



# El nuevo paradigma del agua azul y verde:

Innovando la planificación y  
gestión de los recursos hídricos

M. Falkenmark  
Stockholm International Water Institute (SIWI).  
E-mail: [malin.falkenmark@siwi.org](mailto:malin.falkenmark@siwi.org)

J. Rockström  
Stockholm Environment Institute (SEI)  
E-mail: [johan.rockstrom@sei.se](mailto:johan.rockstrom@sei.se)

## Agua para la alimentación y el alivio del hambre

La producción de biomasa para uso humano directo —por ejemplo, como alimento y madera— es de lejos la actividad humana que más agua dulce consume en la Tierra. Sin embargo, la política y el desarrollo de los recursos hídricos se concentran en una fracción del desafío del agua para la alimentación, a saber, la agricultura de regadío, que utiliza un estimado de 25% del agua utilizada a nivel mundial en la agricultura, y en el abastecimiento de agua industrial y doméstica, que corresponde a menos de 10% de los requerimientos humanos de agua directos (que consideran agua sólo para la alimentación, el uso doméstico y la industria). La razón de que la producción de biomasa sobrepase en tanta magnitud otros procesos que dependen del agua es que el agua es un elemento clave en el crecimiento de las plantas. Simultáneamente con el proceso de la fotosíntesis, cuando los estomas de las hojas se abren para absorber el dióxido de carbono, grandes cantidades de agua se consumen como flujo de transpiración y se liberan como vapor desde el dosel de la planta. Por otra parte, este flujo productivo de vapor se acompaña de pérdidas de agua por evaporación no productivas (desde el suelo, el agua estancada y el agua interceptada por las superficies del follaje). Juntos, los flujos de vapor como evaporación y transpiración, aquí definidos como flujo de agua verde, constituyen el uso consuntivo total de agua en la producción de biomasa.

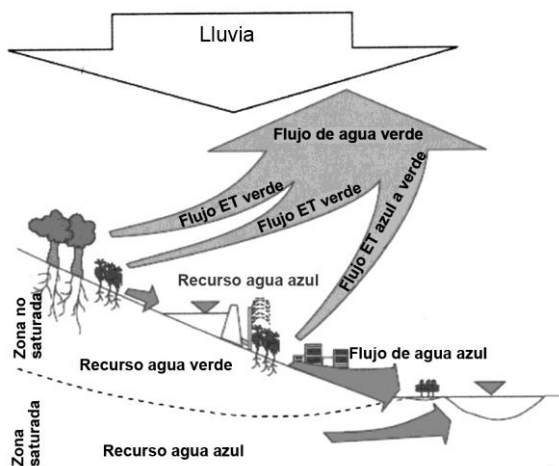
Abordar el objetivo de desarrollo del milenio (ODM) de reducir a la mitad la proporción de personas desnutridas en el mundo para el año 2015, que hoy ascienden a la impactante cifra de 800 millones, es, pues, no sólo un tremendo esfuerzo agrícola, sino también el desafío más grande de los recursos hídricos del mundo. El alivio del hambre requerirá nada menos que una nueva revolución verde durante los próximos 30 años, especialmente en el África subsahariana. Como se afirma en Conway (1997), el desafío es lograr una revolución verde-verde, que, en comparación con la primera revolución verde que sacó a gran parte de Asia de una crisis alimentaria inminente en las décadas de 1960 y 1970, tendrá que basarse en principios de sostenibilidad ambiental. Según se sugiere en Falkenmark y Rockström (2004), hay una tercera dimensión verde en una nueva revolución agrícola, ya que el enfoque tendrá que estar en modernizar la agricultura de secano, lo que implica aumentar el uso de la parte de la lluvia que se infiltra en el suelo y es accesible por las plantas para generar flujo de vapor en apoyo del crecimiento de la biomasa. Esta revolución triplemente verde requerirá enormes cantidades de agua dulce como flujo de vapor que parta desde el suelo, siga a través de las plantas y acabe en la atmósfera. Plantea la cuestión de qué implicará de hecho la erradicación del hambre para la planificación y gestión de los recursos hídricos.

