

ANTOLOGÍA DE HUELLA HÍDRICA

Compilador: **Joaquín** Flores Ramírez



ANTOLOGÍA DE
HUELLA HÍDRICA

COMPILADOR: JOAQUÍN FLORES RAMÍREZ

DISEÑO:

Antología de Huella Hídrica

DISEÑO DE PORTADA:

David A. García Ruiz

AÑO:

2014

CONTENIDO

Introducción	5
Para iniciar, un texto para reflexionar:	
¿Habrá agua para alimentar al mundo?	7
1. El agua en el mundo y en México.....	18
1.1 ¿Qué es el agua?	18
1.2 El agua en la tierra	20
1.3 Situación del agua en México.....	26
1.4 Usos del agua.....	69
2. Huella hídrica	82
2.1 Antecedentes, características y componentes	82
2.2 Huella hídrica en el mundo	88
2.3 Huella hídrica en México	102
3. Metodologías	108
Bibliografía y referencias electrónicas	137

INTRODUCCIÓN

Esta antología presenta una selección de textos de varios autores que se relacionan con el tema *Huella Hídrica (HH)*. Son tres los temas que se desarrollan: El agua en el mundo y en México, Huella hídrica y Metodologías del cálculo de la HH.

Antes de iniciar el abordaje de cada uno de los temas, se inicia con una lectura que lleva por título “¿Habrà agua para alimentar al mundo?”, con la cual se pretende que el lector reflexione sobre la escasez física del agua, sobre el subdesarrollo institucional, la soberanía alimentaria, la dependencia que tiene la agricultura sobre el regadío y las ventajas que tiene la agricultura de temporal. Todo con el propósito principal de sensibilizarnos sobre la importancia que tiene el agua en la producción de los alimentos, lo cual es esencial para el desarrollo de cualquier nación.

El primer tema, El agua en el mundo y en México, desarrolla cuatro subtemas, ¿Qué es el agua, El agua en la tierra, Situación del agua en México y Usos del agua. Se pretende que el lector parta de lo general para llegar a lo particular, conocer e identificar las características del agua, pero también saber cuál es la situación que guarda en la tierra, las condiciones que tiene en nuestro México y saber sobre los usos que se le dan. De esta manera obtendría una visión general sobre este recurso que es tan vital para la evolución de los seres humanos y para la conservación del medio ambiente.

El segundo tema, desarrolla el tema principal de esta antología Huella hídrica y en tres subtemas trata sobre las diferencias entre HH y agua virtual, la clasificación del agua en tres tipos de colores y el sentido de la HH. Cómo fluye el agua en el mundo, su consumo al año, la HH externa, las exportaciones e importaciones. Destaca la HH de producción en México en los diferentes sectores económicos y sus usos por color.

El último tema presenta una Metodología del cálculo de la HH, oferta demanda, análisis coste-beneficio y precios de esta en España, asimismo una nota metodológica sobre las principales fórmulas utilizadas para el cálculo de la HH.

Esta antología se utiliza únicamente con fines de capacitación, el propósito principal es que el participante obtenga una visión global en torno al concepto de huella hídrica.

Para iniciar, un texto para reflexionar

Fuente: ¿Habr  agua para alimentar al mundo?, Joaquín Olona, España, iagua, [rev. 18 de diciembre, 2014], Disponible en <<http://www.iagua.es/blogs/joaquin-olona/habra-agua-alimentar-mundo>>

 Habr  agua para alimentar al mundo?

El paradigma de la escasez

Resulta paradójico que disponiendo el planeta de un volumen ingente de agua (1.400 millones km³) los problemas de acceso a este recurso básico, que limita el desarrollo y bienestar de la población mundial, **sigan enfocándose en términos de escasez física**. Un enfoque que contempla el crecimiento del consumo¹ como una amenaza, agravada por los efectos del cambio global² y la creciente demanda de usos de carácter ambiental.

No es la escasez física del agua sino el subdesarrollo institucional, particularmente en sus interrelaciones con la energía, la contaminación y la inversión, lo que más debería preocupar. Aun con la tecnología actual, la disponibilidad de energía suficientemente barata resolvería el problema del agua dando acceso a fuentes que, como el mar, son prácticamente inagotables frente a unos usos que tan sólo modifican el estado físico, deterioran la calidad (contaminación) y reducen la energía potencial de un recurso que, desde esta perspectiva, sería renovable prácticamente en su totalidad³.

La competencia por el agua se intensificará en muchas partes del mundo, particularmente en las zonas  ridas

En 1973 el cártel del petróleo, con el apoyo del Club de Roma y otros acreditados visionarios, **convencieron al mundo de que los combustibles fósiles tenían sus días contados**. De hecho, ya deberían haberse agotado. Sin embargo, las reservas conocidas de petróleo y gas natural no han hecho más que aumentar⁴. Aun así, y sabiendo que existen fuentes alternativas prácticamente inagotables⁵, la institucionalidad vigente sigue operando para mantener el paradigma de la escasez de la energía. ¿Se pretende lo mismo para el agua?

No obstante, siendo improbables los cambios institucionales deseables durante las próximas décadas, **la competencia por el agua se intensificará en muchas partes del mundo, particularmente en las zonas áridas**⁶. Ante esta situación, y teniendo en cuenta que sin agua no hay alimentos⁷ cabe preguntarse si habrá suficiente agua para alimentar al mundo. Alexandratos y Bruinsma (2012) aseguran que sí la habrá pero advierten que “el diablo está en los detalles”.

La restricción del regadío

La agroalimentación tampoco es ajena a la estrategia de la escasez, que resulta esencial para que los negocios prosperen. Pero **la inaccesibilidad a los alimentos mata a millones de personas**. Sin negar la inequidad e injusticia alimentaria, ni tampoco el subdesarrollo institucional del que también adolece el complejo agroalimentario mundial, la producción actual⁸ no cubre las exigencias nutritivas de una vida saludable para toda la población. La FAO viene insistiendo en la necesidad de **intensificar el ritmo de crecimiento de la oferta alimentaria** para hacer frente a la expansión demográfica.

El regadío es una de las principales herramientas productivas. Ocupando el 20% de la superficie cultivada actualmente concentra el 40% de la producción agrícola mundial. **El 60% de la producción de cereales de los países en vías de desarrollo procede del regadío** (Bruinsma, 2009). Las zonas áridas, donde sin regadío la agricultura es inviable, representan el 40% de la superficie terrestre y concentran el 35% de la población mundial. Sin embargo, el regadío está mal visto, tiende a

relacionarse con el uso excesivo de agua y hay quienes incluso reclaman que su asignación actual de agua le sea reducida.

La dependencia de la agricultura del regadío ha sido una preocupación creciente a medida que se reclama más agua para usos no agrícolas.

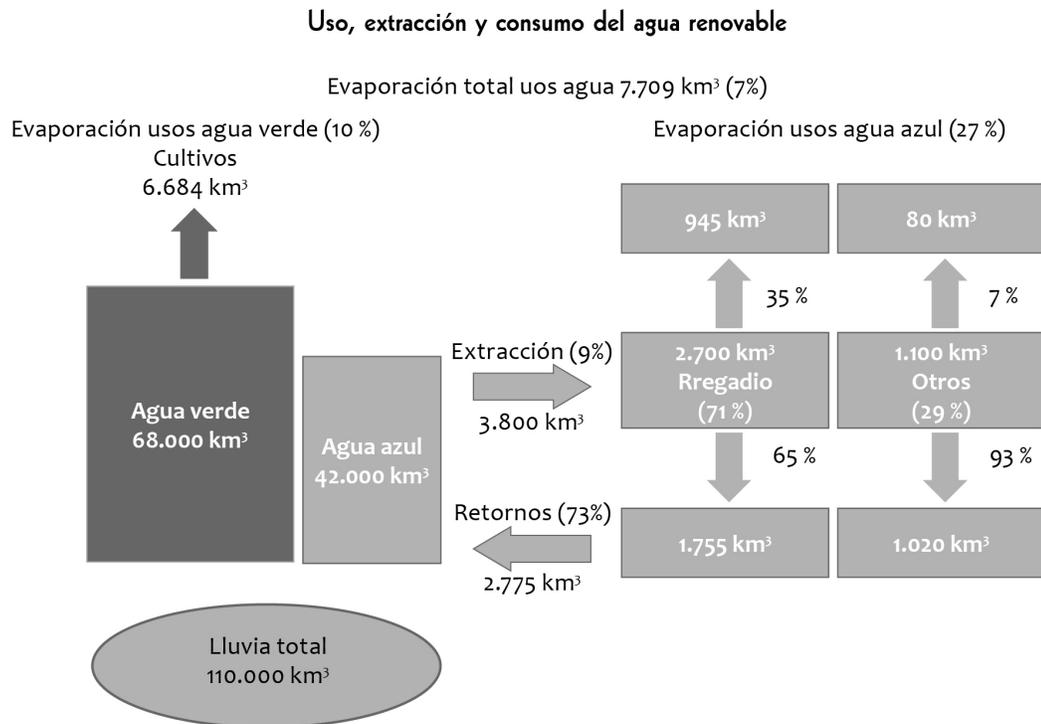
El hecho de que **el 71% de la extracción mundial de agua dulce (azul) se destine al riego conduce a la idea dominante de que el regadío es el principal consumidor de agua, lo que no es cierto.** De los 7.629 km³ de agua que en total evapora la agricultura mundial tan sólo el 12 % corresponde al regadío (945 km³). El 88 % restante del agua evaporada es imputable al secano (6.684 km³) que, ocupando el 80% de la superficie cultivada, sólo aporta el 40% del producto agrícola mundial. Así, el regadío no sólo consume mucha menos agua que el secano, tanto en términos absolutos como relativos⁹, sino que la utiliza de modo más eficiente, generando 4,71 veces más producción por unidad de volumen evaporada.

La dependencia de la agricultura del regadío ha sido **una preocupación creciente a medida que se reclama más agua para usos no agrícolas**, lo que plantea serias amenazas para la alimentación (Strzepek y Boehlert , 2010). Cuando se enfrenta la escasez de agua, la agricultura de regadío suele ser el primer candidato para sufrir restricciones (Rosegrant y Ringler, 2000) lo que no siempre obedece a razones humanitarias, sino también a otras circunstancias más discutibles. Por ejemplo al hecho de que los regantes paguen menos por el agua que los usos residenciales, industriales y comerciales (Cornish y Perry, 2003) o, también, a que la atención de las exigencias ambientalistas, con independencia de su contribución real al bienestar colectivo, suele aportar mayor rentabilidad electoral que las agrícolas.

Liu, J. et al. (2014) han estimado que el índice de Confiabilidad de Suministro de Agua de Riego¹⁰ (IWSR, por sus siglas en inglés) cae de 0,77 en 2000 a 0,69 en 2030, con fuertes reducciones en Asia oriental y meridional. Los cambios regionales van desde -16,3% a +2,4%. Bajo un escenario más sostenible el índice IWSR mundial sólo se reduce a 0,75 en 2030, con descensos mucho menores en las

regiones de Asia y una gama de cambios regionales también más estrecha, desde -5,3% a +4,7%¹¹.

La disponibilidad de riego se mantendrá prácticamente sin cambios en Canadá y Japón, y aumentará ligeramente en los EE.UU., la UE, América Central y Oceanía debido a las inversiones en infraestructuras de riego.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Hoekstra & Mekonnen (2012) y FAOSTAT.

Impacto de la restricción del regadío sobre el comercio internacional y la seguridad alimentaria.

Falkenmark et al. (2009) sostienen que **la escasez de agua en algunos países podría compensarse con las importaciones de alimentos de los países ricos en agua.** Sobre la base de la “huella hídrica” de la producción (Hoekstra y Chapagain, 2007; Fader et al, 2011; Hoekstra y Mekonnen, 2012; Hoff et al, 2013) se propone el comercio de agua virtual como un vehículo para ahorrar agua a escala global, haciendo frente a los déficit locales (Konar et al, 2013; Dalin et al., 2012. ; Lenzen et al., 2013).

Rosegrant et al. (2009) y de Fraiture y Wichelns (2010) señalan que **las limitaciones en el uso del agua para riego promueven la inversión en infraestructuras, tecnologías y mejora de cultivos** lo que unido a políticas innovadoras puede aumentar la eficiencia del uso del agua agrícola y no agrícola, redundando a su vez en una mayor disponibilidad para la alimentación.

Liu, J. et al. (2014) han analizado los impactos de las futuras restricciones de riego previsible sobre el comercio internacional. Las mayores reducciones de producción agrícola se predicen para China, India y la región MENA¹², que teniendo una gran dependencia del regadío, afrontan un estrés significativo y creciente de riego. Pero menos riego no siempre significa que la producción se reduzca. **Así en África Subsahariana y Rusia se prevé un aumento de la producción agrícola, a pesar de aumentar la insatisfacción de la demanda de riego.** La razón es que el regadío sólo proporciona el 14,3 y el 5,5% de la producción agrícola total respectivamente. A la vista de precios más altos, estas regiones expanden la producción de secano y por lo tanto aumentan la producción global. Pero a escala global, las grandes pérdidas de producción en los países de Asia y la región MENA son mayores que las ganancias en otros lugares, lo que lleva a una reducción de la producción mundial de cultivos, ganado y alimentos procesados.

La escasez de agua en algunos países podría compensarse con las importaciones de alimentos de los países ricos en agua

Con los insumos suficientes para permitir que la producción se lleve a cabo a precios competitivos, las regiones ricas en agua tienden a producir más, tanto en regadío como en secano, y no sólo para sustituir las importaciones sino también para ampliar sus exportaciones. Por el contrario, las regiones con escasez de agua tienden a reducir el regadío, ampliando su producción de secano siempre y cuando las precipitaciones sean suficientes. Pero como el secano es menos productivo que el regadío, hacen falta más tierras. Así Liu, J. et al. (2014) predicen la puesta en cultivo de 7,61 millones nuevas hectáreas, actualmente ocupadas por bosques y pastos, fundamentalmente en África subsahariana, India y la región MENA.

La reducción del regadío eleva el coste de la producción agrícola y, como consecuencia, **los precios de las materias primas nacionales**. Así Liu, J. et al. (2014) también predicen la subida de los precios en casi todas partes del mundo, pero mucho más en las regiones con mayores restricciones para el riego. Para estas será más atractivo abastecerse de los mercados internacionales y tenderán a reducir sus exportaciones lo que se traducirá en el deterioro de sus balanzas comerciales agroalimentarias así como en el aumento de su dependencia externa con la consiguiente reducción de sus niveles de soberanía alimentaria. Todo ello hará aumentar el volumen del comercio mundial agroalimentario así como el comercio de agua virtual lográndose, muy probablemente, un ahorro global de agua.

Conclusiones

Si no se remedia, la restricción del uso agrario del agua y del regadío dominará previsiblemente el escenario mundial durante las próximas décadas y derivará los siguientes efectos:

- Reducción de la producción mundial de alimentos y elevación de los precios.
- Roturación de bosques y pastos en África y Asia para la puesta en producción de nuevas tierras de cultivo en secano.
- Deterioro de las balanzas comerciales y reducción de la soberanía alimentaria en muchas de las regiones más pobladas del mundo.
- Aumento del volumen del comercio mundial alimentario y del comercio virtual de agua logrando, eso sí, un ahorro global de agua.

¿Ahorrar agua es la única y mejor opción? ¿Es lo más conveniente para el bienestar global? ¿Es admisible seguir rechazando las políticas de oferta confiando todo a la gestión de la demanda? ¿Es razonable seguir poniendo trabas al regadío? ¿Somos conscientes de que la negación del agua a la agricultura dificulta la alimentación de los más pobres?

¹ La humanidad seguirá amentando su demanda de agua, que se incrementará un 40% hasta 2030 respecto de las necesidades actuales (Addams, et al., 2009). El consumo actual, medido en términos de evaporación es de 7.709 km³ (Hoekstra&Mekonnen, 2012).

² Se llama cambio global al conjunto de cambios ambientales que se derivan de las actividades humanas sobre el planeta, con especial referencia a la alteración de los procesos que determinan el funcionamiento de la Tierra como un sistema.

