjunto, y pueden incluirse en los planes de asignación de agua de la cuenca. En muchos casos no se dispondrá de suficiente agua para satisfacer todas las demandas. Sin embargo, si los responsables de tomar las decisiones conocen las consecuencias para las características ecológicas y para los medios de vida que dependen de ello, las necesidades de agua de los humedales pueden estudiarse juntamente con los demás usos del agua.
94. Debe asignarse agua suficiente a los humedales de superficie o subterráneos que dependen del acuífero, a fin de mantener las características ecológicas deseadas, aunque ello puede exigir un compromiso con las extracciones permitidas con fines industriales, domésticos o agrícolas. Las asignaciones globales de agua a partir de las aguas subterráneas, incluidas las asignaciones para el mantenimiento de los humedales, deben determinarse paralelamente a escala de cuenca o acuífero y a escala de cada humedal.

Etapas F: Especificar acciones y estrategias de manejo respecto de las aguas subterráneas para los humedales de la cuenca, e incluirlas en el plan de manejo de tierras y aguas para la cuenca

95. Algunas estrategias específicamente relacionadas con las aguas subterráneas pueden incluirse en el plan de manejo de tierras y aguas para la cuenca, a fin de minimizar los impactos de la explotación de las aguas subterráneas sobre los humedales asociados a ellas. Por ejemplo:
- Las aguas subterráneas pueden ser la fuente más importante de agua para un humedal en determinadas épocas del año, tales como la estación seca o durante períodos de sequía, de modo que puede permitirse una mayor extracción durante los períodos húmedos, cuando el humedal no corre riesgo, a fin de compensar una menor extracción cuando el humedal se encuentra en situación crítica.
 - No deben practicarse perforaciones junto al humedal allí donde el cono de depresión podría reducir el nivel del agua en el humedal y provocar la degradación de las características ecológicas.
 - Allí donde los humedales se alimenten tanto de aguas de superficie como de aguas subterráneas, existe la posibilidad de atender las necesidades de agua en diferentes estaciones a partir de fuentes diferentes (manejo conjunto). Por ejemplo, un humedal previamente alimentado por aguas subterráneas podría sostenerse o rehabilitarse mediante aportaciones de agua de superficie a partir de una represa situada aguas arriba. Sin embargo, es también vital tener en cuenta las necesidades del humedal en materia de calidad del agua, dado que la calidad de las aguas superficiales puede ser muy diferente de la calidad de las aguas subterráneas.

Etapas G: Monitoreo y evaluación de las aguas subterráneas

96. Especialmente en el caso en que los humedales están asociados con extensos acuíferos regionales, cuyos límites pueden rebasar la divisoria de aguas, es necesario vigilar el estado de las aguas subterráneas y la demanda de éstas, paralelamente con la vigilancia del estado y la respuesta de los humedales a los cambios en la disponibilidad de aguas subterráneas.
97. Debe haber también una vigilancia a largo plazo de las tendencias observadas en los niveles de las aguas subterráneas en sitios o en regiones donde tiene lugar la explotación intensiva del recurso o es probable que se dé en el futuro, incluidos aquellos casos de amplia utilización de métodos de captación de aguas subterráneas a pequeña escala (v.g.: efectos multiplicadores del uso agrícola de bombas hidráulicas de pedales por pequeños agricultores).
98. La vegetación de los humedales puede proporcionar un indicador de alerta temprana frente a extracciones excesivas a corto plazo (v.g.: mediante el llamado “estrés” de agua). Una importante empresa minera está utilizando este criterio con éxito para regular la extracción de aguas subterráneas a lo largo del río Limpopo en el África austral. Sin embargo, la lectura de piezómetros es el método preferido para evaluar los efectos de la extracción en la mayoría de los casos.

99. Los conjuntos de datos a largo plazo sobre características y variabilidad de las aguas subterráneas son generalmente limitados, en parte debido a la dificultad de medir el volumen de las aguas subterráneas, y en parte debido a que el nivel y la calidad de las aguas subterráneas tiende a variar lentamente en respuesta al clima u otras presiones, por lo que los períodos de medición deben ser notablemente más largos a fin de establecer perfiles naturales, tanto espaciales como temporales, de variabilidad de las aguas subterráneas. La ausencia general de datos hace que resulte esencial adoptar un planteamiento adaptativo para el establecimiento y la consecución de objetivos. Debe ponerse en marcha un programa de monitoreo apropiado para recoger información retroactiva a fin de perfeccionar el modelo conceptual y, en consecuencia, reforzar los requisitos de determinación de las aguas subterráneas de los humedales y pulir o revisar las asignaciones efectivas de aguas subterráneas a los humedales como una forma de manejo adaptativo.
100. Pueden encontrarse nuevos lineamientos sobre el monitoreo de humedales en el marco de la Convención para diseñar un programa eficaz de monitoreo (Resolución VI.1; Manual de Ramsar sobre el uso racional, 8, sección D).

6. Glosario

acuicludo	rocas y sedimentos que contienen pequeñas cantidades de agua y permiten que el agua pase a través de ellos lentamente, v.g.: mudstone grueso
acuífero	rocas y sedimentos que almacenan y transmiten agua, v.g.: caliza, yeso
acuífero confinado	un acuífero que se halla bajo una capa de baja permeabilidad (un acuitardo o acuicludo) que limita los movimientos del agua hacia dentro y hacia fuera del acuífero
acuífero no confinado	un acuífero que no está cubierto por una capa de baja permeabilidad (un acuitardo o acuicludo)
acuitardo	rocas y sedimentos que contienen muy poca cantidad de agua y bloquean el movimiento de las aguas subterráneas, v.g.: arcilla
aguas subterráneas	agua almacenada en rocas permeables, como la caliza o sedimentos no consolidados del tipo de la arena y la grava
balance hídrico	comparación entre los volúmenes de agua que entran y los que salen de un humedal, habida cuenta de los cambios en cuanto al almacenamiento de agua en el humedal
barrena	utensilio manual, por lo general en forma de tornillo, para extraer pequeños nódulos (<5 cm de diámetro y 30 cm de largo) del suelo
conductividad hidráulica	el ritmo al que el agua puede moverse a través de rocas o sedimentos
extracción de aguas subterráneas	retirada de agua de un acuífero, generalmente por bombeo, para suministro agrícola, industrial o público
mecanismos de transferencia de agua	métodos utilizados por el agua para entrar y salir de un humedal.
permeabilidad	el grado en que el agua puede moverse a través de rocas o sedimentos