## Dos tipos de agua en la producción de alimentos

La urgente necesidad de centrarse en las inversiones en agua en la agricultura de secano lleva a la conclusión de que las percepciones convencionales sobre los recursos hídricos son incompletas. Este reconocimiento requiere una ampliación de la actual política de agua agrícola, que durante décadas ha estado sesgada hacia el agua para riego.

El enfoque convencional de la planificación y gestión de los recursos hídricos está en el agua líquida, o *agua azul*. Sirvió bastante bien a las necesidades de los ingenieros que se dedicaban a proyectos de infraestructura y abastecimiento de agua. Sin embargo, el agua azul que ha dominado las percepciones sobre el agua en el pasado sólo representa un tercio de los recursos reales de agua dulce, la precipitación pluvial sobre los continentes. La mayor parte del agua de lluvia fluye de vuelta a la atmósfera como flujo de vapor, dominado por el uso consuntivo del agua por la vegetación. Por lo tanto, al analizar la producción de alimentos debemos incorporar una segunda forma de recursos hídricos, el agua de lluvia que se infiltra de modo natural en el suelo y que está camino de regreso a la atmósfera.

La Figura 1 ilustra la nueva conceptualización, distinguiendo entre dos tipos de recursos hídricos: el recurso *agua azul* en acuíferos, lagos y represas, y el recurso *agua verde* como humedad en el suelo; y dos flujos de agua complementarios: el flujo de agua azul en estado líquido a través de ríos y acuíferos, y el flujo de agua verde que regresa como vapor a la atmósfera.



**Figura 1.** Conceptualización de un enfoque verde-azul ampliado de la planificación y gestión de los recursos hídricos. La lluvia, el recurso de agua dulce indiferenciado, se divide en recurso de agua verde como humedad en la zona no saturada y en recurso de agua azul en acuíferos, lagos, humedales y embalses (por ejemplo, represas). Estos recursos generan flujos, como flujo de agua verde proveniente de biomasa terrestre que produce sistemas (cultivos, bosques, praderas y sabanas), y flujo de agua azul en ríos, a través de humedales, y a través del flujo de base de las aguas subterráneas.

La precipitación  $P$  es, en otras palabras, una forma indiferenciada de agua dulce, que puede convertirse en flujo verde o azul dependiendo de si se divide bien en flujo de vapor o bien en recarga de agua subterránea o escurrimiento superficial. El destino de  $P$  se determina en la superficie terrestre y la zona no saturada del suelo. El flujo de agua verde tiene dos componentes: la *parte productiva*, o

transpiración (T), que participa en la producción de biomasa en los ecosistemas terrestres, y la parte *no productiva*, o evaporación (E).

## El alivio del hambre visto a través de una lente de agua dulce

Estimamos que la producción de alimentos a nivel mundial consume (como flujo de agua verde, incluyendo aquí tanto la evaporación como la transpiración, es decir, la evapotranspiración), aproximadamente  $6,800 \text{ km}^3/\text{año}$  en todo el mundo. De esta cantidad,  $1,800 \text{ km}^3/\text{año}$  se consumen a través de la asignación de agua azul (retiros de agua líquida en ríos, lagos y aguas subterráneas) en la producción de cultivos de regadío (a la que los planificadores de agua generalmente se refieren como la totalidad del agua utilizada en la agricultura), mientras que los  $5,000 \text{ km}^3/\text{año}$  restantes es el consumo del recurso agua verde (humedad del suelo) en la agricultura de secano del mundo (practicada en 80% de las tierras agrícolas). En el caso de los países en desarrollo, donde se concentra esencialmente la totalidad del crecimiento y la desnutrición de la población mundial, estimamos que se utilizan  $4,500 \text{ km}^3/\text{año}$  de agua para producir las dietas actuales (SEI 2005).

Para la estimación futura del agua para la alimentación, hemos utilizado la estimación de la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) de una demanda de alimentos adecuada de 3,000 kcal/día, y hemos supuesto que esta se alcanzará en el año 2030 en los países en desarrollo. Si 20%, o 600 kcal, de estos se originan en proteína animal, los requerimientos de agua ascienden a  $1,300 \text{ m}^3/\text{año}$ , asumiendo la productividad de agua actual. Esta cantidad corresponde a 3.6 toneladas de agua por persona por día y es 70 veces más grande que la cantidad tomada como la necesidad básica para el abastecimiento de los hogares.