³ Ahora mismo sólo se considera renovable la fracción correspondiente a la lluvia que cae sobre la superficie terrestre que, como se indica más adelante, representa un volumen de 110.000 km³.

⁴ Sólo entre 2000 y 2009 las reservas reconocidas de gas aumentaron un 50% y las recientes investigaciones sobre los hidratos de metano existentes en los fondos marinos y en el permafrost podrían duplicar las reservas actualmente reconocidas.

⁵ Por ejemplo, la energía generada por el Sol en un segundo equivale a más de 650.000 veces todo el consumo mundial de 2010

⁶ Por aridez se entiende la situación de permanente de escasez de agua en el suelo.

⁷ La fijación fotosintética del CO₂ y su conversión en carbohidratos exige la evaporación de una elevada cantidad de agua (466 litros de agua/Kg biomasa producida; 340 litros de agua/Kg CO₂ fijado). La cantidad evaporada, que es el consumo neto de agua, depende esencialmente del clima, siendo tanto mayor cuanto mayor es la aridez. Así, la huella hídrica atribuida por Mekonnen&Hoekstra (2010). al trigo en Francia (500 m³/Tm) es significativamente menor que la de España (1.500 m³/Tm) ó la de Estados Unidos (2.000 m³/tm).

⁸ Equivalente a 1 kg de cereal por habitante y día.

⁹ El regadío consume (evapora) casi la mitad de agua por unidad de superficie (3.030 m³/ha) que el secano (5.470 m³/ha).

¹⁰ El ISWR se define como la proporción realmente cubierta de la demanda potencial de riego.

¹¹ El impacto del cambio climático no está incluido en estas proyecciones debido, según los autores, al alto grado de incertidumbre en las proyecciones de precipitación así como por el hecho de que varios estudios han demostrado que los efectos de los cambios en la población sobre los recursos hídricos son mucho más importantes que los cambios en la disponibilidad de agua como resultado del cambio climático (Kummu et al., 2013 y Vörösmarty et al., 2000).

¹² La región MENA está integrada por Asia meridional (excluida la India), el Medio Oriente y el Norte de África.

REFERENCIAS

- Addams, L., Boccaletti, G., Kerlin, M., Stuchtey, M., 2009. Charting Our Water Future: Economic Frameworks to Inform Decision-making. McKinsey & Company, New York, USA. Retrieved from http://www.2030wrg.org/wp-content/uploads/2012/06/Charting_Our_Water_Future_Final.pdf
- Alexandratos, N., Bruinsma, J., 2012. World Agriculture Towards 2030/2050 (The 2012 Revision). ESA Working paper No. 12-03 FAO, Rome. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/templates/esa/Global_perspectives/world_ag...
- Anderson, K., Martin, W., 2009. Chapter 9: China and Southeast Asia. In: Distortions to Agricultural Incentives: A Global Perspective 1955–2007. World Bank Publications, , pp. 359–388.
- Bruinsma, J., 2009. The Resource Outlook to 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/ak971e/ak971e00.pdf>
- Cornish, G., Perry, C.J., 2003. Water Charging in Irrigated Agriculture: Lessons from the Field. Report OD 150 FAO.
- Dalin, C., Konar, M., Hanasaki, N., Rinaldo, A., Rodriguez-Iturbe, I., 2012. Evolution of the global virtual water trade network. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 109 (16) 5989–5994, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1203176109>.
- De Fraiture, C., Wichelns, D., 2010. Satisfying future water demands for agriculture. Agric. WaterManage. 97 (4) 502–511, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.008>.
- Falkenmark, M., Rockström, J., Karlberg, L., 2009. Present and future water requirements for feeding humanity. Food Security 1 (1) 59–69, <http://dx.doi.org/10.1007/s12571-008-0003-x>.

Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M., 2012. The water footprint of humanity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109 (9) 3232–3237, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1109936109>.

Jing Liu, Thomas W. Hertel, FarzadTaheripour, Tingju Zhu, Claudia Ringler, 2014. International trade buffers the impact of future irrigation shortfalls. *Global Environmental Change* 29 (2014) 22–31 <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.07.010>

Konar, M., Hussein, Z., Hanasaki, N., Mauzerall, D.L., Rodriguez-Iturbe, I., 2013. Virtual water trade flows and savings under climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 10 (1) 67–101, <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-10-67-2013>.

Kummu, M., Gerten, D., Heinke, J., Konzmann, M., Varis, O., 2013. Climate-driven interannual variability of water scarcity in food production: a global analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 10 (6) 6931–6962, <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-10-6931-2013>.

Lenzen, M., Moran, D., Bhaduri, A., Kanemoto, K., Bekchanov, M., Geschke, A., Foran, B., 2013. International trade of scarce water. *Ecol. Econ.* 94, 78–85, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.018>.

Rosegrant, M.W., Ringler, C., 2000. Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture. *WaterPolicy* 1 (6) 567–586, [http://dx.doi.org/10.1016/S1366-7017\(99\)00018-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1366-7017(99)00018-5).

Vorosmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R.B., 2000. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science* 289 (5477) 284–288, <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5477.284>.

CONCEPTOS

Agricultura de secano: La agricultura de secano es aquella en la que el ser humano no contribuye con agua, sino que utiliza únicamente la que proviene de la lluvia. Las aceitunas provenientes de los olivos de secano tienen mayor rendimiento que las de regadío, ya que éstas no poseen tanta cantidad de agua y, por lo tanto, su porcentaje de aceite es mayor. En el hemisferio norte, se conoce como agricultura de temporal y se realiza de abril a septiembre. En Chile, se conoce como agricultura de rulo, http://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura_de_secano.

El autor: Joaquín Olona, Ingeniero Agrónomo. Director de QUASAR CONSULTORES y de INESA. Decano del Colegio de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco.

1. EL AGUA EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

1.1. ¿QUÉ ES EL AGUA?

Fuente: *Agua*, Wikipedia La enciclopedia libre, [rev. 18 de diciembre, 2014], Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Agua>

El **agua** (del latín *aqua*) es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El término agua generalmente se refiere a la sustancia en su estado líquido, aunque la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo, y en su forma gaseosa denominada vapor. El agua cubre el 71 % de la superficie de la corteza terrestre.² Se localiza principalmente en los océanos, donde se concentra el 96,5 % del agua total, los glaciares y casquetes polares poseen el 1,74 %, los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1,72 % y el restante 0,04 % se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos.³ El agua es un elemento común del sistema solar, hecho confirmado en descubrimientos recientes. Puede encontrarse, principalmente, en forma de hielo; de hecho, es el material base de los cometas y el vapor que compone sus colas.

Desde el punto de vista físico, el agua circula constantemente en un ciclo de evaporación o transpiración (evapotranspiración), precipitación y desplazamiento hacia el mar. Los vientos transportan tanto vapor de agua como el que se vierte en los mares mediante su curso sobre la tierra, en una cantidad aproximada de 45,000 km³ al año. En tierra firme, la evaporación y transpiración contribuyen con 74,000 km³ anuales a causar precipitaciones de 119,000 km³ cada año.⁴

Se estima que aproximadamente el 70 % del agua dulce se destina a la agricultura.⁵ El agua en la industria absorbe una media del 20 % del consumo mundial, empleándose en tareas de refrigeración, transporte y como disolvente de una gran variedad de sustancias químicas. El consumo doméstico absorbe el 10 % restante.⁶

El agua es esencial para la mayoría de las formas de vida conocidas por el hombre, incluida la humana. El acceso al agua potable se ha incrementado durante las últimas décadas en la superficie terrestre.^{7 8} Sin embargo, estudios de la FAO estiman que uno de cada cinco países en vías de desarrollo tendrá problemas de escasez de agua antes de 2030; en esos países es vital un menor gasto de agua en la agricultura modernizando los sistemas de riego.⁶

REFERENCIAS

1. Kofi A. Annan, op. cit., prefacio V
2. «CIA- The world factbook». Central Intelligence Agency. Consultado el 20 de diciembre de 2008.
3. «Earth's water distribution». U.S. Geological Survey. Consultado el 17 de mayo de 2007.
4. «WORLD WATER RESOURCES AT THE BEGINNING OF THE 21ST CENTURY». Unesco. Consultado el 30 de abril de 2009.
5. Baroni, L.; Cenci, L.; Tettamanti, M.; Berati, M. (2007). «Evaluating the environmental impact of various dietary patterns combined with different food production systems». *European Journal of Clinical Nutrition* 61: 279–286. doi:10.1038/sj.ejcn.1602522.
6. «No hay crisis mundial de agua, pero muchos países en vías de desarrollo tendrán que hacer frente a la escasez de recursos hídricos». FAO. Consultado el 30 de abril de 2009.

1.2. EL AGUA EN LA TIERRA

Fuente: Agua, Wikipedia La enciclopedia libre, [rev. 18 de diciembre, 2014].
Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Agua>

El agua es fundamental para todas las formas de vida conocidas. El hombre posee del 65 % al 75 % de su peso en agua y el porcentaje es menor a medida que la persona crece,³⁴ en y algunos animales supera el 99 %. Los recursos naturales se han vuelto escasos con la creciente población mundial y su disposición en varias regiones habitadas es la preocupación de muchas organizaciones gubernamentales. Según la ONU, actualmente 80 países del mundo sufren debido a la falta de agua. En la China, donde se concentra 1/5 de la población mundial y menos de 1/10 del agua del planeta Tierra, se han secado el 35 % de los pozos.³⁵

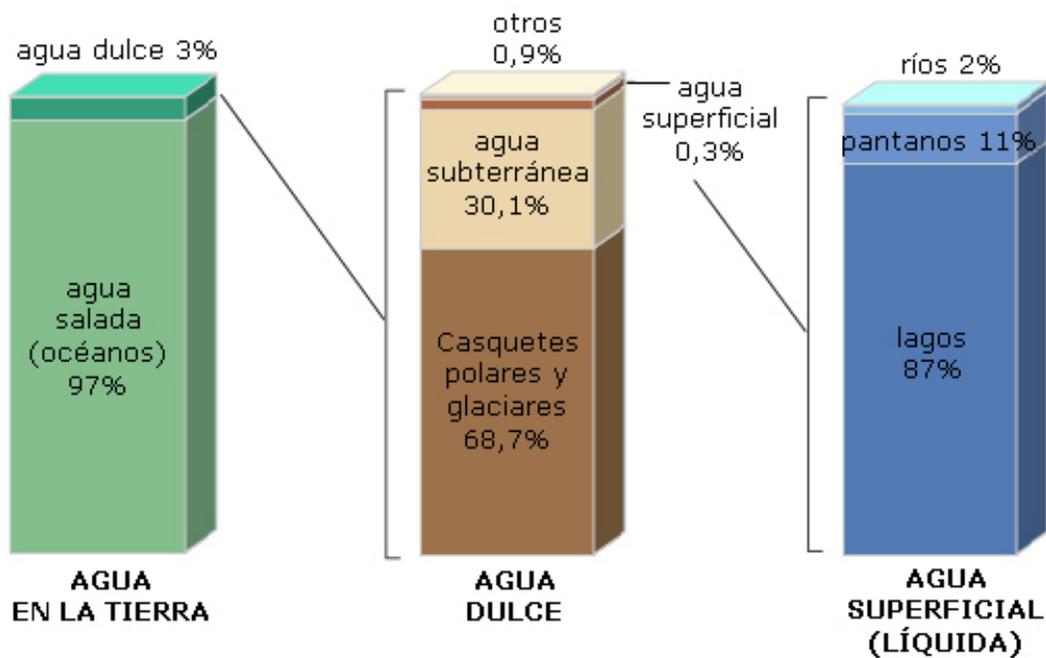
ORIGEN DEL AGUA TERRESTRE

Durante la formación de la Tierra, la energía liberada por el choque de los planetesimales, y su posterior contracción por efecto del incremento de la fuerza gravitatoria, provocó el calentamiento y fusión de los materiales del joven planeta. Este proceso de acreción y diferenciación hizo que los diferentes elementos químicos se reestructurasen en función de su densidad. El resultado fue la desgasificación del magma y la liberación de una enorme cantidad de elementos volátiles a las zonas más externas del planeta, que originaron la protoatmósfera terrestre. Los elementos más ligeros, como el hidrógeno molecular, escaparon de regreso al espacio exterior. Sin embargo, otros gases más pesados fueron retenidos por la atracción gravitatoria. Entre ellos se encontraba el vapor de agua. Cuando la temperatura terrestre disminuyó lo suficiente, el vapor de agua que es un gas menos volátil que el CO₂ o el N₂ comenzó a condensarse. De este modo, las cuencas comenzaron a llenarse con un agua ácida y caliente (entre 30 °C y 60 °C).³⁶ Esta agua ácida era un eficaz disolvente que comenzó a arrancar iones solubles de las rocas de la superficie, y poco a poco comenzó a aumentar su salinidad. El volumen del agua liberada a la atmósfera por este proceso y que precipitó a la superficie fue

aproximadamente de $1,37 \times 10^9 \text{ km}^3$, si bien hay científicos que sostienen que parte del agua del planeta proviene del choque de cometas contra la prototierra en las fases finales del proceso de acreción.³⁶ En este sentido hay cálculos que parecen indicar que si únicamente el 10 % de los cuerpos que chocaron contra la Tierra durante el proceso de acreción final hubiesen sido cometas, toda el agua planetaria podría ser de origen cometario, aunque estas ideas son especulativas y objeto de debate entre los especialistas.³⁶

Hay teorías que sugieren que el agua por ser sustancia universal está en la Tierra desde que el planeta se estaba formando, durante el disco protoplanetario pudieron existir grandes cantidades de agua en ese espacio que fue arrastrada por los cometas que originaron la Tierra. Esa teoría tomó fuerza después de que científicos estadounidenses hallaran un gigantesco océano incrustado en rocas a 600 kilómetros de profundidad,³⁷ hasta tres veces el volumen de los mares superficiales,³⁸ pero debido a la presión y la temperatura no es precisamente un acuífero tal como conocemos si no un mineral.³⁹

Distribución actual del agua en la Tierra



Representación gráfica de la distribución de agua terrestre. ³



Los océanos cubren el 71% de la superficie terrestre: su agua salada supone el 96,5% del agua del planeta.



El 70% del agua dulce de la Tierra se encuentra en forma sólida (Glaciar Grey, Chile).

El total del agua presente en el planeta, en todas sus formas, se denomina hidrosfera. El agua cubre 3/4 partes (71%) de la superficie de la Tierra. Se puede encontrar esta sustancia en prácticamente cualquier lugar de la biosfera y en los tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso.

El 97 por ciento es agua salada, la cual se encuentra principalmente en los océanos y mares; solo el 3 por ciento de su volumen es dulce. De esta última, un 1 por ciento está en estado líquido. El 2 % restante se encuentra en estado sólido en capas, campos y plataformas de hielo o banquisas en las latitudes próximas a los polos. Fuera de las regiones polares el agua dulce se encuentra principalmente en humedales y, subterráneamente, en acuíferos.

El agua representa entre el 50 y el 90 % de la masa de los seres vivos (aproximadamente el 75% del cuerpo humano es agua; en el caso de las algas, el porcentaje ronda el 90%).

En la superficie de la Tierra hay unos 1,386,000,000 km³ de agua (si la tierra fuese plana —sin topografía— estaría completamente cubierta por una capa de unos 2,750m), que se distribuyen de la siguiente forma:³

Distribución del agua en la Tierra				
Situación del agua	Volumen en km³		Porcentaje	
	Agua dulce	Agua salada	de agua dulce	de agua total
Océanos y mares	-	1.338.000.000	-	96,5
Casquetes y glaciares polares	24.064.000	-	68,7	1,74
Agua subterránea salada	-	12.870.000	-	0,94
Agua subterránea dulce	10.530.000	-	30,1	0,76
Glaciares continentales y Permafrost	300.000	-	0,86	0,022
Lagos de agua dulce	91.000	-	0,26	0,007
Lagos de agua salada	-	85.400	-	0,006
Humedad del suelo	16.500	-	0,05	0,001
Atmósfera	12.900	-	0,04	0,001
Embalses	11.470	-	0,03	0,0008
Ríos	2.120	-	0,006	0,0002
Agua biológica	1.120	-	0,003	0,0001
Total agua dulce	35.029.110		100	-
Total agua en la tierra	1.386.000.000		-	100

La mayor parte del agua terrestre, por tanto, está contenida en los mares, y presenta un elevado contenido en sales. Las aguas subterráneas se encuentran en yacimientos subterráneos llamados acuíferos y son potencialmente útiles al hombre como recursos. En estado líquido compone masas de agua como océanos, mares, lagos, ríos, arroyos, canales, manantiales y estanques.