piezómetro	tubería de plástico o metal colocada verticalmente en el suelo de manera que el extremo inferior se halle en un acuífero del que hay que medir la punta piezométrica
punta piezométrica	nivel que las aguas subterráneas alcanzarían si no se lo impidiera una capa de baja permeabilidad situada encima del acuífero (un acuícludo o acuitardo) o no se agotaran debido, por ejemplo, a la evaporación o la extracción
recarga de aguas subterráneas	entrada de agua en un acuífero, como la filtración descendente de agua de un humedal
rendimiento sostenible	ritmo al puede extraerse agua de un acuífero sin que acabe degradándose
tubo de registro	tubo de metal o plástico perforados que se coloca verticalmente en las aguas subterráneas (como un pozo de captación de agua en miniatura) para medir el nivel de la zona del agua de crecida
zona del agua de crecida	nivel del agua en un acuífero no confinado, v.g.: el nivel del agua en un pozo
zona no saturada	capa de roca o sedimento donde no todos los espacios y grietas están llenos de agua
zona saturada	capa de roca o sedimento donde todos los espacios y grietas están llenos de agua

Referencias

- Acreman, M.C. 2003 *Wetlands and hydrology*. MedWet Publication 9. Tour du Valat, Francia.
- Acreman, M.C. 2004 Impact assessment of wetlands: focus on hydrological and hydrogeological issues. Phase 2 report. Environment Agency, Bristol (W6-091) and Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford (C01996).
- Acreman, M.C. and José, P. 2000 Wetlands. En: Acreman, M.C. (ed) *The hydrology of the UK – a study of change*. Routledge, Londres.
- Cirujano, S., Casado, C., Bernués, M., Camargo, J.A. 1996 Ecological study of Las Tablas de Daimiel National Park (Ciudad Real, Central Spain). Differences in water physico-chemistry and vegetation between 1974 and 1989. *Botanical Conservation*, 75 211-215.
- Custodio, E. 2002 Aquifer over-exploitation; what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10, 254-277.
- Fariz, G.H., Hatough-Bouran, A. 1998 Population dynamics in arid regions: the experience of Azraq Oasis Conservation Project. En: de Sherbinin, Alex & Dompka, V. (eds) *Water and population dynamics*. Case studies and policy implications. American Association for the Advancement of Science, Washington D.C.
- Fetter, C.W. 1994 *Applied Hydrogeology*. 3rd Edition, Prentice-Hall, New Jersey.
- Fornés, J.M. and Llamas, M.R. (2001). Conflicts between Groundwater Abstraction for irrigation and Wetland Conservation: Achieving Sustainable Development in the La Mancha Húmeda Biosphere reserve (Spain). En: *Groundwater ecology. A tool for management of water resources*. Griebler, C., danielopol, D., Gibert, J., Nachtnebel, H.P. and Notenboom, J. (eds.) European Commission. Environment and Climate Programme - Austrian Academy of Sciences (Institute of Limnology). EUR 1987. pp. 263-275.
- Kirkby, M.J., Naden, P.S., Burt, T.P. & Butcher, D.P. (1993), *Computer Simulation in Physical Geography* Second edition, John Wiley & Sons, Chichester. pp. 190.
- Llamas, M.R. 1989 Wetlands and groundwater, new constraints in groundwater management. In: *Groundwater Management: Quantity and Quality*. International Association Hydrological Sciences, Publ. num. 188, pp. 595-604.

- Morris, B.L., Lawrence, A., Chilton, P.J., Adams, B., Calow, R.C., Klink, B.A. 2003 *Groundwater and its susceptibility to degradation; a global assessment of the problem and options for management*. Report RS033 to UNEP, British Geological Survey, Wallingford, RU.
- Steiner, G.M. 1992 *Österreichischer Moorschutzkatalog*. Styria Medien Service. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Viena.
- Thompson, J.R., Hollis, G.E. 1995 Hydrological modelling and the sustainable development of the Hadejia-Nguru wetlands, Nigeria. *Hydrological Sciences Journal* 40, 1, 97-116.
- Thompson, J.R., Refstrup Sørensen, H., Gavin, H. and Refsgaard A. 2004 Application of the coupled MIKE SHE / MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in Southeast England. *Journal of Hydrology*. 293, 151-179.

Anexo 1

Mecanismos de transferencia de agua en humedales relacionados con aguas subterráneas

Las maneras en que el agua puede entrar o salir de un humedal se llaman mecanismos de transferencia de agua. La figura A1 (a-n) ofrece una lista de posibles mecanismos de transferencia de agua así como su asociación con acuíferos y estratos menos permeables. Dichos mecanismos no necesariamente dictan la distribución de agua dentro de un humedal o su tasa de movimiento, sino que más bien definen la interfaz hidrológica con el medio circundante. Todo humedal concreto estará influido únicamente por un subconjunto de esos mecanismos. La identificación de los mecanismos clave puede hacerse recogiendo información acerca de la hidrología y la geología del humedal.

<p style="text-align: center;"><u>KEY</u></p> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div> Wetland</div> <div> Water</div> <div> Low Permeability Strata</div> <div> Semi-Permeable Strata</div> <div> Aquifer (e.g. Chalk)</div> <div> Piezometric Surface</div> </div>	
	<p style="text-align: center;"><Leyenda del recuadro:></p> <p style="text-align: center;"><u>CLAVE</u></p> <p style="text-align: center;">Humedal</p> <p style="text-align: center;">Agua</p> <p style="text-align: center;">Estratos de baja permeabilidad</p> <p style="text-align: center;">Estratos semipermeables</p> <p style="text-align: center;">Acuífero (v.g.: yeso)</p> <p style="text-align: center;">Superficie piezométrica</p>

Clave para las figuras

Los estratos geológicos varían considerablemente en su grado de permeabilidad, o ritmo con el que el agua puede pasar a través de ellos (llamado también conductividad hidráulica). Entre los estratos de baja permeabilidad figura la arcilla, mientras que entre los estratos semipermeables figura la arena. La punta piezométrica es el nivel que las aguas subterráneas alcanzarían si no se lo impidiera una capa de baja permeabilidad situada encima del acuífero (un acuícludo o acuitardo) o no se agotaran debido, por ejemplo, a la evaporación o la extracción. En acuíferos no confinados, la punta piezométrica puede ser igual a la zona del agua de crecida observada.