Sobre la base de análisis del agua y de la dieta a nivel de cada país, hemos llevado a cabo un diagnóstico reciente de los requerimientos de agua globales para erradicar el hambre para 2030 en los países en desarrollo, que equivalen aproximadamente a  $4,200 \text{ km}^3/\text{año}$ . Este total supone casi duplicar el uso consuntivo del agua para la producción de alimentos a partir de los  $4,500 \text{ km}^3/\text{año}$  actuales. Si se cubre sólo por riego, implicaría más que duplicar todos los retiros de agua de ríos y acuíferos hoy y sería absolutamente inaceptable en vista de los daños ya causados por el agotamiento de los ríos y la degradación de los ecosistemas acuáticos.

Por lo tanto, el cumplimiento de los requerimientos de agua indicados debe ser visto como un desafío ambiental importante: ¿De dónde se podría disponer de una cantidad de agua tan enorme?

## Minimizar las pérdidas de agua no productivas

Sabemos que gran parte de la agricultura de hoy en el mundo en desarrollo sufre de grandes pérdidas de agua. Esta afirmación es válida tanto para la agricultura de regadío, donde la eficiencia del uso del agua tiende a ser del orden de sólo 30% (la proporción entre el uso consuntivo del agua por el cultivo de regadío y el agua retirada de la fuente). Del mismo modo, en la agricultura de secano, las pérdidas de agua en el balance hídrico en las explotaciones agrícolas pueden ser muy elevadas, sobre todo en los sistemas agrícolas de bajo rendimiento, que dominan en los países en desarrollo y donde los rendimientos de cereales básicos a menudo ascienden a sólo 1 t/ha. En el África subsahariana, sólo 10-30% de las lluvias estacionales se utilizan como flujo de agua verde productiva, es decir, como transpiración del cultivo ( $T$ ), para cereales tropicales (como maíz, sorgo y mijo), y se pierde hasta 50% como evaporación no productiva ( $E$ ) por intercepción y evaporación del suelo. Volúmenes significativos de lluvia abandonan las explotaciones agrícolas como flujo de agua azul; como escorrentía superficial (hasta 30%), causando degradación del suelo; y como percolación profunda (hasta 25%). A menos que el flujo de la escorrentía se evapore durante su viaje cuesta abajo, genera el recurso agua azul aguas abajo, lo cual, naturalmente, no es una "pérdida" a una escala de sistema más grande.

Sin embargo, sólo una pequeña parte del agua de lluvia se utiliza de manera productiva, sobre todo en los sistemas agrícolas de secano tropicales. Las pérdidas tienden a ser más grandes en la zona semiárida y subhúmeda seca, es decir, en los agroecosistemas de sabana donde se encuentran la mayoría de los países más pobres del mundo. Este resultado es sumamente preocupante y constituye un desafío importante para los planificadores de los recursos hídricos. Los países con mayor incidencia de pobreza y hambre en el mundo también corresponden a los países que enfrentan los mayores desafíos inherentes en cuanto a agua dulce debido al estrés hídrico y la extrema variabilidad espacial y temporal. La oportunidad radica en aprovechar el potencial de un balance hídrico actualmente utilizado de manera ineficaz en las explotaciones agrícolas, lo cual requiere de estrategias innovadoras para manejar los excesos repentinos de agua y los periodos frecuentes de déficit, las llamadas rachas secas.

En la zona de sabana, la agricultura de secano típicamente consume (como flujo de agua verde) entre 2,000 y 3,000 m<sup>3</sup>/t de cereal (o 300 mm/t/ha). Esta baja productividad del agua debe compararse con el consumo promedio mundial de agua en la producción de cereal de entre 1,000 y 1,500 m<sup>3</sup>/t. La razón de esta discrepancia no se explica por las características del cultivo (generalmente cultivos C3 en las regiones templadas, como trigo y cebada, y cultivos C4 en las regiones tropicales, como maíz y sorgo). En verdad es atribuible a los niveles de rendimiento bajos y la demanda evaporativa alta, que en conjunto causan grandes pérdidas por evaporación, lo que lleva a un flujo grande de evapotranspiración pero a una producción baja de biomasa (el flujo  $E$  no productivo es una gran proporción del flujo  $ET$ ).