El agua desempeña un papel muy importante en los procesos geológicos. Las corrientes subterráneas de agua afectan directamente a las capas geológicas, influyendo en la formación de fallas. El agua localizada en el manto terrestre también afecta a la formación de volcanes. En la superficie, el agua actúa como un agente muy activo sobre procesos químicos y físicos de erosión. El agua en su estado líquido y, en menor medida, en forma de hielo, también es un factor esencial en el transporte de sedimentos. El depósito de esos restos es una herramienta utilizada por la geología para estudiar los fenómenos formativos sucedidos en la Tierra.

REFERENCIAS

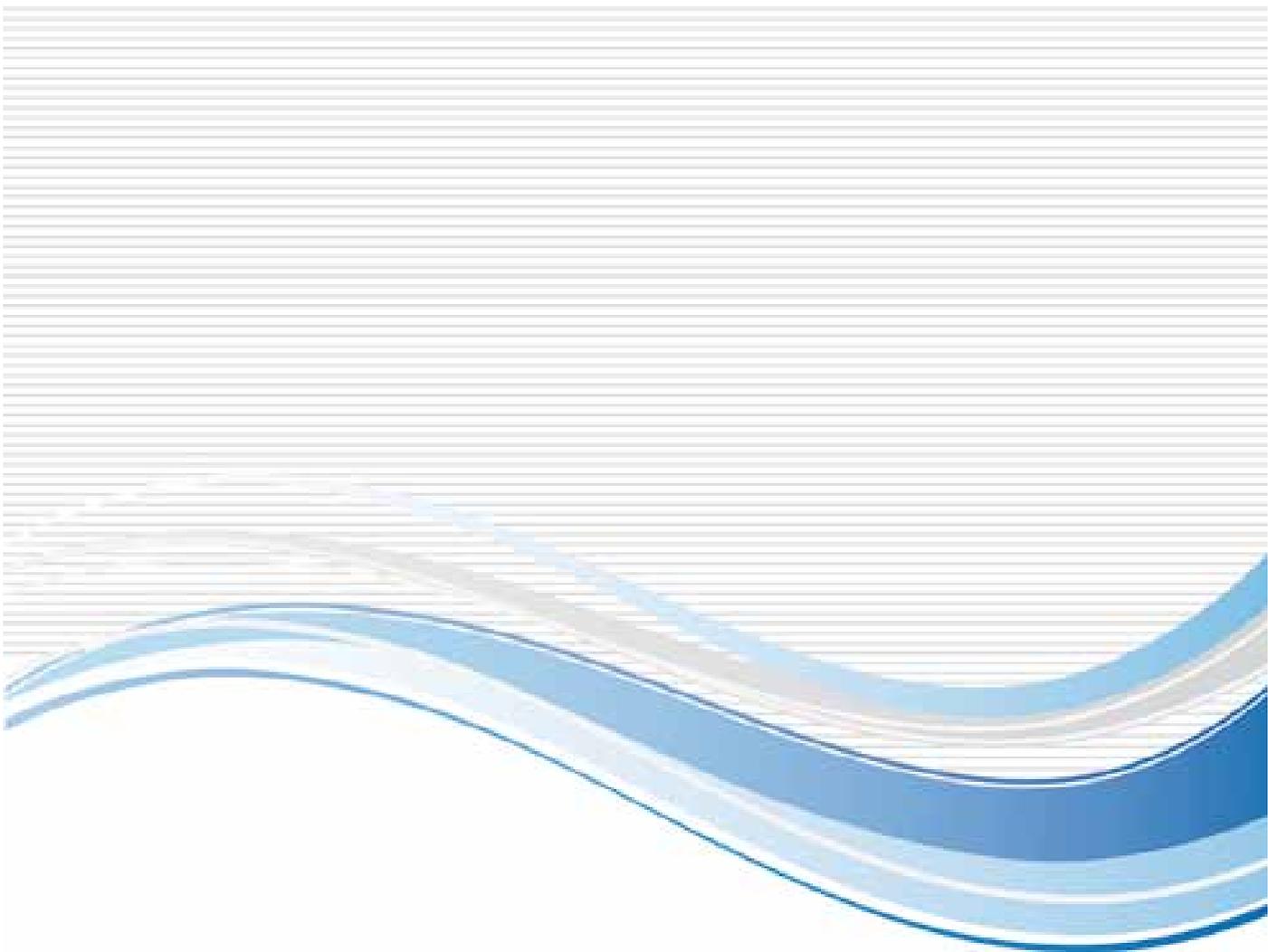
34. www.aguascordobesas.com.ar/educacion/aula-virtual/el-agua-y-los-seres-vivos/el-agua-y-el-hombre.
35. www.observatoriomercosur.org.uy/libro/el_agua_como_elemento_vital_en_el_desarrollo_del_hombre_17.php.
36. «¿Cuál es el origen del agua de la Tierra y los océanos?». Consultado el 8 de agosto de 2011.
37. www.agenciasinc.es/Noticias/Un-diamante-revela-oasis-de-agua-en-profundidades-extremas-de-la-Tierra.
38. www.nature.com/nature/journal/v507/n7491/full/nature13080.html
39. www.abc.es/ciencia/20140612/abci-esta-mayor-reserva-agua-201406121431.html.

1.3. SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

Fuente: Comisión Nacional del Agua, “Situación de los recursos hídricos”, Comisión Nacional de Agua, *Estadísticas del agua en México*, Edición 2012, Capítulo 2, p. 11 a la 34. (rev. 16 de diciembre de 2014). Disponible en: www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2013.pdf

Fuente: Jiménez, Blanca y Marin, Jesús, “El agua en el Valle de México”. Blanca Elena Jiménez Cisneros, Marisa Mazari Hiriart, Ramón Domínguez Mora y Enrique Cifuentes García, *El agua en México, visto desde la academia*. (rev. 17 de diciembre de 2014). Disponible en:

www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=14676:el-agua-en-mexico-vista-desde-la-academia&catid=1322:agua-y-justicia-social&Itemid=106



SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

2

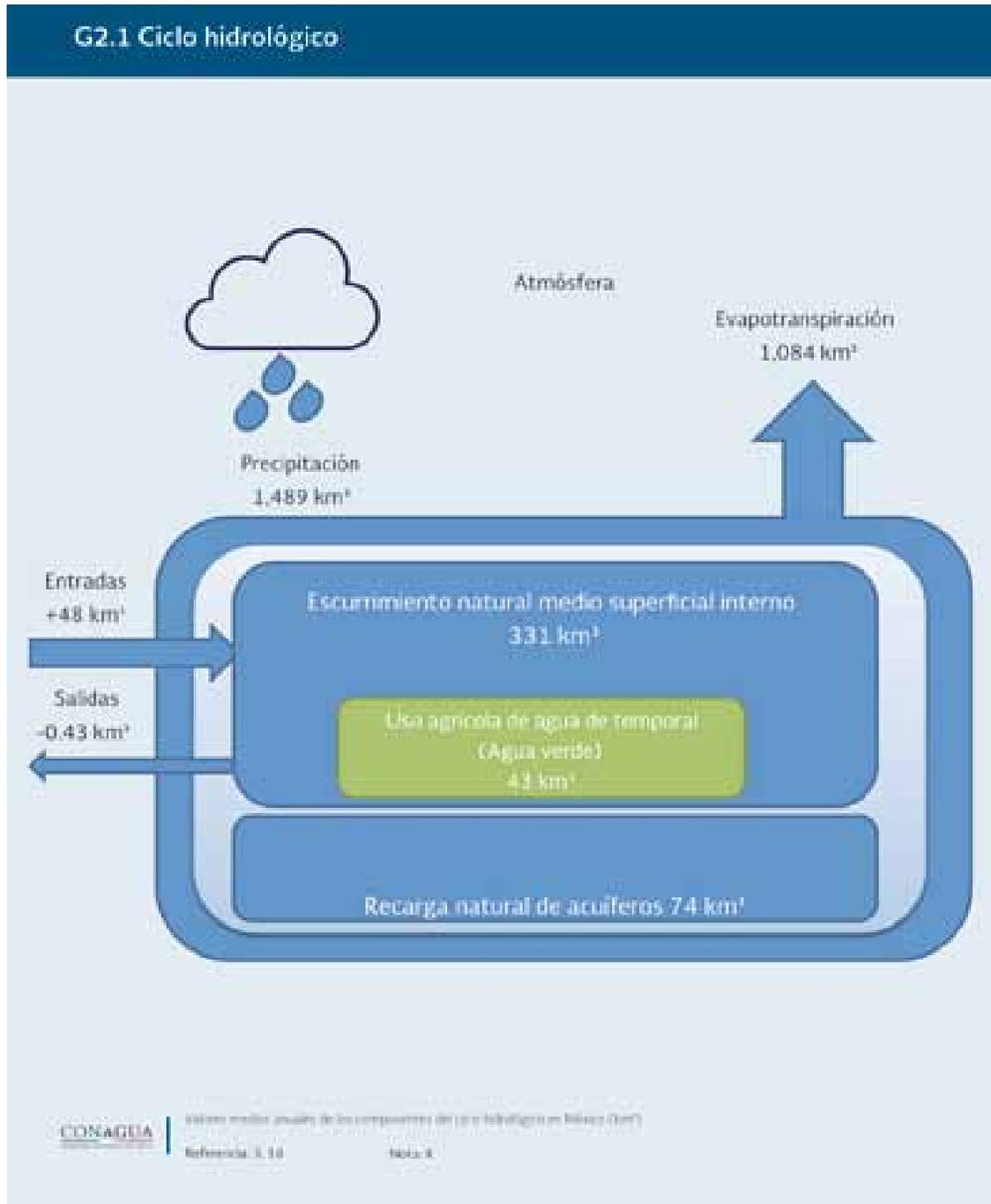
Condiciones cuantitativas y cualitativas del ciclo hidrológico en las diferentes regiones del país.

2.2 Agua renovable

Es la cantidad de agua renovada por la lluvia y las corrientes que fluyen desde otras regiones o países. Se calcula con el escurrimiento natural medio, la recarga total de acuíferos, mas la importación y exportación que se hace del recurso.

Algunos acuíferos tienen periodos de renovación entendidos como la razón de su almacenamiento estimado entre su recarga anual, que son excepcionalmente largos a estos acuíferos se les considera como aguas renovables.

El siguiente esquema muestra los componentes y valores que conforman el cálculo de agua renovable.



El agua renovable se debe analizar desde tres perspectivas:

- Distribución temporal, ya que existen grandes variaciones del agua renovable a lo largo del año.
- Distribución espacial. En algunas regiones del país ocurre precipitación abundante y existe una baja densi-

dad de población, mientras que en otras sucede el efecto contrario.

- Área de análisis. La problemática del agua y su atención es predominante de tipo local, los indicadores calculados a gran escala esconden las fuertes variaciones que existen a lo largo y ancho del país.

T2.1 Agua renovable per cápita por región hidrológico-administrativa

No.	Región hidrológico-administrativa	Agua renovable (hm ³ /año)	Población a diciembre de 2010 Mill. Hab	Agua renovable per cápita 2010 (m ³ /hab/año)	Escorrentamiento natural medio superficial total (hm ³ /año)	Recarga media total de acuíferos (hm ³ /año)
I	Península de Baja California	5 021	4.02	1 250	3 434	1 588
II	Noroeste	8 231	2.60	3 161	5 073	3 157
III	Pacífico Norte	25 917	4.20	6 173	22 650	3 267
IV	Balsas	21 991	11.07	1 987	17 057	4 935
V	Pacífico Sur	32 683	4.80	6 814	30 800	1 883
VI	Río Bravo	13 022	11.38	1 144	6 857	6 165
VII	Cuencas Centrales del Norte	8 163	4.27	1 911	5 745	2 418
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	34 348	22.49	1 527	26 005	8 343
IX	Golfo Norte	26 604	5.02	5 301	24 740	1 864
X	Golfo Centro	94 089	10.06	9 349	89 831	4 258
XI	Frontera Sur	159 404	7.12	22 393	141 388	18 015
XII	Península de Yucatán	29 596	4.15	7 138	4 280	25 316
XIII	Aguas del Valle de México	3 515	21.94	160	1 174	2 341
	Total Nacional	462 583	113.11	4 090	379 034	83 548

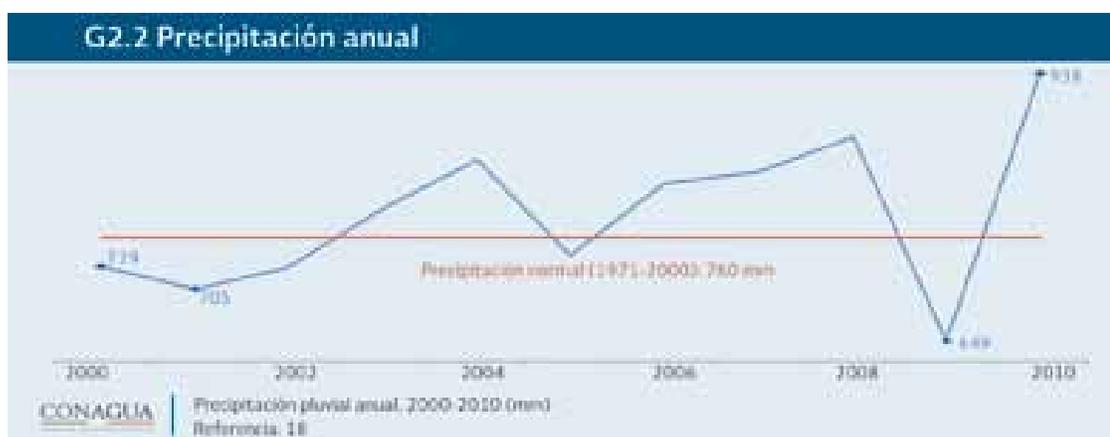
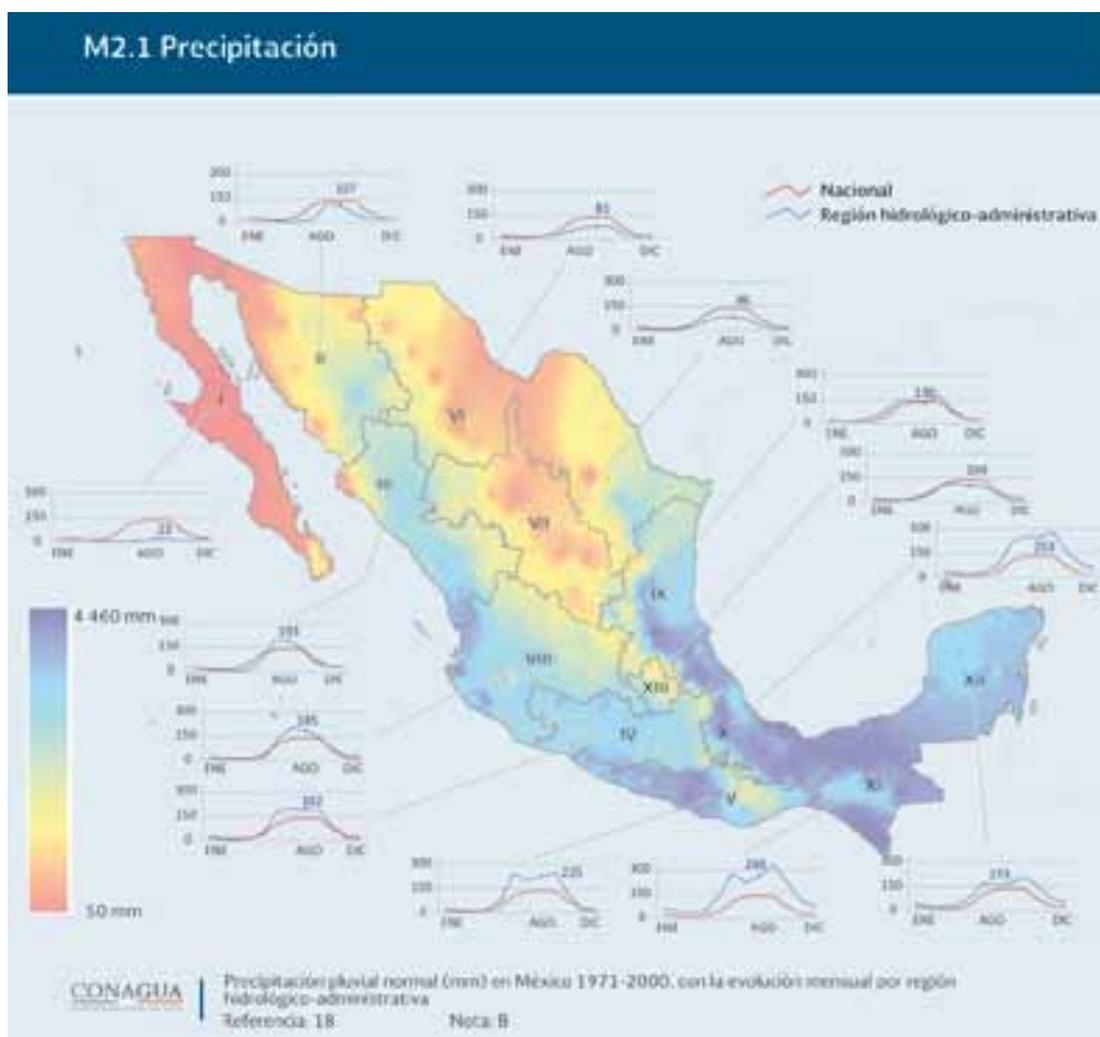
Referencia: 3, 16, 17