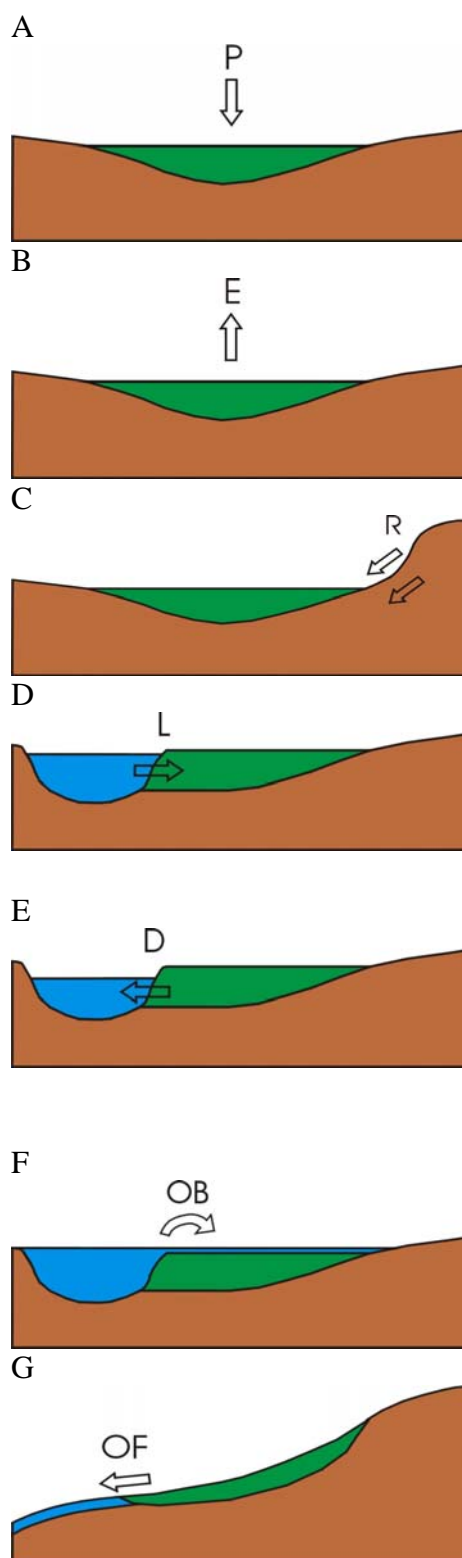


Figura A1. Mecanismos de transferencia de agua en los humedales

P precipitación. Lluvia, aguanieve o nieve que cae directamente en el humedal, así como niebla y condensación interceptadas.

E evaporación. Agua que va desde el suelo, la superficie libre del agua o de las plantas del humedal a la atmósfera. Comprende también la transpiración.

R escurrentía. Agua que desciende por la superficie del terreno, formando corrientes o atravesando capas poco profundas del suelo, hasta el humedal.

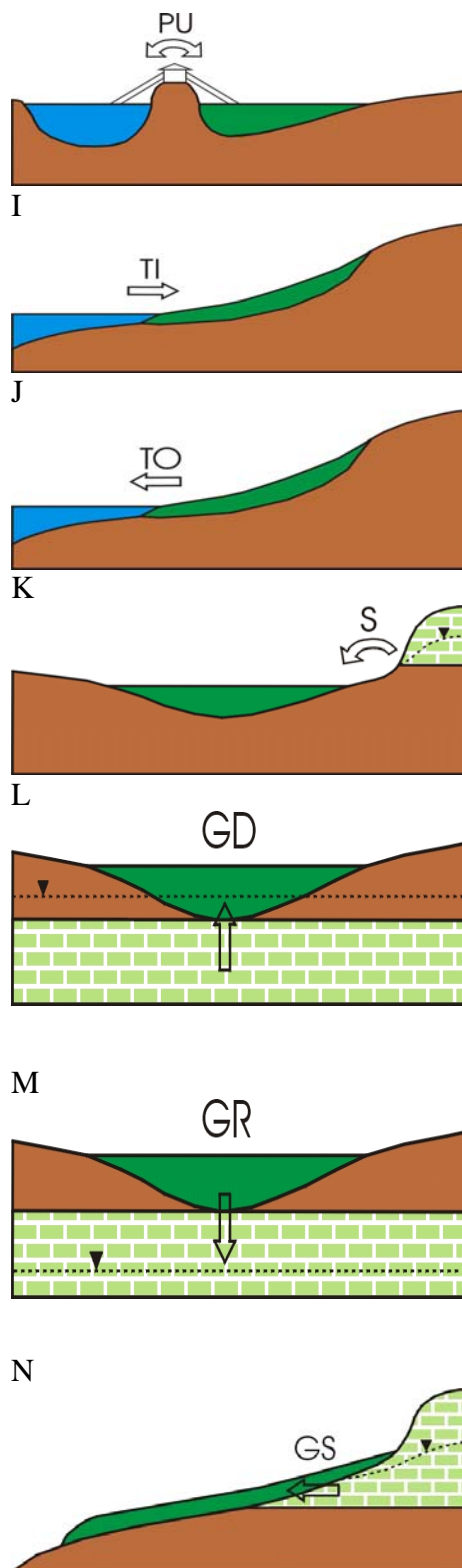
L afluencia lateral. Agua que se desplaza lateralmente a través del suelo, desde una acequia, un río o un lago, hasta el humedal. El nivel de la zona del agua de crecida del humedal es inferior al de la masa de agua que sale.

D drenaje. Agua que se desplaza lateralmente, a través del suelo, desde el humedal hasta una acequia, un río o un lago. Puede ser un movimiento natural o reforzado por desagües artificiales. El nivel de la zona del agua de crecida del humedal es superior al de la masa de agua receptora.

OB entrada por desbordamiento. Agua que afluye a la superficie del humedal al desbordarse una acequia, un río o un lago. El nivel del agua en la masa que sale es superior al nivel de la superficie del humedal.

OF desagüe. Agua que desciende cuesta abajo desde un humedal hasta un curso de agua. Ello incluye el agua que refluye a un río, después de haberse desbordado, cuando el nivel del río baja. El curso de agua puede empezar dentro del humedal.

PU bombeo. Agua que se desplaza entre un humedal y un río, un lago, una acequia o el mar mediante una bomba mecánica. El agua puede bombearse al interior o al exterior del humedal.