La gestión integrada del suelo y el agua —particularmente centrada en la gestión de la fertilidad del suelo, la labranza del suelo para mejorar la infiltración de la lluvia y la captación de agua para la mitigación de la racha seca— puede mejorar significativamente los rendimientos y la productividad del agua ( $WP$ ) ( $m^3/t$ ). Como se muestra en Rockström (2003), existe una relación altamente dinámica entre el aumento del rendimiento y la productividad del agua, particularmente en el rango de bajo rendimiento entre 1 y 3 t/ha, donde los rendimientos más altos dan lugar a grandes mejoras en  $WP$ . La razón es el cambio de vapor, en que la evaporación no productiva cambia a transpiración productiva, y una mayor proporción del balance hídrico en las explotaciones agrícolas fluye en realidad como transpiración. En resumen, maximizar la productividad del agua, o la cantidad de cultivo por gota de agua, implica aumentar los rendimientos agrícolas a través de una gestión que maximice la infiltración de la lluvia y minimice las pérdidas  $E$  de agua verde no productiva. En otras palabras, maximizar la fracción de  $P$  que se hace beneficiosa, es decir, flujo de agua verde productiva. Como se muestra en Pretty y Hine (2001), hay amplia evidencia que indica que los rendimientos de los cultivos de secano se pueden duplicar a través de innovaciones en la gestión del suelo, los cultivos y el agua. Nuestra estimación es que la gestión integrada del suelo y el agua puede mejorar la productividad del agua en la zona de sabana semiárida y subhúmeda seca hasta unos  $1,500 m^3/t$ .

## Dónde encontrar el resto

Si tal incremento en la productividad del agua —que corresponde aproximadamente a una duplicación de los niveles de rendimiento de los actuales 2.1 t/ha a 2-3 t/ha— pudiera lograrse, los requerimientos de agua disminuirían en aproximadamente  $1,200 km^3/año$  desde los  $4,200 km^3/año$  anteriormente mencionados como el agua dulce total requerida para aliviar el hambre. Los requerimientos totales de agua para aliviar el hambre para 2030 se reducirían a  $3,000 km^3/año$ , que es una reducción importante, dejando a la vez un volumen muy considerable como no contabilizado.

¿Hasta dónde puede ir el agua azul, es decir, el riego, para cubrir este requerimiento de agua dulce neta restante para aliviar el hambre para 2030? Sabemos que muchos ríos en regiones dependientes del riego están sobreasignados más allá de los requerimientos de los ecosistemas acuáticos (Smakhtin et al. 2004), y las proyecciones de desarrollo futuro del agua para el riego son menores que en el pasado, teniendo en cuenta las preocupaciones políticas, sociales y ambientales que se relacionan con el desarrollo de grandes obras de infraestructura hídrica. Nuestro diagnóstico, siguiendo los supuestos hechos anteriormente por el International Water Management Institute (IWMI) sugiere que el riego podría ampliarse hasta un máximo de 20%, o unos  $500 km^3/año$  a lo más (desde los actuales  $1,400 km^3/año$  a  $1,900 km^3/año$  en los países en desarrollo), dejando  $2,500 km^3/año$  para ser cubiertos por otros tipos de uso de agua verde en la agricultura.

Básicamente, hay sólo dos alternativas restantes a considerar: la captura de más agua de lluvia local en los campos de los agricultores actuales, o expandir la producción de cultivos en los bosques tropicales y praderas, asignando agua ahora consumida para el crecimiento de las plantas en estos ecosistemas terrestres naturales. Si los rendimientos más o menos se duplican en los próximos 25 años, aproximadamente la mitad de los 2,500 km<sup>3</sup>/año restantes provendrían del mayor uso del agua en las tierras de cultivo actuales. Los 1,250 km<sup>3</sup>/año restantes tendrían que provenir de la expansión horizontal de las tierras agrícolas, lo que correspondería aproximadamente a un crecimiento de 30% de las tierras agrícolas hasta 2030.