Nota: B, L

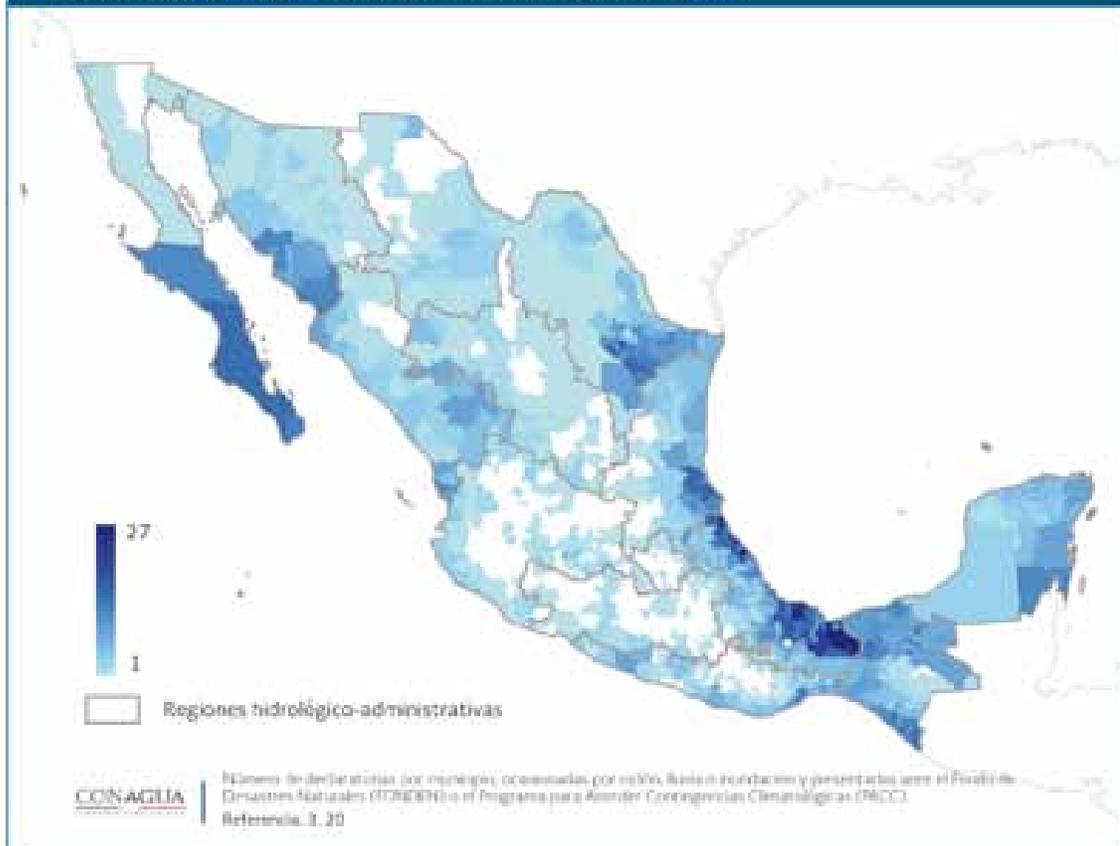
Precipitación pluvial

En la mayor parte del territorio la precipitación ocurre predominantemente entre junio y septiembre, con excepción de

la península de Baja California, donde se presenta principalmente en el invierno.



M2.3 Declaratorias por ciclón, lluvia o inundación



El Centro Nacional de Prevención de Desastres genera una base de datos sobre las declaratorias de emergencia, de desastre y contingencia climatológica, que permite ilustrar la distribución de los municipios con declaratorias debidas a ciclones, lluvias o inundaciones y que han recibido apoyos a través del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) o del Programa para atender contingencias climatológicas (PACC).

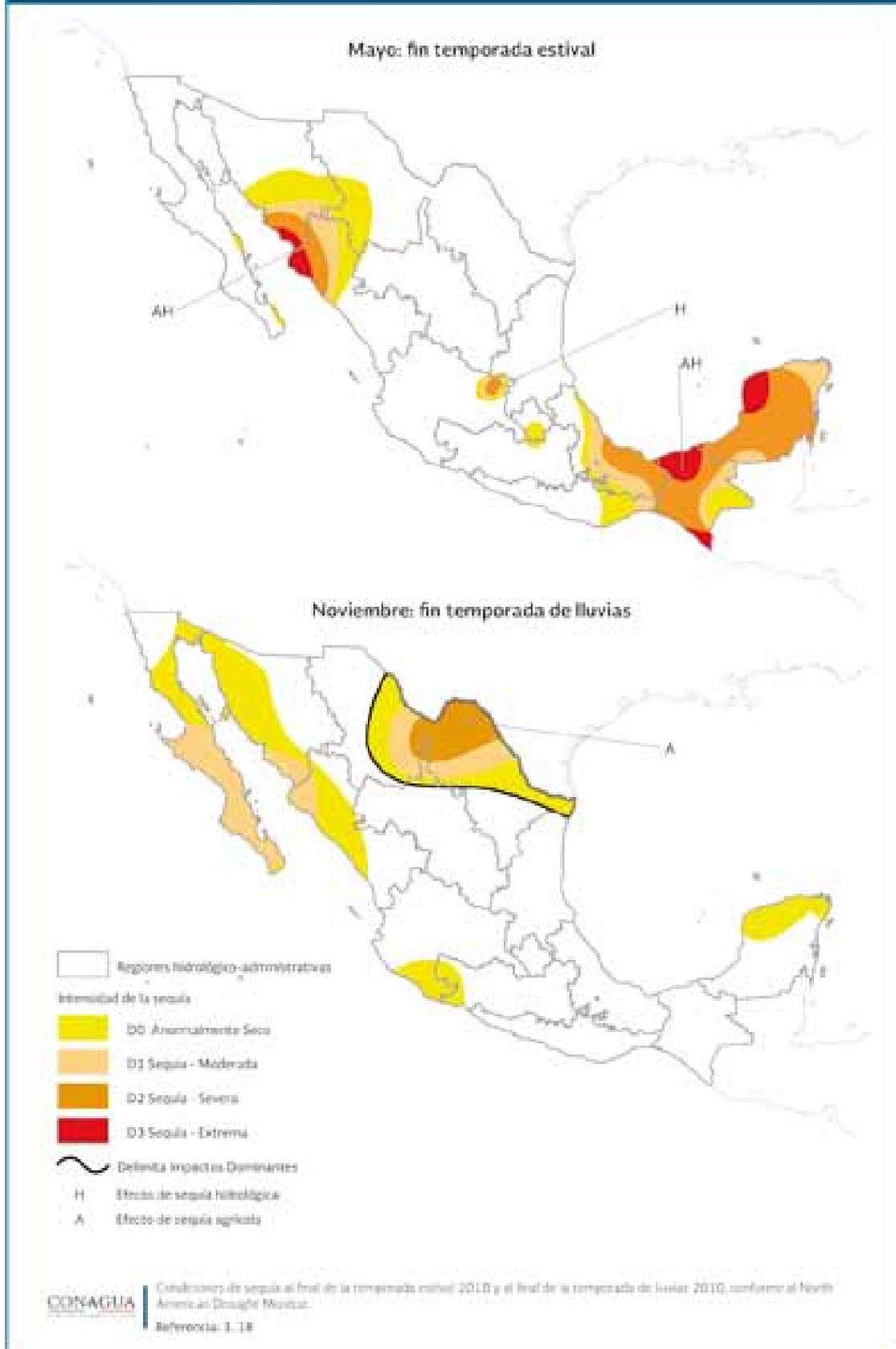
La primera estimación de sequía correspondiente al final de la temporada estival y la segunda estimación de sequía al finalizar la temporada de lluvia.

Si bien la sequía reportada en el monitor NADM se establece con diferente metodología a la empleada para el FONDEN y PACC. A continuación se presenta la distribución de los municipios con declaratorias debido a sequías.

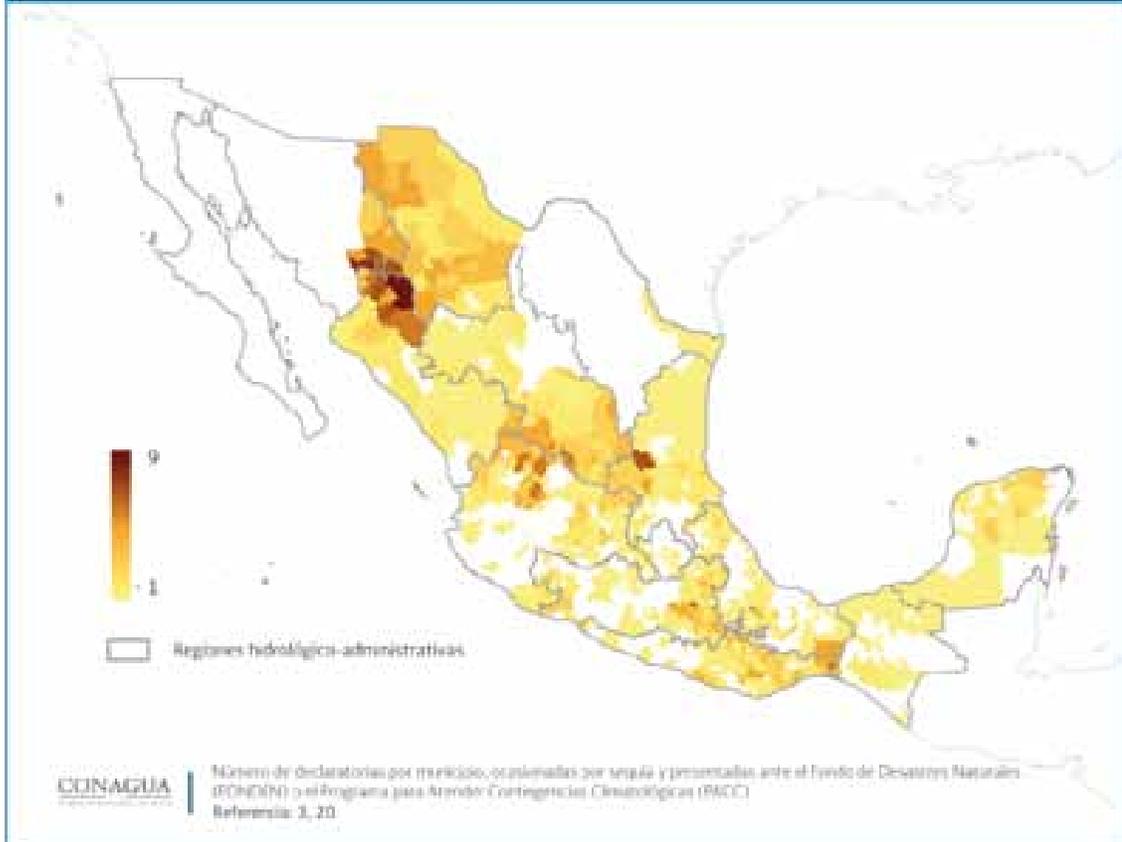
Sequía

Se realizan anualmente dos estimaciones de la sequía a nivel de Norteamérica, en el marco del proyecto "Monitor de Sequía para América del Norte" (NADM por sus siglas en inglés).

D2.2 Evolución de la sequía



M2.4 Declaratorias por sequía



Número de estaciones climatológicas e hidrométricas en México, 2011

Tipo de estación	Número de estación
Climatológica	3 013
Hidrométrica*	717
Total	3 730

* Incluye estaciones automáticas de GASIR, SGT

2.4 Aguas superficiales

Ríos

Los ríos y arroyos constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud y cuyas cuencas cubren el 65 por ciento de la superficie territorial continental del país.

Dos tercios del escurrimiento superficial pertenece a siete ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá, a la vez que sus cuencas representan el 22 por ciento de la superficie de nuestro país.



T2.2 Ríos principales de la vertiente del Pacífico y Golfo de California						
No.	Río	Región hidrológico-administrativa	Escorrentamiento natural medio superficial (millones de m ³ /año)	Área de la cuenca (km ²)	Longitud del río (km)	Orden Máximo
1	Balsas	IV Balsas	16 587	117 406	770	7
2	Santiago	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	7 423	76 416	562	7
3	Verde	V Pacífico Sur	5 937	18 812	342	6
4	Ometepec	V Pacífico Sur	5 779	6 922	115	4
5	El Fuerte	III Pacífico Norte	5 024	33 590	540	6
6	Papagayo	V Pacífico Sur	4 237	7 410	140	6
7	San Pedro	III Pacífico Norte	3 417	26 480	255	6
8	Yaqui	II Noroeste	3 163	72 540	410	6
9	Culiacán	III Pacífico Norte	3 122	15 731	875	5
10	Suchiate ^{a,b}	XI Frontera Sur	2 737	203	75	2
11	Ameca	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	2 236	12 214	205	5
12	Sinaloa	III Pacífico Norte	2 100	12 260	400	5
13	Armería	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	2 015	9 795	240	5
14	Coahuayana	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	1 867	7 114	203	5
15	Colorado ^a	I Península de Baja California	1 928	3 840	160	6
16	Baluarte	III Pacífico Norte	1 838	5 094	142	5
17	San Lorenzo	III Pacífico Norte	1 680	8 919	315	5
18	Acaponeta	III Pacífico Norte	1 438	5 092	233	5
19	Pixtla	III Pacífico Norte	1 415	11 473	220	5
20	Presidio	III Pacífico Norte	1 250	6 479	ND	4
21	Mayo	II Noroeste	1 232	15 113	386	5
22	Tehuantepec	V Pacífico Sur	950	10 090	240	5
23	Coatán ^a	XI Frontera Sur	751	605	75	3
24	Tomatlán	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	668	2 118	ND	4
25	Marabasco	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	648	2 526	ND	5
26	San Nicolás	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	543	2 330	ND	5
27	Elota	III Pacífico Norte	506	2 324	ND	4
28	Sonora	II Noroeste	408	27 740	421	5
29	Concepción	II Noroeste	123	25 808	335	2
30	Matape	II Noroeste	90	6 606	205	4
31	Tijuana ^a	I Península de Baja California	78	3 231	186	4
32	Sonoyta	II Noroeste	16	7 653	311	5
		32	81 141	563 934		

^a El escurrimiento natural medio superficial de este río incluye importaciones de otros países, excepto en el caso del río Tijuana, cuyo escurrimiento corresponde a la parte mexicana solamente. El área de la cuenca y su longitud se refieren únicamente a la parte mexicana, estrictamente a cuenca propia. El escurrimiento del Colorado considera la importación conforme al Tratado de 1944, más el escurrimiento generado en México.