TI entrada con pleamar. Agua salada que entra en un humedal desde el mar cuando sube la marea.

TO salida con bajamar. Agua salada que pasa de un humedal al mar cuando baja la marea.

S manantial. Agua que mana de un acuífero hacia la superficie de un humedal. A menudo este fenómeno va asociado a la existencia de un acuicludo bajo el acuífero.

GD descarga de aguas subterráneas. Agua que asciende verticalmente hacia un humedal desde un acuífero subyacente. La punta o nivel piezométrico del agua del acuífero es superior al nivel del agua en el humedal. Puede haber o no una capa de menor permeabilidad entre el humedal y el acuífero, lo que podría limitar el flujo de agua.

GR recarga de aguas subterráneas. Agua que desciende verticalmente desde un humedal a un acuífero subyacente. La punta o nivel piezométrico del agua del acuífero es inferior al nivel del agua en el humedal. Puede haber o no una capa de menor permeabilidad entre el humedal y el acuífero, lo que podría limitar el flujo de agua.

GS filtración de aguas subterráneas. Agua que se desplaza lateralmente hacia un humedal desde un acuífero adyacente. Puede haber o no una capa de menor permeabilidad entre el humedal y el acuífero, lo que podría limitar el flujo de agua.

Figura A1 (continuación). Mecanismos de transferencia de agua en los humedales

Anexo 2

Conexión entre el entorno paisajístico y los mecanismos de transferencia de agua

La tipología hidrológica de los humedales empleada en los presentes lineamientos se basa en el entorno paisajístico y en los mecanismos de transferencia de agua. El entorno paisajístico da lugar a siete tipos diferentes dentro de la definición de los humedales propia de Ramsar (figura A2.1). Éstos pueden subdividirse a su vez en función de los mecanismos de transferencia de agua dominantes hasta dar lugar a 15 subtipos (cuadro A2.1). En particular, los subtipos se basan en si el mecanismo de transferencia de agua que probablemente domina en cada tipo es de aguas superficiales o aguas subterráneas o una combinación de las dos. Las figuras A2.2 a la A2.7 ofrecen diagramas de algún ejemplo de posibles humedales de cada subtipo. Para los humedales situados en zonas topográficamente llanas, sólo es pertinente el subtipo de aguas superficiales.

Evidentemente, el subtipo puede no ser conocido al comienzo del estudio, dado que la contribución de las aguas subterráneas al humedal es difícil de determinar. Sin embargo, la tipología puede usarse como guía para comprender los mecanismos hidrológicos que pueden comprobarse mediante los datos.

Cuadro A2.1 Tipos de humedales según el entorno paisajístico y subtipos hidrológicos

Entorno paisajístico	Subtipo con arreglo al mecanismo de transferencia de agua
Humedales de altiplanicie	Alimentados por aguas superficiales de altura
Humedales de ladera	Alimentados por aguas superficiales
	Alimentados por aguas superficiales y por aguas subterráneas
	Alimentados por aguas subterráneas
Humedales de fondo de valle	Alimentados por aguas superficiales
	Alimentados por aguas superficiales y por aguas subterráneas
	Alimentados por aguas subterráneas
Humedales subterráneos	Alimentados por aguas subterráneas
Humedales de depresión	Alimentados por aguas superficiales
	Alimentados por aguas superficiales y por aguas subterráneas
	Alimentados por aguas subterráneas
Humedales de llanuras bajas	Alimentados por aguas superficiales de tierras bajas
Humedales costeros	Alimentados por aguas superficiales
	Alimentados por aguas superficiales y por aguas subterráneas
	Alimentados por aguas subterráneas