## Agua para los ecosistemas

Este análisis indica soluciones de compromiso muy grandes entre el agua para los cultivos, para los seres humanos y para los ecosistemas. El aumento del consumo de agua en las tierras de cultivo actuales reduce la disponibilidad de agua azul para los seres humanos y los ecosistemas aguas abajo, y la expansión de las tierras agrícolas causa una pérdida de ecosistemas naturales. Por lo tanto, es necesaria una nueva conceptualización del agua para la alimentación. La agricultura cubre ya cerca de 25% de la superficie de los continentes y ha sido —según la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio— el principal impulsor de años de severa degradación de los servicios ecosistémicos, tanto terrestres como acuáticos, durante los últimos 50 años. Cuando la agricultura consume más agua incluso en las tierras actuales, y, además, continúe expandiéndose (más o menos al mismo ritmo que durante los últimos 50 años) en los ecosistemas naturales, habrá que prestar cuidadosa atención a los ecosistemas y sus relaciones hídricas: los ecosistemas acuáticos y su dependencia del agua azul y los ecosistemas terrestres con su dependencia del agua verde.

Los *ecosistemas terrestres* están interactuando directamente con la producción de escorrentía: cuanto mayor es la proporción de lluvia infiltrada consumida por plantas y árboles, menos queda para generar escorrentía o recargar las aguas subterráneas. Se presta, por ejemplo, considerable interés a las formas en que la silvicultura interactúa con la formación de escorrentía: si las plantaciones forestales aumentan o disminuyen la disponibilidad de agua azul, un debate al que a menudo se hace referencia en situaciones tanto de graves inundaciones como de fenómenos de desertificación (Calder, 2004). Los árboles interactúan con la división del agua de lluvia de dos maneras principales: al influir en la permeabilidad del suelo y por lo tanto en la infiltración de la lluvia, y al influir en la absorción radicular de agua verde en la zona radicular.

Los *ecosistemas acuáticos* viven en hábitats de agua azul y sufren cuando estos cambian, ya sea porque el flujo fluvial se está agotando o porque se altera su estacionalidad, por ejemplo, por la desaparición de los flujos de inundación o por el deterioro de la calidad del agua. Se han hecho importantes avances para definir

los requerimientos de flujo ambiental de los ecosistemas acuáticos en el porcentaje del flujo promedio que tiene que seguir estando sin asignar y de los eventos de flujos de avenidas necesarios para el funcionamiento ecológico adecuado (King et al. 2003).

## Desafío para los planificadores de agua del mañana

El desafío de los recursos hídricos del futuro es más complejo que lo descrito anteriormente; no sólo es una cuestión de asignación del agua entre el riego, la industria y los municipios, sino que implica decisiones difíciles para equilibrar el agua verde y azul para la alimentación, la naturaleza y la sociedad. Cambiará el papel de los planificadores y administradores de los recursos hídricos. La planificación y gestión de los recursos hídricos tendrá que incorporar actividades de uso de la tierra que consumen agua verde y su interacción con el agua azul, que genera escorrentía superficial y recarga de las aguas subterráneas.

La última tarea es gestionar la división de la lluvia para los seres humanos y los ecosistemas a través de escalas espaciales y temporales. La lluvia, no la escorrentía estable, se convierte en el recurso de agua dulce. Un nuevo componente clave de la gobernanza del agua será abastecer de agua para las actividades humanas prestando atención al mismo tiempo a la salvaguardia del agua de los ecosistemas vitales, tanto acuáticos como terrestres, no sólo como un medio de preservar las funciones ecológicas, sino como una estrategia para aumentar la resiliencia ante eventos extremos tales como inundaciones y sequías.