^b La longitud del Suchiate pertenece a la frontera entre México y Guatemala.

Referencia: 16

Nota: O, P, Q, R

T2.3 Ríos principales de la vertiente del Golfo de México y Mar Caribe

No.	Río	Región hidrológica-administrativa	Escorrentamiento natural medio superficial (millones de m ³ /año)	Área de la cuenca (km ²)	Longitud del río (km)	Orden Máximo
33	Grijalva-Usumacinta ^a	XI Frontera Sur	115 536	83 553	1 521	7
34	Papaloapan	X Golfo Centro	42 887	46 517	354	6
35	Coatzacoalcos	X Golfo Centro	28 093	17 369	325	5
36	Pánuco	IX Golfo Norte	19 673	84 956	510	7
37	Tonalá	X Golfo Centro	11 389	5 679	82	5
38	Tecolutla	X Golfo Centro	6 095	7 903	375	5
39	Bravo a	VI Río Bravo	5 588	225 242	ND	7
40	Jamapa	X Golfo Centro	2 563	4 061	368	4
41	Nautla	X Golfo Centro	2 218	2 785	124	4
42	La Antigua	X Golfo Centro	2 139	2 827	139	5
43	Soto La Marina	IX Golfo Norte	2 086	21 183	416	6
44	Tuxpan	X Golfo Centro	2 072	5 899	150	4
45	Candelaria ^a	XII Península de Yucatán	1 861	13 790	150	4
46	Cazones	X Golfo Centro	1 712	2 688	145	4
47	San Fernando	X Golfo Norte	1 545	17 744	400	5
48	Hondo ^{a,b}	XII Península de Yucatán	533	7 614	115	4

^a El escurrimiento natural medio superficial de estos ríos incluye importaciones de otros países, excepto en el caso del río Bravo y el Hondo, cuyo escurrimiento corresponde a la parte mexicana solamente. El área de la cuenca y la longitud se refieren sólo a la parte mexicana.

^b La longitud del río Hondo reportada pertenece a la frontera entre México y Belice.

T2.4 Ríos principales de la vertiente interior

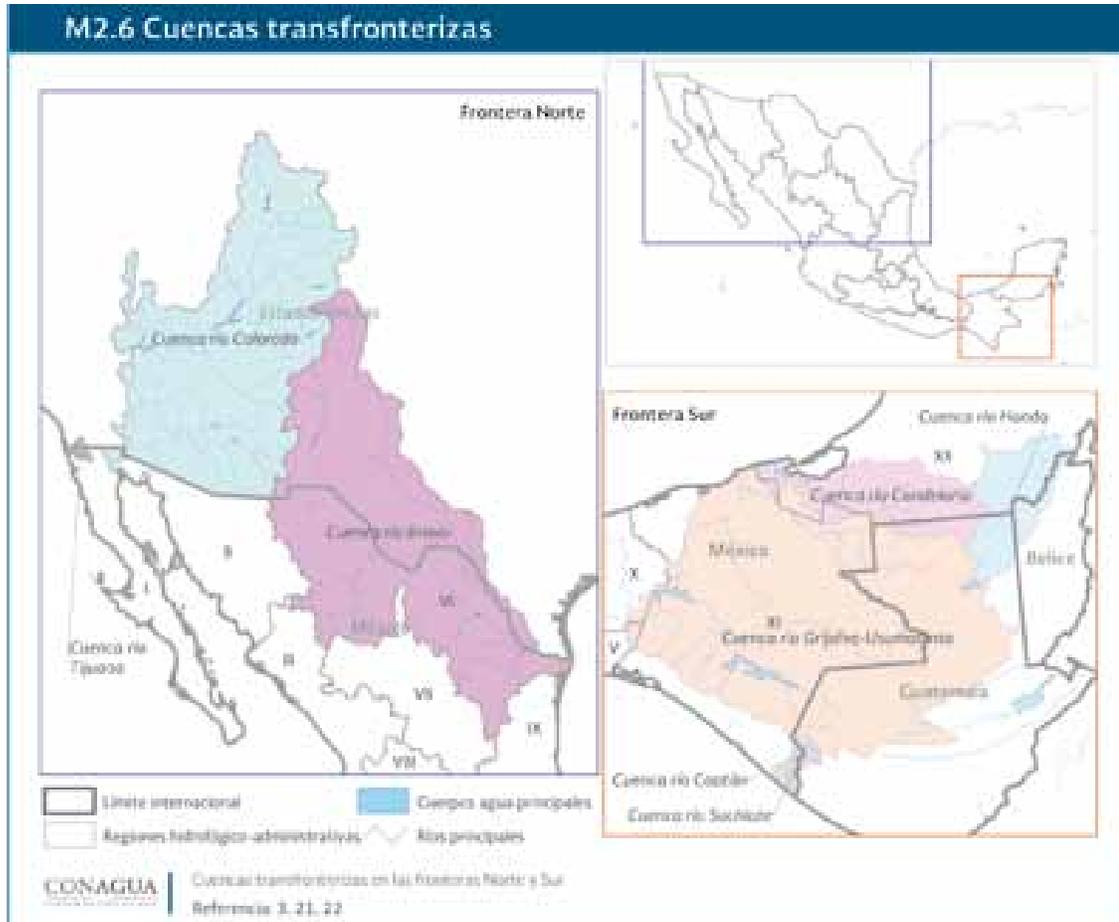
No.	Río	Región hidrológica-administrativa	Escorrentamiento natural medio superficial (millones de m ³ /año)	Área de la cuenca (km ²)	Longitud del río (km)	Orden Máximo
49	Lerma ^a	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	4 742	47 116	708	6
50	Nazas-Aguanaval	VII Cuencas Centrales del Norte	1 912	89 239	1 081	7
		2	6 654	136 355		

^a Este río se considera dentro de la vertiente interior porque desemboca en el Lago de Chapala.

Cuencas transfronterizas

México comparte ocho cuencas con los países vecinos: tres con los Estados Unidos de América (Bravo, Colorado y Tijuana),

cinco con Guatemala (Grijalva, Usumacinta, Suchiate, Coatán y Candelaria).



En el caso del Río Colorado el tratado específica que los Estados Unidos de Amé-

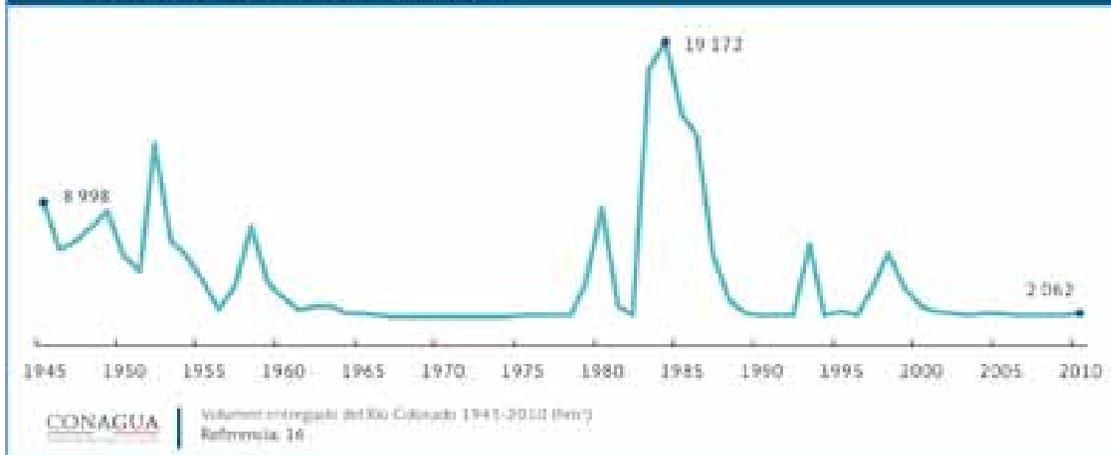
rica deberán entregar anualmente a México 1,850.2 Mm³.

T2.5 Distribución de aguas del Río Bravo

Corresponden a los Estados Unidos Mexicanos	Corresponden a los Estados Unidos de América
El total de los escurrimientos de los ríos Álamo y San Juan.	El total de los escurrimientos de los ríos Pecos y Devils, del manantial Goodenough y de los Arroyos Alamito, Terlingua, San Felipe y Pinto.
Dos terceras partes del agua que llega a la corriente principal del Río Bravo proveniente de los seis cauces mexicanos siguientes: ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo de las Vacas.	Una tercera parte del agua que llega a la corriente principal del Río Bravo proveniente de los seis cauces mexicanos siguientes: ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo de las Vacas.
La mitad de los escurrimientos no asignados en el tratado que llegan al cauce principal, entre Quitman y Falcón.	La mitad de los escurrimientos no asignados en el tratado que llegan al cauce principal, entre Quitman y Falcón.
La mitad del escurrimiento de la cuenca del Bravo aguas debajo de Falcón.	La mitad del escurrimiento de la cuenca del Bravo aguas debajo de Falcón.

Referencia: 23

G2.3 Entregas del Río Colorado



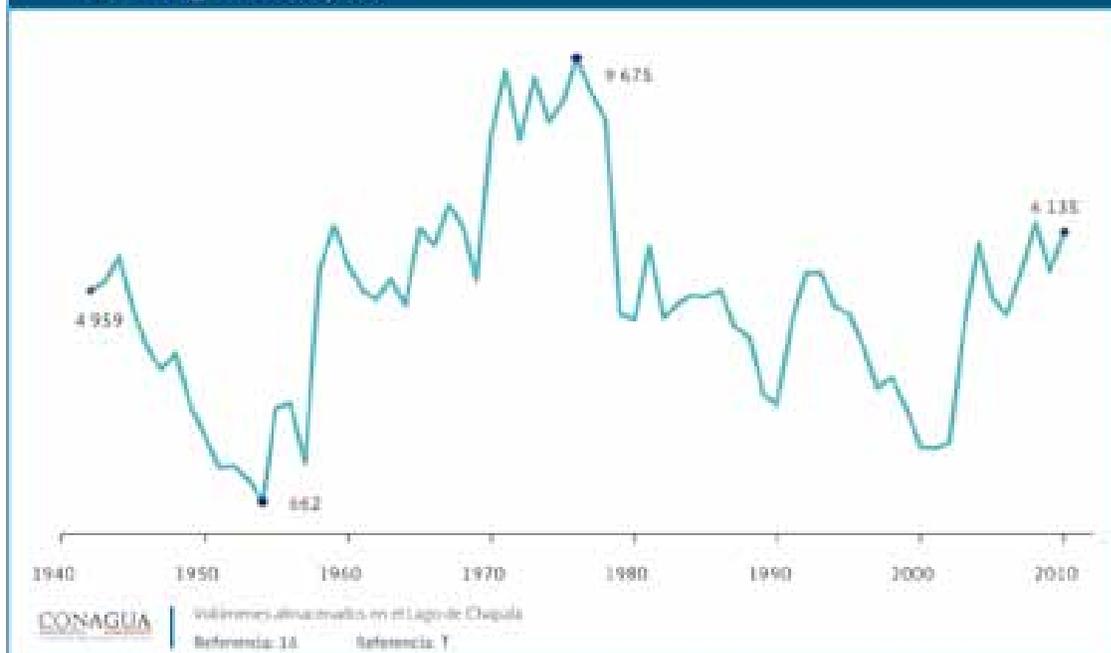
Volumen entregado por EUA a México en el río Colorado, 2011

Volumen entregado por EUA (millones de m³)	Diferencia con respecto a 1 850 millones de m³
1 873.73	23.73

Principales lagos

A continuación se presentan los principales lagos de México por la superficie de su cuenca propia.

G2.4 Lago de Chapala



D2.3 Principales lagos



Número	Nombre	Cuenca km ²	Capacidad hm ³
1	Lago de Chapala	1 116	8 126
2	Laguna de Cuicatlan	306	920
3	Lago de Patzcuaro	97	550
4	Lago de Yuriria	80	188
5	Laguna Catemaco	75	454
6	Dr. Nabor Carrillo	10	12
7	Tequesquitongo	8	160

CONAGUA
Comisión Nacional del Agua

Principales lagos de México por tamaño de cuenca por estado
Referencia: 14 Nota: 5

2.5 Aguas subterráneas

Sobreexplotación de acuíferos.

- La importancia del agua subterránea se manifiesta en el volumen de agua utilizada por los principales usuarios ya que el mayor volumen de agua concesionada para uso consuntivo, pertenece a este origen.
 - Cabe mencionar que para fines de administración del agua subterránea el país se ha dividido en 653 acuíferos cuyos nombres oficiales se publicaron en el DOF el 5 de diciembre de 2001.
- A partir de la década de los setenta, se incrementó sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados.
- De acuerdo con los resultados de los estudios recientes se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo en función de la relación, extracción/recarga.



El estatus de dichos acuíferos se muestra en la siguiente tabla.

T2.6 Acuíferos						
Región hidrológico-administrativa		Número de Acuíferos				Recarga media (hm ³ /año)
		Total	Sobreexplotados	Con intrusión marina	Bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres	
I	Península de Baja California	88	13	10	5	1587.5
II	Noroeste	62	10	5	0	3157.3
III	Pacífico Norte	24	2	0	0	3266.9
IV	Balsas	46	2	0	0	4934.8
V	Pacífico Sur	35	0	0	0	1883.3
VI	Río Bravo	102	17	0	8	6164.6
VII	Cuencas Centrales del Norte	65	21	0	18	2417.6
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	129	31	0	0	8343.2
IX	Golfo Norte	39	1	0	0	1863.9
X	Golfo Centro	22	0	2	0	4257.6
XI	Frontera Sur	23	0	0	0	18015.2
XII	Península de Yucatán	4	0	0	1	25315.7
XIII	Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	14	4	0	0	2340.6
	Total	653	101	17	32	83 548.2

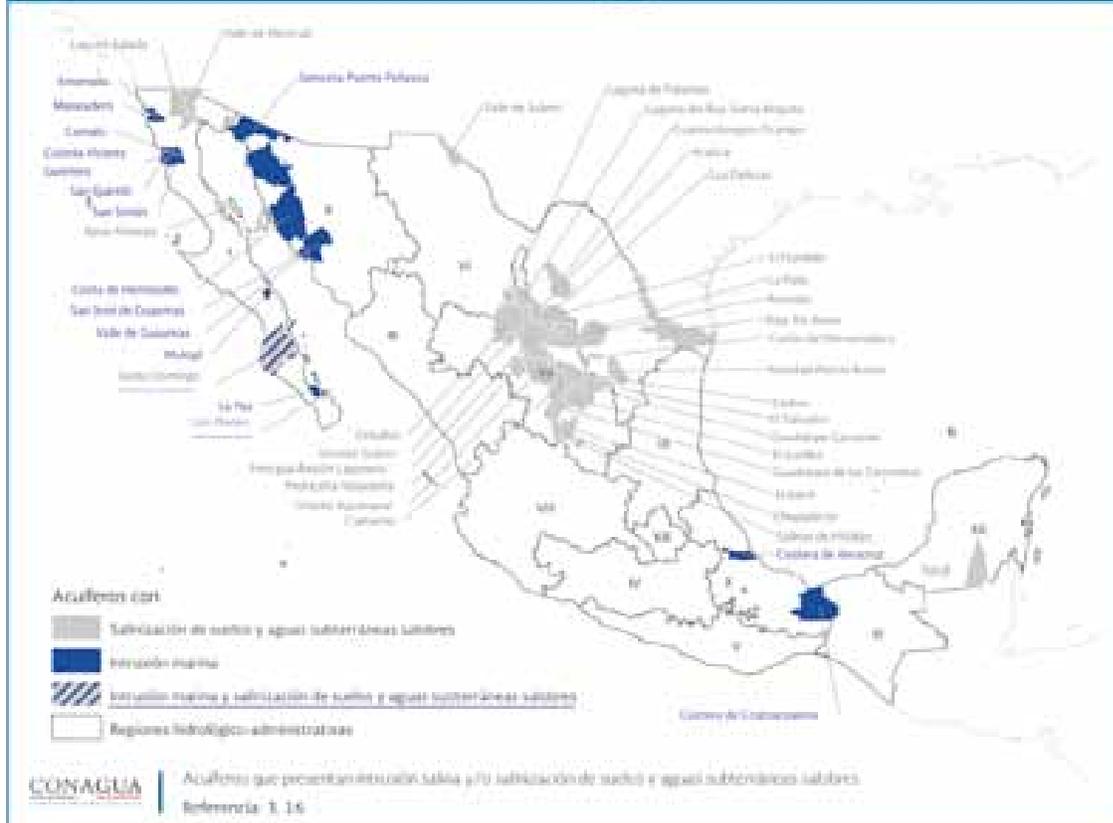
Referencia: 16

Intrusión marina o salinización y aguas subterráneas salobres

Las aguas salobres se presentan específicamente en aquellos acuíferos localizados en provincias geológicas caracterizadas por formaciones sedimentarias antiguas, someras, de origen marino y evaporítico, en las que la interacción del agua subterránea con el material geológico en la cual circula produce su enriquecimiento en sales.