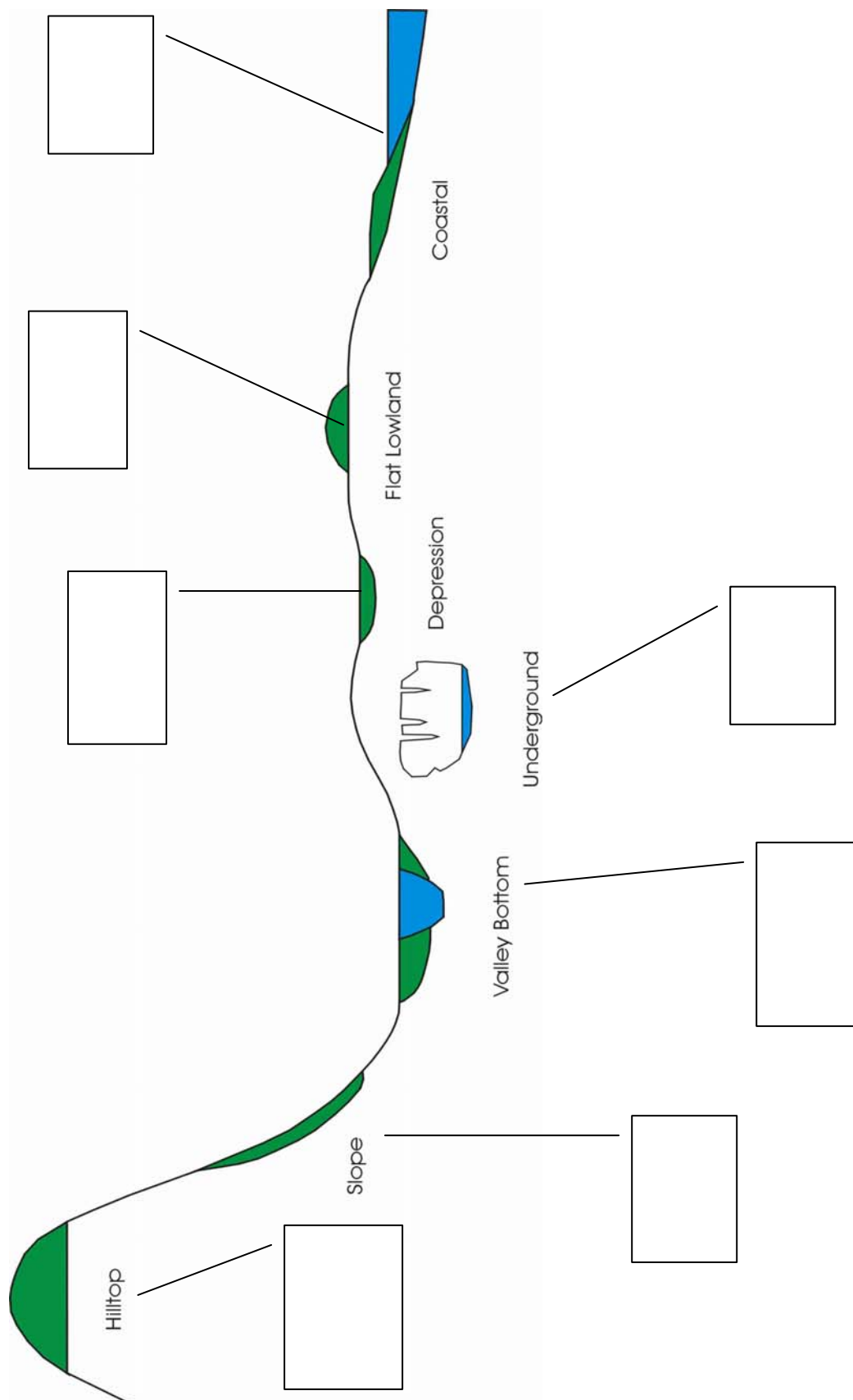


Figura A2.1. Entornos paisajísticos de los humedales [Nota: Está previsto incluir recuadros con fotografías propias de cada tipo]

<Leyenda de la figura A2.1 (de arriba abajo):> Costero – Llanura baja – Depresión – Subterráneo – Fondo de valle – Ladera – Cima

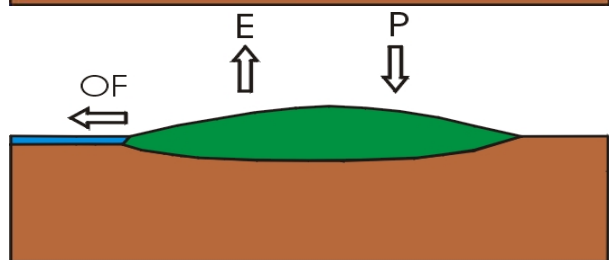
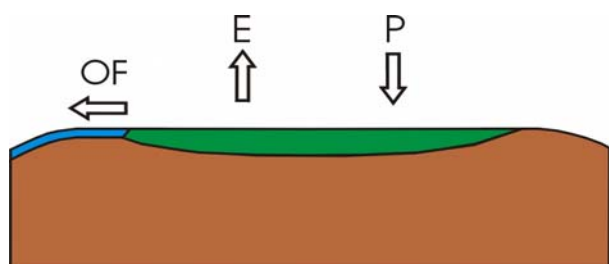
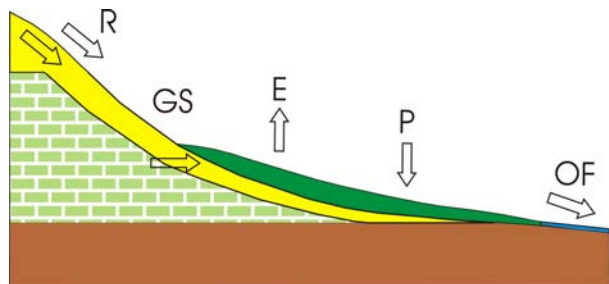
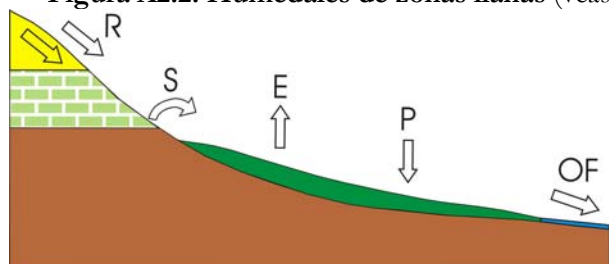


Figura A2.2. Humedales de zonas llanas (véase en el Anexo 1 la clave para las abreviaturas)



Humedal de altiplanicie

Alimentado por aguas

superficiales: Humedal situado sobre estratos impermeables. Entradas con dominio de precipitación. Salidas por evaporación y desagüe de superficie. Ejemplo: pantano combinado de tierras altas.

Humedal de llanuras bajas

Alimentado por aguas

superficiales: Humedal situado sobre estratos impermeables. Entradas con dominio de precipitación. Salidas por evaporación y desagüe de superficie. Ejemplo: cenagal abovedado.

Humedal de ladera

Alimentado por aguas

superficiales: Humedal situado sobre estratos impermeables. Entradas con dominio de precipitación, escorrentía y posible afluencia de manantiales. Salidas por evaporación y desagüe de superficie.

Humedal de ladera

Alimentado por aguas

superficiales y por aguas subterráneas: Humedal separado del acuífero subyacente por una capa de menor permeabilidad. Entradas por filtración de aguas subterráneas, precipitación y escorrentía superficial. La aportación de aguas subterráneas puede verse limitada por una capa de menor permeabilidad. Salidas por evaporación y escorrentía superficial. Ejemplo:

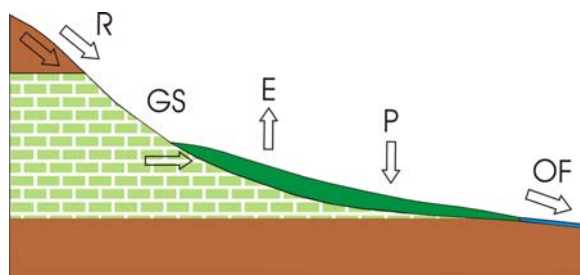


Figura A2.3. Humedales de ladera

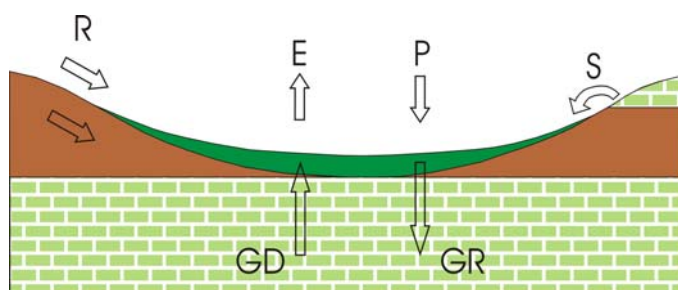
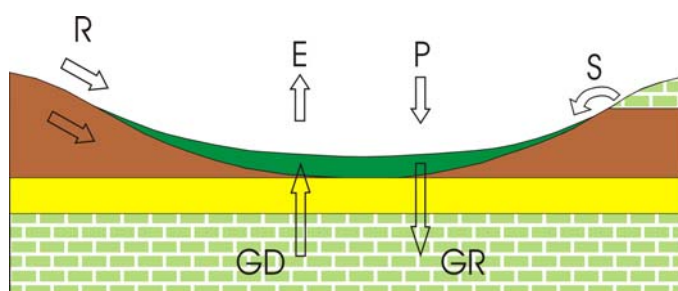
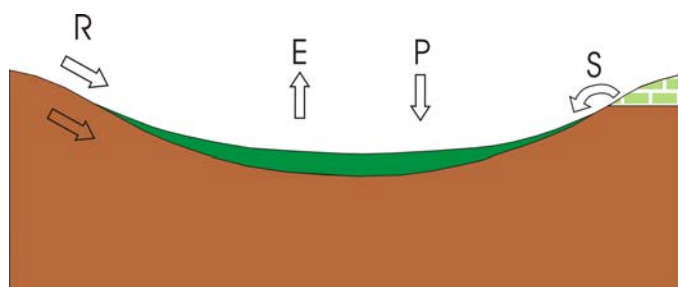


Figura A2.4. Humedales de depresión

Humedal de ladera

Alimentado por aguas

subterráneas: Humedal en contacto directo con el acuífero subyacente. Entradas con dominio de filtración de aguas subterráneas, complementadas con precipitación y escorrentía superficial. Salidas por evaporación y desagüe de superficie. Ejemplo:

Humedal de depresión

Alimentado por aguas

superficiales: Humedal situado sobre estratos impermeables. Entradas con dominio de precipitación, escorrentía y posible afluencia de manantiales. Salidas por evaporación solamente. Ejemplo:

Humedal de depresión

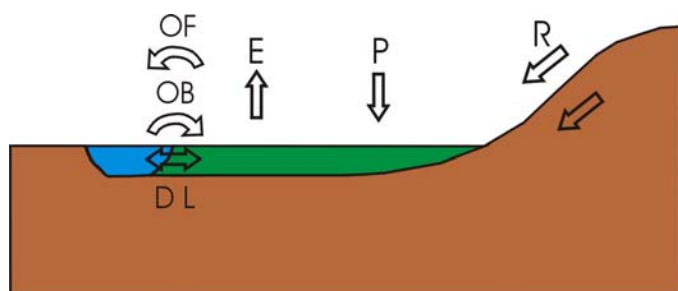
Alimentado por aguas

superficiales y por aguas subterráneas: Humedal separado del acuífero subyacente por una capa de menor permeabilidad. Entradas por descarga de aguas subterráneas cuando el nivel de éstas es alto, por precipitación, escorrentía superficial y posible afluencia de manantiales. La entrada de aguas subterráneas puede verse limitada por una capa de menor permeabilidad. Salidas por evaporación y recarga de aguas subterráneas cuando el nivel de éstas es bajo. Ejemplo:

Humedal de depresión

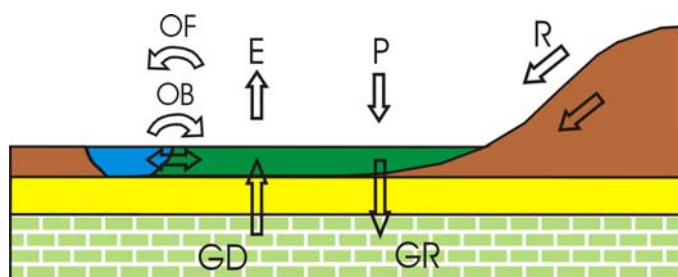
Alimentado por aguas

subterráneas: Humedal en contacto directo con el acuífero subyacente. Entradas con dominio de descarga de aguas subterráneas cuando el nivel de éstas es alto, complementadas con precipitación, escorrentía superficial y afluencia de manantiales. Salidas por evaporación y recarga de aguas subterráneas cuando el nivel de éstas es bajo. Ejemplo:



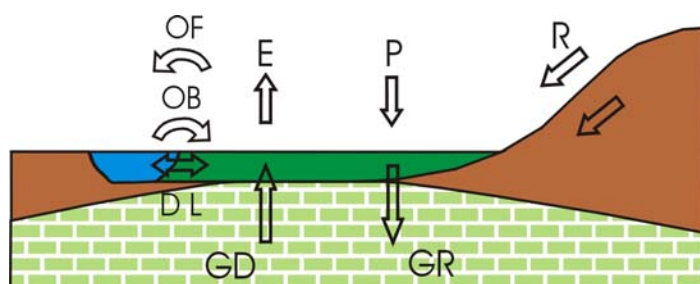
Humedal de fondo de valle

Alimentado por aguas superficiales: Humedal situado sobre estratos impermeables. Entradas con dominio de aguas de desbordamiento y afluencia lateral, complementadas con precipitación y escorrentía superficial. Salidas por drenaje, desagüe de superficie y evaporación. Las afluencias y desagües dependen en gran medida del nivel del agua en el río o el lago. Ejemplo: llanuras aluviales inundables.



Humedal de fondo de valle

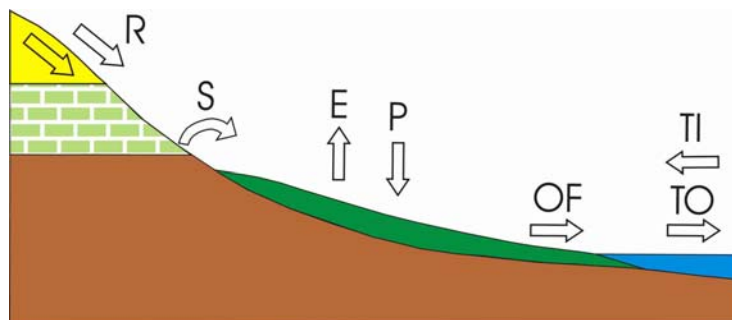
Alimentado por aguas superficiales y por aguas subterráneas: Humedal separado del acuífero subyacente por una capa de menor permeabilidad. Entradas de aguas de desbordamiento y descarga de aguas subterráneas, complementadas con escorrentía y precipitación. La afluencia de aguas subterráneas puede verse limitada por la interposición de una capa de baja permeabilidad. Salidas por drenaje, desagüe de superficie, evaporación y recarga de aguas subterráneas. Ejemplo: llanuras inundables sobre sustrato arenoso.