La importancia de las inversiones para modernizar la agricultura de secano, particularmente en términos de productividad del agua, plantea la necesidad de un cambio conceptual en nuestra visión del desarrollo del agua en la agricultura. La dicotomía convencional entre agricultura de regadío y agricultura de secano no es adecuada al abordar el desafío del agua para alimentar a la humanidad en el futuro. La agricultura de regadío es, de hecho, casi siempre apoyada por un poco de lluvia infiltrada. Las estrategias clave para modernizar la agricultura de secano implican inversiones en riego complementario para sortear las rachas secas. En otras palabras, ambos tipos de producción de cultivos implican tanto el agua verde como el agua azul para satisfacer los requerimientos de agua para los cultivos, aunque en diferentes proporciones. Si el foco en los recursos hídricos se desplaza de la escorrentía a la gestión del agua de lluvia, la justificación de una división sectorial entre agricultura de riego y de secano se desvanece.

Se requiere una redefinición de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), tanto en el foco (percibido en general en términos de asignación de recursos de agua azul) como en la escala (percibida en general en términos de gestión de los recursos hídricos a escala de cuenca). El foco debe redirigirse desde una perspectiva de agua azul hacia considerar el balance hídrico completo como “gestionable”, incluyendo el flujo de vapor, o flujo de agua verde. Debido a que la agricultura de secano tendrá que seguir soportando el mayor peso de la



generación de alimentos para la creciente población de los países en desarrollo, la escala del foco debe centrarse de manera más preponderante en la zona de captación más pequeña o escala de cuenca, que corresponde mejor a la escala pertinente para el agricultor.

A menudo se afirma que la crisis del agua dulce puede resolverse a través del comercio de agua virtual, es decir, los alimentos pueden producirse en regiones con exceso de agua dulce y exportarse a regiones con escasez de agua, lo cual ya ocurre, principalmente en países áridos (por ejemplo, el Medio Oriente). Ciertamente, el comercio de alimentos seguirá desempeñando un papel importante en la satisfacción de la creciente demanda de alimentos. Sin embargo, nuestro análisis se basa en la situación actual, en que una parte muy pequeña de la producción mundial de alimentos (5-10%) se comercia en el mercado internacional, y en el bajo poder adquisitivo entre las comunidades de los países que enfrentan el mayor crecimiento de la demanda alimentaria.

Un avance conceptual necesario de la GIRH es incorporar el uso de la tierra, es decir, enfatizar la gestión integrada de la *tierra* y los recursos hídricos (GITRH). La decisión sobre el uso de la tierra es también una decisión sobre el agua. Actualmente, los planes de GIRH se implementan a nivel de cada país, en consonancia con el plan de implementación de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (CMDS) celebrada en Johannesburgo en 2002. Es urgente que la "T" en GITRH se incorpore en la planificación estratégica del agua para los medios de subsistencia y la sostenibilidad, ya que la evidencia muestra claramente que el legado de agua dulce del pasado es, sin duda, insuficiente para posibilitarnos enfrentar los desafíos que tenemos por delante.

## Referencias

- Calder, I. R. (2004). "Forests and water—Closing the gap between public and science perceptions." *Water Sci. Technol.*, 49(7), 39–53.
- Conway, G. (1997). *The doubly green revolution: Food for all in the twenty-first century*, Penguin Books, Nueva York.
- Falkenmark, M., y Rockström, J. (2004). *Balancing water for man and nature: The new approach to ecohydrology*, EarthScan, Reino Unido.
- King, J. M., Brown, C. A., y Sabet, H. (2003). "A scenario-based holistic approach to environmental water flow assessments for rivers." *Rivers Research and Application*, 19(5–6), 619–639.
- Pretty, J., y Hine, R. (2001). "Reducing food poverty with sustainable agriculture: A summary of new evidence." *Final Rep. from the "Safe World" Research Project*, Univ. of Essex, Reino Unido, 133.
- Rockström, J. (2003). "Water for food and nature in the tropics: Vapour shift in rainfed agriculture." *Phil. Trans. R. Soc. Land. B*, 358, 1997–2009.
- Stockholm Environment Institute (SEI). (2005). *Sustainable pathways to attain the Millennium Development Goals—Assessing the key role of water, energy and sanitation*, Stockholm Environment Institute, Estocolmo, Suecia, 96.
- Smakhtin, V., Revenga, C., y Döll, P. (2004). "Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments." *Comprehensive Assessment Research Rep. 2*, Comprehensive Assessment Secretariat, Colombo, Sri Lanka, 22.