Los acuíferos con presencia de suelos salinos y agua salobre se presentan donde convergen condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y por tanto de evaporación, así como la presencia de aguas congénitas y de minerales evaporíticos de fácil disolución.

M2.8 Intrusión marina o salinización y aguas subterráneas salobres



2.6 Calidad del agua

Las determinaciones de los parámetros físico químicos y microbiológicos se llevan a cabo en la Red Nacional de Laboratorios.

Monitoreo

Adicionalmente a los parámetros físico químicos y microbiológicos, a partir del 2005 se han realizado monitoreos biológicos en algunas regiones, los cuales permiten evaluar la calidad del agua utilizando métodos sencillos y de bajo costo, tales como el índice de diversidad con organismos bentónicos.

T2.8 Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua, 2010

Indicador de calidad del agua	Número de sitios de monitoreo
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	652
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	725
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	799

Referencia: 16

T2.7 Sitios de la Red Nacional de Monitoreo, 2010

Red	Área	Sitios (número)
Red Primaria	Cuerpos superficiales	226
	Zonas costeras	113
	Aguas subterráneas	156
Red Secundaria	Cuerpos superficiales	282
	Zonas costeras	23
	Aguas subterráneas	41
Estudios Especiales	Cuerpos superficiales	235
	Zonas costeras	50
	Aguas subterráneas	416
Red de Referencia de Agua Subterránea		85
TOTAL		1 627

Referencia: 16

Evaluación

La evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo utilizando tres indicadores: la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

Es oportuno mencionar que los sitios con monitoreo de calidad del agua están ubicados en zonas con una alta influencia antropogénica.

M2.9 Calidad del Agua: DBO₅



T2.9 Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales por región hidrológico-administrativa de acuerdo al indicador DBO₅, 2010

Región hidrológico-administrativa	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente Contaminada
I Península de Baja California	33.3	9.5	33.3	23.9	0.0
II Noroeste	51.2	23.1	20.5	2.6	2.6
III Pacífico Norte	70.7	12.2	17.1	0.0	0.0
IV Balsas	38.5	29.9	17.1	11.1	3.4
V Pacífico Sur	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VI Río Bravo	29.1	45.3	24.4	1.2	0.0
VII Cuencas Centrales del Norte	80.0	20.0	0.0	0.0	0.0
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	44.9	12.1	24.8	14.8	3.4
IX Golfo Norte	83.7	9.3	2.3	4.7	0.0
X Golfo Centro	0.0	79.2	17.0	1.9	1.9
XI Frontera Sur	27.7	55.6	16.7	0.0	0.0
XII Península de Yucatán	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
XIII Aguas del Valle de México	3.7	3.7	25.9	14.8	51.9
Total Nacional	42.3	27.5	18.9	7.5	3.8

Referencia: 16

M2.10 Calidad del Agua: DQO



T2.10 Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales por región hidrológico-administrativa de acuerdo al indicador DQO, 2010

Región Hidrológico-Administrativa		Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente Contaminada
I	Península de Baja California	0.0	9.5	14.3	76.2	0.0
II	Noroeste	39.1	28.1	17.2	12.5	3.1
III	Pacífico Norte	11.8	41.2	23.5	23.5	0.0
IV	Balsas	17.0	19.7	29.1	29.9	4.3
V	Pacífico Sur	63.1	19.3	7.0	1.8	8.8
VI	Río Bravo	53.8	34.4	8.6	3.2	0.0
VII	Cuencas Centrales del Norte	35.0	45.0	15.0	5.0	0.0
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	3.3	12.0	38.0	38.0	8.7
IX	Golfo Norte	57.9	26.3	10.5	3.5	1.8
X	Golfo Centro	28.2	26.1	26.1	19.6	0.0
XI	Frontera Sur	30.5	38.9	16.7	13.9	0.0
XII	Península de Yucatán	45.0	45.0	5.0	5.0	0.0
XIII	Aguas del Valle de México	3.7	3.7	18.5	22.2	51.9
Total Nacional		29.2	23.6	21.2	20.4	5.6

Referencia: 16

M2.11 Calidad del Agua: SST



T2.11 Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales por región hidrológico-administrativa de acuerdo al indicador SST, 2010

Región Hidrológico-Administrativa	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente Contaminada
I Península de Baja California	71.7	15.1	11.3	1.9	0.0
II Noroeste	64.0	21.9	9.4	0.0	4.7
III Pacífico Norte	41.5	43.9	14.6	0.0	0.0
IV Balsas	47.5	34.4	14.8	3.3	0.0
V Pacífico Sur	50.0	37.0	7.4	5.6	0.0
VI Río Bravo	73.1	20.4	4.3	1.1	1.1
VII Cuencas Centrales del Norte	65.0	15.0	15.0	5.0	0.0
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	42.1	36.8	17.0	3.5	0.6
IX Golfo Norte	52.6	38.6	8.8	0.0	0.0
X Golfo Centro	86.8	13.2	0.0	0.0	0.0
XI Frontera Sur	41.6	55.6	2.8	0.0	0.0
XII Península de Yucatán	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
XIII Aguas del Valle de México	33.3	18.5	33.3	14.9	0.0
Total Nacional	55.3	30.2	11.4	2.5	0.6

Referencia: 16

M2.12 Sitios de monitoreo "fuertemente contaminados"



Calidad de agua subterránea

Uno de los parámetros que permite evaluar la salinización de aguas subterráneas son los sólidos totales.

De acuerdo a su concentración las aguas subterráneas se clasifican en dulces (<1000 mg/l), ligeramente salobres (1000 a 2000 mg/l) y salinas (>10,000 mg/l).

El límite entre el agua dulce y la ligeramente salobre coincide con la concentración máxima señalada por la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que “establece los límites máximos permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano y tratamiento en materia de calidad del agua para consumo humano”.

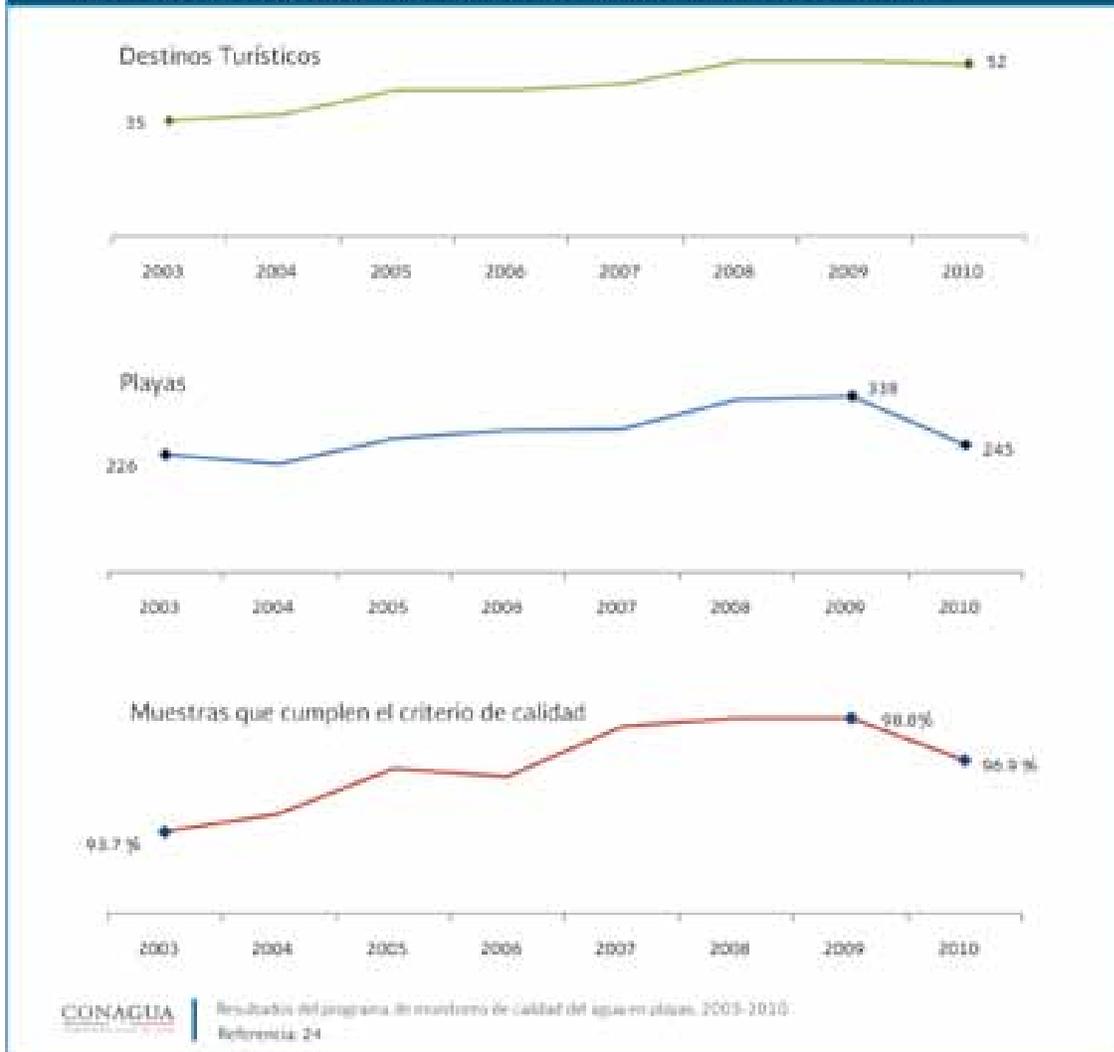
La finalidad del Programa Playas Limpias es prevenir y revertir la contaminación de las playas mexicanas, respetando la eco-

logía nativa, haciéndolas competitivas y así elevar la calidad y el nivel de vida de la población local y del turismo.

Para su operación se han instalado comités de playas limpias, los cuales están encabezados por el presidente del municipio y que cuentan con la presencia de representantes de asociaciones y de la iniciativa privada para evaluarla calidad del agua en las playas, se utiliza el indicador bacteriológico de Enterococos fecales, el cual se considera el más eficiente para evaluar la calidad del agua de mar para uso recreativo de contacto primario.

Por lo anterior la Secretaría de Salud acorde a estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud, determinó que un nivel de Enterococos de 200 NMP/100 ml se considera el límite máximo para uso recreativo.

G2.5 Resultados del programa de monitoreo de calidad en playas



Criterio de calificación de la calidad del agua en las playas:

0-200 NMP/100 ml, se considera la playa APTA para uso recreativo.

>200 NMP/100 ml se considera la playa NO APTA para uso recreativo.

EL AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO

*Blanca Jiménez C., Marisa Mazari H.,
Ramón Domínguez M. y Enrique Cifuentes G.*

INTRODUCCIÓN

El Valle de México tiene una extensión de 9 600 km² y se ubica a 2 240 msnm. Originalmente era una cuenca cerrada, la cual fue artificialmente abierta a finales del siglo XVII para evitar inundaciones. En el valle se asienta la zona urbana más grande del país, con 18 millones de habitantes y que además concentra gran parte de la actividad industrial, comercial y política del país. Todas las características anteriores intervienen en la problemática del agua, con una creciente dificultad para satisfacer la demanda, así como un sistema de gran complejidad para desalojar las aguas negras y las pluviales. Ambos aspectos llevan hoy en día a vivir en una ciudad con problemas severos ocasionados por la sobreexplotación del acuífero y el hundimiento del terreno. En este capítulo se presenta una discusión sobre el origen del problema, los efectos ocasionados, así como las posibles opciones para mejorar la situación. El problema del agua en la Ciudad de México es grave y añejo, describirlo requeriría todo un libro, sin embargo, listar soluciones factibles necesitaría no más de una página si hubiera suficiente voluntad política y aceptación social del precio que se debe pagar para implantarlas.

Hasta el siglo XVIII el Valle de México, estaba constituido por cinco lagos, los tres de mayores dimensiones eran el lago de México- Texcoco, el lago de Xochimilco y el lago de Chalco; Zumpango y Xaltocan de menores dimensiones. Debido al desecamiento y a los asentamientos humanos, hoy sólo quedan dos lagos alrededor del valle: el lago de Texcoco y el lago de Zumpango. Por otro lado, dentro de la cuenca hidrológica, no existen ríos importantes, sin embargo, hay algunos ríos intermitentes que acarrear grandes cantidades de agua en la época de lluvias (de mayo a septiembre). En términos generales, estos ríos bajan o escurren desde las montañas, principalmente del Desierto de los Leones, los Dinamos y el Ajusco, así como de las laderas del poniente de la ciudad.

Con base en la constitución del subsuelo y el funcionamiento hidrológico, el Valle de México se ha dividido en tres subsistemas acuíferos, que forman el

acuífero regional (Lesser *et al.*, 1990). El acuífero regional está constituido por rocas volcánicas fracturadas cubiertas por depósitos lacustres y aluviales con menor conductividad hidráulica. Por esta razón, el acuífero del Valle de México es poroso, confinado en algunas áreas y semiconfinado en otras (Marín *et al.*, 2002). La hidroestratigrafía del Valle de México de la superficie hacia abajo se describe a continuación (Marín *et al.*, 2002):

- Depósitos lacustres cuaternarios con un espesor de 0 a 400 m. Estas unidades son impermeables y esporádicamente muestran fracturas. Los sedimentos superficiales con alternancias entre capas de arcillas (5–30 m de espesor) y depósitos volcánicos, localmente conocidos como capas duras, constituyen el acuitardo, que se consideraba protección al sistema de acuíferos.
- Material volcánico y piroclástico cuaternario (0–2000 m). Estas rocas constituyen el acuífero principal de la parte sureste del valle.
- Depósitos aluviales cuaternarios con espesores que varían de menos de 1 a 10 m. Estos depósitos se encuentran preferentemente en los flancos de las montañas. También están considerados como uno de los rellenos más importantes del acuífero principal del Valle de México.

De manera general, este acuífero regional se recarga por la zona sur y poniente de la ciudad, donde desafortunadamente se incrementan en forma acelerada los asentamientos humanos, lo que por un lado ha disminuido la cantidad de agua que fluye al acuífero y, por otro, ha deteriorado su calidad con contaminantes.

BALANCE HIDRÁULICO

La Ciudad de México emplea 72.5 m³/s de agua, de los cuales 72% se extrae del subsuelo del Valle de México, 18% proviene del sistema Cutzamala, 8% del Lerma y 2% de manantiales y escurrimientos superficiales propios del valle. De esta cantidad, 10 m³/s se usan directamente en riego. Los 62.5 m³/s restantes se distribuyen a través de la red y equivalen a proporcionar 300 L/hab·d cifra a la que hay que restarle lo que se pierde por fugas (23 m³/s) y el consumo en comercios, industrias y servicios municipales (9 m³/s) de lo que resulta una dotación real *per capita* de 146 L/hab·d, que al compararlo con el recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que va de 150 a 170 L/hab·d parece ser razonable (OMS, 1995). La tabla 1 muestra el consumo por nivel económico y se observa que sólo poco más de 5% de la población emplea consumos más altos que los recomendados por la OMS. Lo que sugiere que las campañas para inducir el ahorro del agua tendrían que dirigirse a un sector específico de la población. Incluso pudiera ser más conveniente promover otras como las de la cultura de “pago justo” en función del costo real del agua, en lugar de las de economizar agua en los domicilios. Con ello se podrían financiar los programas

para cubrir las deficiencias actuales, controlar la sobreexplotación del acuífero, suministrar agua realmente potable y tratar las aguas negras antes de ser vertidas a suelos o cuerpos de agua.