Humedal de fondo de valle

Alimentado por aguas subterráneas: Humedal en contacto directo con el acuífero subyacente. Entradas con dominio de aguas de desbordamiento y descarga de aguas subterráneas cuando el nivel de éstas es alto, complementadas con escorrentía y precipitación. Salidas por recarga de aguas subterráneas cuando el nivel de éstas es bajo, drenaje, desagüe de superficie y evaporación. Ejemplo: llanuras inundables en sistemas kársticos.

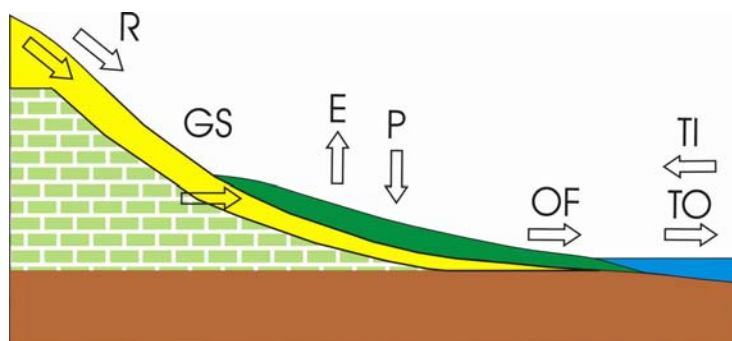
Figura A2.5. Humedales de fondo de valle



Humedal costero

Alimentado por aguas

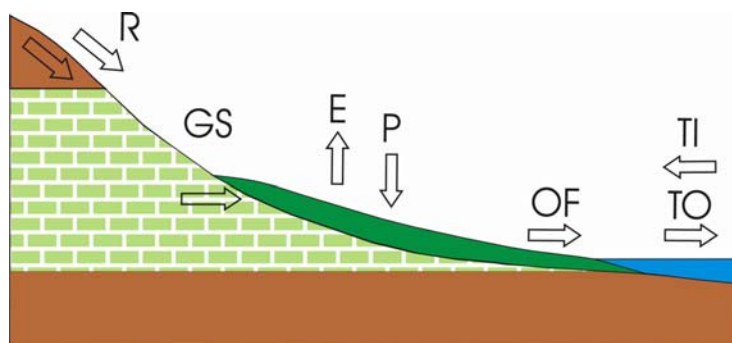
superficiales: Humedal situado sobre estratos impermeables. Entradas con dominio de aguas de marea, precipitación, escorrentía superficial y posible afluencia de manantiales. Salidas por evaporación y desagüe de superficie.



Humedal costero

Alimentado por aguas

superficiales y por aguas subterráneas: Humedal separado del acuífero subyacente por una capa de menor permeabilidad. Entradas de aguas de marea, filtración de aguas subterráneas, precipitación y escorrentía superficial. La aportación de aguas subterráneas puede verse limitada por la capa de menor permeabilidad. Salidas por evaporación y desagüe de superficie. Ejemplo:

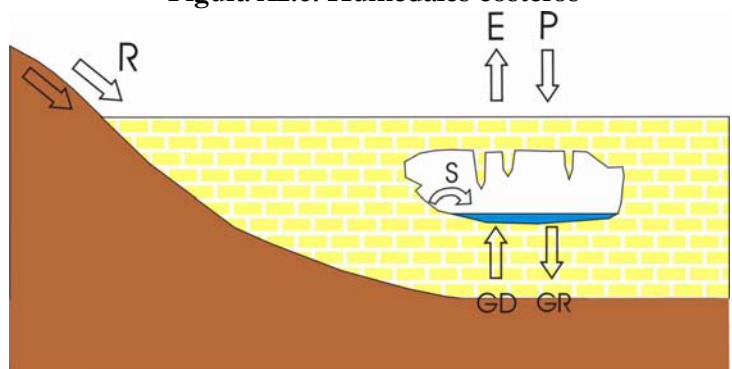


Humedal costero

Alimentado por aguas

subterráneas: Humedal en contacto directo con el acuífero subyacente. Entradas con dominio de filtración por aguas subterráneas y de aguas de marea, complementadas con precipitación y escorrentía superficial. Salidas por evaporación y desagüe de superficie. Ejemplo:

Figura A2.6. Humedales costeros



Humedal subterráneo

Alimentado por aguas

subterráneas: Humedal formado por disolución en grutas de rocas permeables. Entradas con dominio de afluencia de manantiales y descarga de aguas subterráneas. Salidas por recarga de aguas subterráneas. Ejemplo:

Figura A2.7. Humedales subterráneos

Anexo 3

Ejemplo de balance hídrico

En Sheringham y Beeston Regis Commons, Reino Unido, se consideró que las principales entradas hidrológicas en el humedal eran la lluvia (P), el agua aportada por un río que atraviesa el sitio (R) y la descarga desde el acuífero de arena y grava ($GD_{s\&g}$). Es también posible que entren en el humedal pequeñas cantidades de agua desde el acuífero de yeso (GD_{Chalk}), si bien la primera idea que había que contrastar al respecto es que se trataba de un aporte despreciable. Las salidas principales son por evaporación (E) y desagüe hacia el arroyo (DE). También se pensaba que los cambios en el almacenamiento de agua dentro del humedal eran desdenables. El balance hídrico empleado adopta la forma siguiente:

$$(\text{lluvia neta (P-E)} + \text{aporte del río (R)} + \underset{\text{entradas}}{GD_{s\&g}} + \underset{\text{salidas}}{GD_{Chalk}}) = (\text{desagüe del río (DE)}) \quad [A3.1]$$

En las condiciones actuales (con extracción de aguas subterráneas del acuífero de yeso), el balance hídrico medio anual es (Ml/d):