TABLA 1
CONSUMOS POR NIVEL ECONÓMICO DE LA POBLACIÓN
EN EL DISTRITO FEDERAL (DGCOH, 1998)

<i>Estrato</i>	<i>Dotación (L/hab·d)</i>	<i>Población (%)</i>
Popular	128	76.5
Medio	169	18.0
Medio alto	399	3.6
Residencial	567	1.9

PRINCIPALES EFECTOS POR LA ELEVADA DEMANDA DE AGUA

El principal efecto por la alta demanda de agua en la ciudad es la sobreexplotación del acuífero, la cual se estima en $15 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, 40% de la recarga natural. Como consecuencia de este fenómeno, el suelo de la Ciudad de México sufre hundimientos diferenciales y aunque no existen cifras confiables sobre los costos que éstos originan es fácil deducir que son enormes, si se considera que:

- a) El hundimiento provoca que las redes de agua potable y de drenaje sufran fallas frecuentes, las primeras se fracturan mientras que las segundas pierden su pendiente. En el primer caso, 37% del agua potable se desperdicia en fugas. En tanto que para evitar las inundaciones ocasionadas por la falta de pendiente ha sido necesario construir y operar el Drenaje Profundo así como costosos sistemas de bombeo para más de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ para elevar el agua del manejo secundario al principal. Puesto que el hundimiento continúa (a razón de hasta 30 cm/año, en algunas zonas) se seguirán requiriendo enormes inversiones de este tipo.
- b) Los costos para corregir fallas en los edificios de la ciudad son también cuantiosos. Un ejemplo es el de la Catedral de la Ciudad de México en la que se ha invertido, hasta el año 2000, 32.5 millones de dólares para renivelarla (Santoyo y Ovando, 2002).
- c) Las inversiones para renivelar periódicamente las vías del Metro son cada vez más importantes y se corre el riesgo de que, en algunas partes, se sobrepase el límite de lo que se considera como mantenimiento y sean necesarias reparaciones mayores.

Adicional a lo anterior, debe considerarse el riesgo de que la Ciudad de México se inunde —y los costos que esto implicaría—, por alguna falla del Drenaje

Profundo, el cual no ha recibido mantenimiento por años, debido a que en lugar de trabajar sólo durante la época de lluvias (como debe), lo hace a lo largo de todo el año, pues el Gran Canal del Desagüe no puede transportar las aguas negras por la falta de pendiente.

DEMANDA FUTURA

El déficit actual de agua en la Ciudad de México es de 5 m³/s, el de la sobreexplotación, como ya se mencionó, de 15 m³/s y si a ello se suma el que para el año 2010 se requerirán otros 5 m³/s, se concluye que se necesitarán 25 m³/s en unos cuantos años. El desafío relativo a las fuentes potenciales de esta agua adquiere características dramáticas ya que es necesario evitar la sobreexplotación y los proyectos para importarla de otras cuencas como la de Temascaltepec (localizada a 200 km de la ciudad y a una altitud de 1200 msnm) enfrentan serias dificultades sociales y ambientales, que en el mejor de los casos, sólo implicarán transferir volúmenes inferiores a los señalados y en plazos mayores a los originalmente considerados. Otras alternativas estudiadas, para traer el agua de lugares más lejanos resultan todavía más costosas.

CALIDAD DE LAS FUENTES DE SUMINISTRO DE AGUA

La calidad del agua en la Ciudad de México es poco conocida pues no se hacen suficientes análisis en cada tipo de fuente de suministro y el agua de cada una de ellas, además, se combina en la red.

A pesar de ello y en general, se puede decir que el agua del subsuelo tiene un contenido de sólidos totales de 200 a 400 mg/L, en algunas zonas como la colonia Agrícola Oriental llega a 1000 mg/L e incluso a más de 20 000 mg/L en la zona del lago de Texcoco, el cerro de la Estrella y la sierra de Santa Catarina (Bellia *et al.*, 1992; DDF, 1985; Lesser, Sánchez y González, 1986). La variación se explica por razones naturales, la contaminación (doméstica e industrial) y por la sobreexplotación que conduce a incrementar la salinidad del agua.

Además, en Azcapotzalco, Agrícola Oriental, sierra de Santa Catarina, Iztapalapa, Milpa Alta, Tlahuac y Xochimilco se observan altas concentraciones de manganeso y particularmente de hierro (del orden de 1 a 5 mg/L), elementos presentes de manera natural (Lesser, Sánchez y González, 1986; Saade Hazin, 1998). En los pozos localizados a lo largo de la sierra de las Cruces, así como en las inmediaciones de la zona montañosa, en lo que se conoce como zona de transición, importante para la recarga del sistema de acuíferos, se reportan altas concentraciones de nitratos, amonio y coliformes fecales que indican descargas

de aguas domésticas directas al subsuelo o de lixiviados que provienen de confinamientos de residuos sólidos. En la zona sur, y por los mismos motivos, se observa presencia de amonio y coliformes fecales (Ryan, 1989).

Después de clorar el agua y antes de su distribución, se observan diferencias en la calidad del agua subterránea durante la época de secas y la de lluvias (Mazari-Hiriart *et al.*, 2002) con niveles más altos de pH, nitratos, cloroformo, bromodihalometano, carbono orgánico total, estreptococos fecales durante la temporada seca. El nivel de trihalometanos no rebasa los 200 $\mu\text{g/L}$ del agua de suministro señalados como límite permisible en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000), sin embargo dicho valor excede los 60 $\mu\text{g/L}$ recomendados en Estados Unidos.

En lo que concierne a la calidad microbiológica del agua subterránea, los escasos estudios realizados en la ciudad indican la presencia de coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales y otras bacterias patógenas, algunas de ellas presentes a lo largo del año, e incluso en algunos casos después de la desinfección. De hecho, se han identificado 84 microorganismos de 9 géneros que se pueden asociar con contaminación fecal humana. En particular, se ha detectado la bacteria *Helicobacter pylori* en casi 20% de las muestras, después de la cloración. En este estudio, representativo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se reporta deficiencia en el sistema de desinfección con cloro, lo que influye en el poco o nulo control de los microorganismos en el agua de uso y consumo humano (Mazari-Hiriart *et al.*, 2002). Aunque en México se desconoce el significado epidemiológico de la *Helicobacter pylori* en el agua (la transmisión ocurre vía fecal-oral y oral-oral), en países desarrollados esta bacteria se asocia con úlceras y cáncer gástrico, lo que podría explicar la alta incidencia observada de estas enfermedades en el país. Además, se ha demostrado la presencia de colifago MS-2, indicador de la posible presencia de virus en el agua (Mazari-Hiriart *et al.*, 1999).

La mala calidad microbiológica del agua del subsuelo se explica por las fisuras del suelo, acentuadas por el hundimiento (consecuencia de la sobreexplotación), las filtraciones del agua del drenaje hacia el acuífero y vertidos directos a éste de aguas residuales, en particular al poniente y sur de la ciudad, (Mazari-Hiriart *et al.*, 1999, 2000 y 2001). Además, se cuenta ya con estudios que demuestran la introducción de contaminantes al acuífero que provienen de rellenos sanitarios o depósitos clandestinos de basura.

En cuanto a las fuentes superficiales externas (Lerma y Cutzamala) e internas, son muy escasos los reportes sobre su calidad. Es necesario que en el futuro se realicen determinaciones con suficiente confiabilidad del contenido de materia orgánica para establecer la posible formación de trihalometanos durante la cloración, así como su calidad microbiológica.

Los datos oficiales (tabla 2) sobre el contenido de cloro residual y la calidad bacteriológica del agua que se distribuye, muestran que hay una tendencia

hacia un deterioro pues después de haber tenido entre 1991 y 1996 más de 94% de las muestras con cloro residual, en los últimos años (1998) los niveles son similares a los de 1989 (alrededor de 85-87%), lo que sin duda constituye una seria alerta.

TABLA 2
PORCENTAJE DE MUESTRAS QUE CUMPLEN CON LAS NORMAS DEL AGUA POTABLE
DE LA SECRETARÍA DE SALUD (GDF, 1999).

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Cloro residual	85	88	92	94	94	94	93	94	94	91	87
Bacteriología	70	82	84	88	91	93	93	92	92	91	83

EL AGUA Y LA SALUD EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En relación con los riesgos para la salud, los estudios realizados reportan una marcada estacionalidad de enfermedades diarreicas que podría estar o no relacionada con la calidad del agua. Por ejemplo, las originadas por las bacterias *Escherichia coli* y *Shigella* ocurren durante el verano, de abril a septiembre (López-Vidal *et al.*, 1990; Guerrero *et al.*, 1994) que coincide con la época calurosa y de lluvias. En contraste, las enfermedades de origen viral como rotavirus, se detectan de octubre a febrero o sea en la época seca y fría (LeBaron *et al.*, 1990).

La información sobre la calidad microbiológica del agua en la ciudad es insuficiente pues sólo se cuenta con algunos datos de coliformes fecales tradicionalmente utilizados en las normas oficiales mexicanas como indicadores de calidad, pero cuyo significado no es considerado confiable por autores como Cifuentes *et al.*, 2002. En ocasiones, pareciera que las características organolépticas (sabor y color, fundamentalmente) tienen un mejor valor predictivo que dichos indicadores. En efecto, en un estudio que buscó determinar los riesgos para la salud en niños expuestos a diferentes condiciones de consumo de agua no se pudieron obtener datos concluyentes de su utilidad indicadora (tabla 3). En este estudio, realizado en las estaciones de lluvia y de estiaje, respectivamente, la población infantil fue clasificada según la calidad bacteriológica del agua que llega a su domicilio en dos categorías: a) libre de coliformes fecales y b) con coliformes fecales o contaminada de acuerdo con la norma. Los resultados de la época de sequía revelaron ausencia de correlación estadísticamente significativa entre la calidad bacteriológica del agua y la tasa de enfermedades entéricas. Ello se puede explicar por otros mecanismos de infección como son la interrupción frecuente del abasto, el empleo de recipientes sin protección (e.g. tambos) y la ausencia de servicios sanitarios. Las variables relativas a las características organolépticas del agua (percepción del sabor u olor del agua) mostraron influencia

estacional y asociaciones estadísticamente significativas con la tasa de enfermedades diarreicas, incluso mejores que el criterio microbiológico (presencia de coliformes fecales). El resumen de estos resultados (tablas 3 y 4) permitió detectar variaciones estacionales, tanto en la tasa de enfermedades entéricas como en los factores de riesgo y de protección, antes mencionados.

TABLA 3

RIESGO DE ENFERMEDADES DIARREICAS EN LA POBLACIÓN INFANTIL
(REGRESIÓN LOGÍSTICA, N= 998 NIÑOS). XOCHIMILCO, CIUDAD DE MÉXICO (2002)

<i>Característica de la población</i>	<i>Riesgo (OR *)</i>	<i>Riesgo (OR **)</i>
Limpia (sin coliformes fecales)	1	1
Contaminada (con coliformes fecales)	1	1
Abasto continuo de agua	< 50%	1
Sabor del agua	> 70%	1
Protección del agua (recipientes con tapa)	< 30%	1
Servicios sanitarios con agua corriente	> 30%	1
Higiene deficiente de alimentos	> 220%	1
Color del agua	1	> 80%
Consumo alimentos callejeros	1	> 60%

Fuente: Cifuentes *et al.*, 2002.

* Sequía ** Lluvias

OR= Odds ratio: 1= sin diferencia significativa con la categoría de comparación.

< factor protector; > es factor de riesgo excesivo

Sólo se incluyen las asociaciones con intervalos de confianza estadísticamente significativos.

Los resultados anteriores muestran que quienes almacenan el agua en recipientes de todo tipo, manipulan sin higiene el agua, carecen de un suministro constante, o bien, no cuentan con servicios sanitarios son los que corren mayores riesgos de salud. El problema es que varios o todos estos factores confluyen en las familias más pobres.

TABLA 4

RIESGO DE INFECCIÓN POR *GIARDIA INTESTINALIS* EN LA POBLACIÓN INFANTIL
(REGRESIÓN LOGÍSTICA, N= 986 NIÑOS). XOCHIMILCO, CIUDAD DE MÉXICO (2002)

<i>Característica de la población</i>	<i>Riesgo (OR *)</i>	<i>Riesgo (OR **)</i>
Limpia (sin quistes de <i>Giardia intestinalis</i>)	1	1
Contaminada (quistes de <i>Giardia intestinalis</i>)	1	1
Higiene personal deficiente (por ejemplo, lavado de manos)	> 225%	> 93%
Sin protección del agua (recipientes sin tapa)	1	> 530%
Higiene de alimentos deficiente	1	> 240%

Fuente: Cifuentes *et al.*, (en prensa).

* Sequía. ** Lluvias.

USO Y REÚSO DEL AGUA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En la Ciudad de México, 80% del agua se emplea para fines municipales, 5% para la industria y 15% para riego. En otras palabras, el “usuario principal” son los habitantes. A partir de esta agua se genera en promedio anual 45 m³/s de aguas residuales. De las cuales se trata alrededor de 6.5 m³/s que se reúsan dentro del valle con ayuda de 27 plantas de tratamiento operadas por el Gobierno del Distrito Federal más 44 pertenecientes a particulares o dependencias federales (Comisión del Lago de Texcoco, Comisión Federal de Electricidad y Sedena). Del total depurado por el Gobierno del Distrito Federal (4.8 m³/s), 54% se emplea para llenar lagos recreativos y canales, 13% para regar 6 500 ha agrícolas y áreas verdes, 20% se infiltra al subsuelo por medio de lagunas, 8% se reúsa en el sector industrial y 5% en el sector comercial (DGCOH, 1998). Las otras plantas tratan y reúsan 1.7 m³/s en sus propias instalaciones, principalmente para riego de áreas verdes o enfriamiento (en el caso de la CFE).

Destaca la construcción al inicio de la década de los ochenta de la planta del ex lago de Texcoco, la cual procesa 0.6 m³/s de agua negra como parte de un proyecto concebido para controlar tolvaneras, reconstituir el sistema natural perdido por el desarrollo de la ciudad y para intercambiar agua de pozos por agua tratada para el riego agrícola de zonas aledañas. La dificultad social y política para modificar el uso del agua, debido en parte al alto contenido de sales por su paso a través de los suelos de Texcoco, condujo a que el agua depurada sea vertida al lago Nabor Carrillo donde se pierde un volumen importante por evaporación.

Los 40 m³/s restantes¹ de aguas negras que salen del valle sin tratar, se emplean para el riego del Valle de Tula (Mezquital), Chiconautla y Zumpango, así como para alimentar la Presa Endhó (1.6 m³/s) cuya agua se emplea posteriormente, también para riego.

El agua negra se usa por los agricultores, no sólo por la necesidad del líquido sino por que incrementa la productividad pues contiene materia orgánica (demanda bioquímica de oxígeno) y nutrimentos para el suelo (tabla 5). Sin embargo, también genera enfermedades por helmintos (lombrices) en agricultores y consumidores de productos agrícolas regados con agua residual o insuficientemente tratada.

¹ Considerando el promedio anual y dejando a un lado los escurrimientos pluviales con promedio anual de 12 m³/s.

TABLA 5
CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DEL EMISOR PROFUNDO DURANTE 1997

Parámetro en mg/L	Secas			Lluvias		
	media	mínima	máxima	media	mínima	máxima
Demanda bioquímica de oxígeno	341	307	419	427	289	687
Sólidos disueltos totales	912	795	1001	707	255	5023
Sólidos suspendidos totales	295	60	1500	264	52	3383
Huevos de helmintos*	14	6	23	27	7	93
Nitrógeno amoniacal	23	16	43	17	0.0	57
Fosfatos	6	1	19	5	2	8

Fuente: Jiménez *et al.*, 1997.