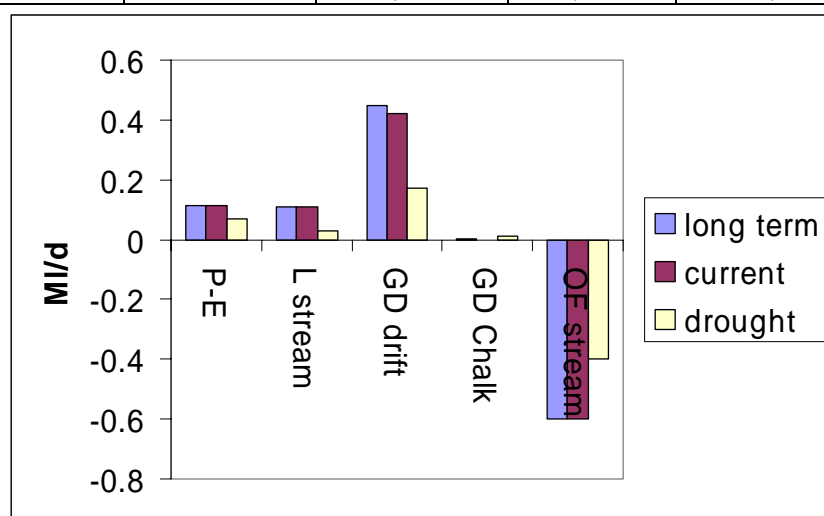
$$(\underset{\text{entradas}}{0,112 + 0,110 + 0,423} + \underset{\text{salidas}}{0,0}) = (0,6) \quad [A3.2]$$

Esto deja un volumen residual de 0,045 Ml/d (cuadro A3.1), que es muy pequeño comparado con el volumen de las entradas y salidas. El volumen residual puede deberse a errores en la estimación de cada componente o a un aumento del almacenamiento de agua dentro del humedal, pero no se dispone de datos para probarlo. El balance hídrico confirmó la suposición de que la descarga de aguas subterráneas desde el acuífero de yeso era despreciable en las actuales condiciones.

Se calcularon también balances hídricos para las condiciones naturales medias a largo plazo y para las sequías (figura A3.1). La descarga de aguas subterráneas desde el acuífero de yeso es el 1% del total de las entradas en condiciones naturales, pero el 4% en las sequías. La lluvia efectiva (P-E) proporciona el 25% de las entradas totales en condiciones de sequía, comparado con sólo un 17% en condiciones naturales medias. Por consiguiente, en los años secos, las aguas subterráneas del acuífero de yeso y la lluvia efectiva son más importantes en el balance hídrico, que cambia en función de las condiciones climáticas. Este mayor conocimiento de la relación entre el humedal y las aguas subterráneas asociadas con él puede servir para concebir un plan de extracción de agua que se ajuste mejor a las necesidades de agua del humedal en condiciones climáticas diferentes.

Cuadro A3.1. Balance hídrico para Sheringham y Beeston Regis Commons, RU

	Mecanismo	Largo plazo	Actual	Sequía
Entradas	P-E	0,112	0,112	0,070
	R río	0,110	0,110	0,030
	GD deriva	0,450	0,423	0,170
	GD yeso	0,003	0	0,010
	total entradas	0,675	0,645	0,280
Salidas	DE río	-0,600	-0,600	-0,400
Residual		0,075	0,045	-0,120



<Leyenda (de izda. a dcha. y de arriba abajo):>

L río – GD deriva – GD yeso – OF río / largo plazo / actual / sequía

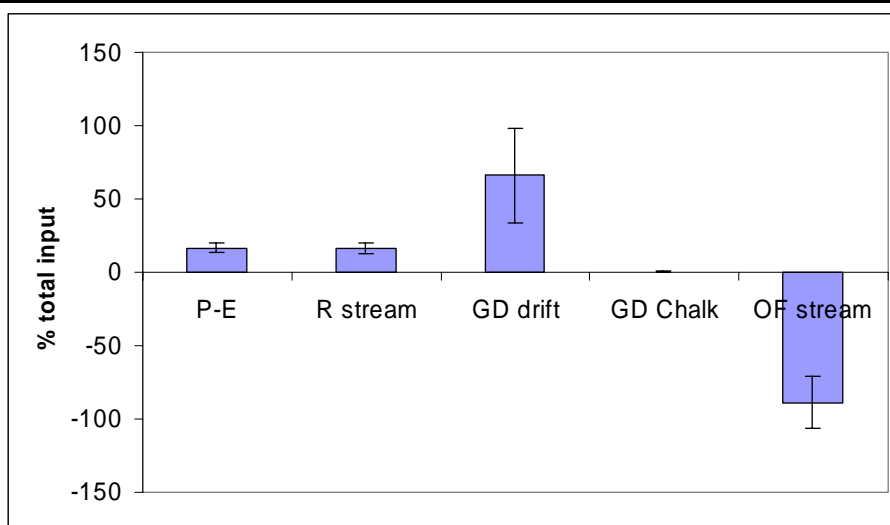
Figura A3.1. Representación gráfica del balance hídrico para Sheringham y Beeston Regis Commons, RU

En el cuadro A3.2 se han añadido estimaciones ficticias del margen de incertidumbre a los datos de Sheringham y Beeston Regis Commons, Reino Unido, para cada mecanismo de transferencia de agua, a fin de explicar cómo pueden alterar el balance hídrico. Las estimaciones superiores e inferiores se calcularon sumando y restando el margen de incertidumbre. Los resultados se muestran gráficamente en la figura A3.2. Esto arroja tres posibles variantes de balance hídrico para el humedal. La incertidumbre global cae dentro del margen de error propio de las estimaciones individuales y, por tanto, se considera satisfactoria.

Es fundamental reconocer que un balance hídrico no puede usarse para probar inequívocamente la existencia y la magnitud exacta de los mecanismos de transferencia de agua. En cambio, el balance hídrico se usa para descartar errores en la comprensión e identificación de lagunas de información. Si las entradas y las salidas no se equilibran, es evidente que el conocimiento de la hidrología del humedal es insuficiente. Si las entradas y las salidas se equilibran, quiere decir que el conocimiento actual es una explicación probable de cómo funciona hidrológicamente el humedal.

Cuadro A3.2. Inclusión de la incertidumbre en los datos del balance hídrico

	Mecanismo	Largo plazo	Incertidumbre	Estimación superior	Estimación inferior
Entradas	P-E	0,112	20%	0,134	0,090
	R río	0,11	25%	0,138	0,083
	GD deriva	0,45	50%	0,675	0,225
	GD yeso	0,003	100%	0,006	0,000
	total entradas	0,675		0,953	0,397
Salidas	DE río	-0,6	20%	-0,720	-0,480
Residual		0,075		0,233	-0,083



<Leyenda (de izquierda a derecha):>
entradas totales – R río – GD deriva – GD yeso – OF río

Figura A3.2. Estimaciones hipotéticas de la incertidumbre añadidas a un balance hídrico