* en organismos por litro

IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Al conocer que toda el agua de la Ciudad de México se reusa, es común que se cuestione el porqué se deba tratar dado que hay gente interesada en ella a pesar de su calidad. Una razón es la obligación de cumplir con la normatividad actual. En este caso la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que las ciudades mayores de 50 000 habitantes deberían haber tratado sus aguas residuales para el año 2000. A pesar de ello, y de contar con propuestas institucionales, así como del financiamiento requerido para llevar a cabo el proyecto de tratamiento desde 1995, (Jiménez y Chávez, 1997). la construcción de las plantas no ha ocurrido. En parte por el constante cambio de funcionarios de todas las partes involucradas (Distrito Federal, Estado de México y Comisión Nacional del Agua) que han requerido aportar contribuciones en diversas ocasiones el proyecto y, por otra, por las interrogantes de a) ¿Cuál sería el efecto de promover la instalación de grandes plantas de tratamiento a la salida del Valle de México para favorecer el empleo del agua en otra región, en lugar de promover el reúso *in situ*? b) ¿Por qué dos entidades federativas (Distrito Federal y Estado de México) deben pagar por tratar el agua residual que generan si una tercera (Hidalgo) es quien la utiliza? Las respuestas de carácter ético están fuera del alcance de este capítulo, pero, desde este punto de vista, se debe considerar que la norma exige tratar el agua por el hecho de usarla y ensuciarla (principio de “quien contamina paga”), y para el caso de la Ciudad de México exige un nivel de calidad bajo, pero suficiente para su empleo en riego (una opción mucho más estricta sería el empleo para la protección ecológica o el de regresarla a su calidad original, por ejemplo). La ventaja de tratar el agua para los habitantes de la Ciudad de México sería acceder a cultivos que no sean vehículos potenciales de enfermedades y, para el país el contribuir a elevar el nivel socioeconómico de la región, al ser posible que se cultiven productos de mayor rendimiento económico, como son las hortalizas.

Otra ventaja, ni esperada ni planeada por la Ciudad de México es que el envío masivo de sus aguas negras al Valle de Tula ha recargado el acuífero de esta zona a tal grado que por su cercanía, diferencia de nivel y calidad apropiada puede ser, previo tratamiento, una posible nueva fuente de suministro (con ciertas limitantes. Véase capítulo 2 sobre el Valle de Tula).

Si ello no es suficiente para convencer al lector, se debe considerar que, como se mencionó, la principal demanda de agua y por tanto de posibilidad de reúso en la ciudad es el consumo humano. Ello implica tratar las aguas negras de la ciudad mediante sofisticados sistemas ingenieriles para inyectarla directamente a la red o al subsuelo en el acuífero local para su consumo posterior. Situaciones que tienen el inconveniente del costo, pues éste es de 60 a 120% superior al de un tratamiento primario de las aguas negras de la ciudad, permitir su uso en el Valle de Tula y recobrarla, tratarla y retornarla a la Ciudad de México para su uso. Otra desventaja, quizá más delicada y difícil de entender, es el mayor riesgo para la salud de la población que quedaría expuesta, ya que los sistemas ingenieriles tienen mayor probabilidad de falla pues tienen menor redundancia, versatilidad y amplitud de campo de acción sobre los contaminantes que los sistemas naturales de autodepuración, donde participan muchos fenómenos. Por ello, la literatura señala un mayor riesgo por el reúso directo del agua (Asano, 1998).

Para finalizar esta sección, y con el afán de promover la reflexión más allá de las opciones de tratamiento y reúso, se hace hincapié sobre el que cualesquiera de las opciones que tome el gobierno (tratar el agua negra *in situ* hasta nivel potable o hacerlo en forma parcial y recuperar el agua infiltrada en el Valle de Tula), se deberían haber iniciado serios estudios científicos y técnicos para implantar las acciones en el plazo en que el agua se requiera (2010).

NORMATIVIDAD PARA EL REÚSO EN CONSUMO HUMANO

Como parte del proceso de planeación para el reúso de agua en consumo humano es necesario contar con una normatividad apropiada. Ello puesto que universalmente es aceptado que los criterios desarrollados para agua potable, no aplican cuando de inicio se emplea agua residual, pues por definición el agua potable se obtiene a partir de fuentes de buena calidad, las cuales en principio nunca han sido usadas y por lo mismo no están contaminadas (Sayre, 1988 y Craun, 1988).

Por ello el Gobierno del Distrito Federal publicó en abril de 2004 la norma local de recarga del acuífero (NADF-003-AGUA-2002) en la *Gaceta Oficial del D.F.* En ella se indican las condiciones y requisitos de la recarga artificial en el Distrito Federal del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los parámetros que se consideran son similares a los de la NOM-127-SSA1-

1994, pero se suman la medición de ciertos microorganismos, compuestos de tipo orgánico, tanto derivados de la cloración como aportes de diversas fuentes (combustibles, disolventes industriales y algunos plaguicidas). Cabe señalar que el documento elaborado por el Subcomité de Calidad del Agua (UNAM-SMA/GDF, 2002) como fundamento de la norma señala que serán necesarios diversos estudios para corroborar la pertinencia de los parámetros propuestos.

OPCIONES PARA UN MEJOR MANEJO DEL AGUA

Dada la magnitud del problema, se deben realizar acciones conjuntas tanto por parte del Distrito Federal como del Estado de México. Aquellas que consideramos más importantes son: la reducción de las fugas de la red de distribución, el intercambio de agua del subsuelo que se utiliza para riego por agua tratada, la aplicación de herramientas económicas para disminuir la demanda, la educación de los diversos sectores de la sociedad (incluido el gobierno) y el reúso municipal ya sea para consumo directo, o bien, para la inyección de agua tratada al acuífero y con un tratamiento adicional para consumo humano. A continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas.

Reducción de Fugas

El porcentaje actual de fugas (37%) representa una pérdida de 24 m³/s de agua, de tal forma que si se reduce en 10% se podrían recuperar 6 m³/s. Para ello se requiere sectorizar la red, controlar presiones y reparar selectivamente tuberías y conexiones. Esto implica programas sostenidos para realizar mediciones, estudios cuidadosos y tardados, así como una coordinación eficiente entre los sectores de los servicios públicos de la ciudad, para no dañar de nuevo las tuberías.

Intercambio del agua del subsuelo por agua tratada para riego

Muchas veces se piensa en la Ciudad de México como un área plenamente urbana. Sin embargo, dentro del valle existen aún zonas agrícolas, al norte del Distrito Federal en Tultitlán, Chalco y Xochimilco; así como en las zonas conurbadas de Ecatepec, Jaltenco, Nextlalpan, Melchor Ocampo, al nororiente de Cuautitlán y Teoloyucan. La demanda para riego es de 10 m³/s (15% del total de agua que se usa). Se podría plantear una adecuada sustitución de aguas de primer uso (que proviene de pozos), por las de reúso si éstas fuesen adecuadamente tratadas para el tipo de cultivos de la zona y se hicieran campañas de participación social que resalten y demuestren las ventajas de esta práctica. Esta opción, por su magnitud, así como la implicación que tiene en cuanto el ordenamiento del manejo del recurso, se considera urgente.

Educación

Enseñar a la sociedad a proteger, conservar y utilizar en forma racional el agua es básico. Pero más aún es enseñarle a pagar el precio del agua. Por otra parte, educar a funcionarios, industriales, organizaciones no gubernamentales e incluso a los políticos es también imprescindible. Entender que el agua debe ser manejada con criterios técnicos de largo plazo y no sólo políticos es fundamental. Cambiar de una sociedad que busca no pagar el agua a otra donde se pague el agua y se exija al gobierno invertir estos recursos financieros en el sector hidráulico y ambiental es indispensable. Ello despolitizaría, en mucho, las decisiones en torno al manejo del agua.

Herramientas económicas

Sin duda el cobro del costo real del agua es una medida para controlar la demanda y más aún para que la gente adquiera la conciencia de su importancia. Desafortunadamente, el manejo político de no querer subir las tarifas por ningún partido político, junto con la desconfianza del pueblo sobre que sus pagos sean efectiva y eficientemente aplicados a un mejor manejo del agua, hacen que las herramientas económicas sean difíciles de aplicar en la práctica. A pesar de lo anterior, se señala que se requiere urgentemente intensificar la medición, facturación y cobro del agua, como una forma para disminuir la demanda a valores “razonables”. Sin embargo, ello debe realizarse junto con la implantación de un esquema tarifario equitativo y justo que contemple tanto las necesidades sociales como los costos del transporte, potabilización, depuración y correcta disposición del agua.

Reúso municipal

Dado el nivel actual de reúso, la única opción de interés futuro por su magnitud es el consumo humano, ya sea en forma directa o a través de su almacenamiento previo en el acuífero. En ambos casos el costo del tratamiento es el mismo, aunque para la segunda se debe además añadir el costo de inyectar y de extraer el agua del acuífero pero con la ventaja de contar con un nivel adicional de depuración y de dilución natural que hacen de esta opción una alternativa más segura.

Por otra parte —y a pesar de lo que podría pensarse—, la reinyección del acuífero no detendría en forma inmediata y directa el hundimiento del suelo, pues para ello sería necesario mantener el proceso por muchos años y frenar la sobreexplotación.

En cuanto al reúso directo de las aguas negras para consumo humano, éste sólo es practicado en Namibia, África desde hace 30 años, donde se requirió un programa científico y de desarrollo tecnológico complejo y sostenido por más de 10 años para realizarlo en forma confiable (Haarhoff y Van der Merwe, 1995). La práctica se lleva a cabo en forma intermitente (en la época de secas) y consi-

dera una dilución del agua renovada con la de primer uso de al menos uno a tres partes. En consecuencia, la tecnología para transformar un agua residual (negra) en agua para consumo humano, existe pero se precisa efectuar pruebas de tratabilidad a nivel laboratorio y escala industrial en la Ciudad de México, con el objeto de obtener criterios de diseño apropiados a la calidad del agua (dadas las diferencias entre las aguas negras de diferentes países o regiones), y definir cómo certificar la calidad potable del agua en función de los contaminantes de la localidad. En particular, se requieren estudios para avalar la calidad microbiológica (principal riesgo) y toxicológica del agua producida. Además, es necesario efectuar estudios demostrativos a nivel semi industrial, que sirvan para definir la confiabilidad del proceso, precisar los costos de inversión y de operación en las condiciones locales, así como para entrenar a los técnicos de operación. La duración estimada para todos estos estudios y trabajos es de cinco a siete años y tienen un costo estimado de 40 millones de pesos.

Otra opción de reúso

Otra opción de reúso del agua, o bien para su inyección en el acuífero de la Ciudad de México, es traer agua del acuífero del Valle de Tula, el cual se recarga artificialmente con 25 m³/s provenientes de las aguas negras de la Ciudad de México (BGS-CNA, 1998 y Jiménez *et al.*, 2000). En este caso, parte del tratamiento lo lleva a cabo la naturaleza a través del suelo, la cubierta vegetal y los cuerpos de agua (Jiménez y Chávez, en prensa). Con esta opción, se evitaría la inundación de tierras agrícolas en el Valle de Tula, por la sobresaturación del subsuelo, se disminuiría el costo del tratamiento del agua para su recuperación. También sería inferior el costo del transporte en relación con las opciones que importan agua de otras cuencas, pues el Valle de Tula se localiza a 100 km de la ciudad y a 150-300 m de diferencia en altura (Jiménez *et al.*, 1997 y Hernández y Jiménez, 2001). Sin embargo, para hacer de esta opción una operación sostenible a largo plazo se requiere tratar las aguas negras que salen de la Ciudad de México con el fin de sostener la capacidad natural de tratamiento del suelo. El costo total estimado sería de un cuarto del costo de potabilizar el agua residual dentro del Valle de México, después del tratamiento de depuración. Todo esto es técnicamente posible y al mismo tiempo se puede atender la demanda social del uso del agua para riego en el Valle de Tula.

Hay también otras acciones que consideramos no repercuten significativamente en la reducción del problema del agua en el valle y que antes de promoverlas requieren un cuidadoso análisis costo-beneficio. Algunas de ellas son las campañas para el ahorro de agua por la ciudadanía, la cosecha de agua de lluvia y el reúso industrial. A continuación se comentan con mayor detalle.

Ahorro de agua

Las campañas para usar menos agua, deben ser selectivas, porque como ya se comentó, sólo una fracción pequeña de la población consume más agua de la recomendada por organismos internacionales.

Cosecha de agua de lluvia

Si consideramos la cantidad de agua que se precipita en la Ciudad de México ($12 \text{ m}^3/\text{s}$) así como los problemas ocasionados por las inundaciones, una solución que se antoja es la cosecha de agua de lluvia de azoteas y patios. Desgraciadamente, la cantidad de agua captable y que sería posible almacenar no llega a $1 \text{ m}^3/\text{s}$, valor muy por debajo de la cantidad requerida. Por lo que, si bien puede ser una opción de nivel local, resulta costosa por la necesidad de crear sitios de almacenamiento adecuados en una ciudad con escasa disponibilidad de terreno por el hecho de que la calidad del agua de lluvia es mala por la contaminación atmosférica y porque su impacto frente a las necesidades es muy bajo.

Reúso industrial

Parece *a priori* atractivo para la zona metropolitana donde se localiza 40% de la industria del país. Sin embargo, mucha de esta industria es de escaso consumo (por ejemplo, confección de ropa) pues la altamente demandante de agua hace tiempo que se trasladó fuera del valle, o bien ya efectúa el reúso (como se mencionó existen al menos 44 plantas de tratamiento para estos fines). Además, hay dos plantas de tratamiento de agua municipal concesionadas: la de Lechería y la de Aragón, que con dificultad colocan en la industria los $0.99 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua tratada² que producen por su costo frente a las tarifas de agua potable. Aun cuando se modifiquen dichas tarifas para promover el reúso, se estima en un escenario optimista que el potencial de reúso industrial es de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en total ($0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Distrito Federal y de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Estado de México), caudal mucho menor a la producción de aguas negras ($40 \text{ m}^3/\text{s}$).

Finalmente, se debe destacar que de nada sirve producir agua renovada de alta calidad o importar agua limpia de otras cuencas si no se preservan las zonas de recarga natural y se protege la calidad del agua del sistema de acuíferos local, puesto que cualquier opción de reúso implica la dilución final con agua limpia. Es por ello urgente tomar la decisión de proteger efectivamente el acuífero del Valle de México, lo que implica detener los asentamientos humanos en las zonas de recarga natural (sur poniente, sur y oriente de la mancha urbana, en la zona de los Reyes) para preservar la cantidad así como instalar drenajes o trata-

² Ello a pesar de que su capacidad de diseño es de $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

mientos individuales de agua en el sur de la ciudad³ para ayudar a preservar la calidad. Se destaca que la recarga no intencional por fugas de drenaje con agua de mala calidad es del orden de 1 m³/s y explica parcialmente el deterioro de la calidad del acuífero del Valle de México antes señalado.

FUTURO DEL AGUA

Si la situación presentada resulta dramática, más lo será en un futuro no lejano. Se estima que para el año 2010 habrá en el valle 21 millones de habitantes de los cuales 58% se ubicará en el Estado de México y 42% restante en el Distrito Federal. La demanda de agua se incrementará 10 m³/s, que bajo el patrón actual no podrán ser suministrados. Además, es muy probable que dado el crecimiento de la mancha urbana la demanda ocurra al norte de la sierra de Guadalupe y al oriente del lago de Texcoco, por lo que las nuevas fuentes de agua, cualesquiera que sean, deberán considerar esta situación.

Bajo esta perspectiva, consideramos que ya no deben postergarse las acciones aquí planteadas, en particular, asegurar una fuente alterna viable y segura de suministro a la Ciudad de México.

Los problemas ambientales asociados con la megaciudad de México no se solucionarán con sólo aplicar tecnología, sino que requiere acciones enmarcadas dentro de un plan conceptual de largo plazo que sea aceptado socialmente. Para desarrollar dicho plan se requiere trabajo interdisciplinario que permita plantear soluciones nuevas y creativas. Independientemente de divisiones políticas y asignaciones presupuestales, el problema del agua en la ciudad nos está rebasando en todos los ámbitos y se podría incluso afirmar que es ya un problema de seguridad nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Asano, T., 1998, "Wastewater Reclamation and Reuse", *Water Quality Management Library*, Vol. 10, Ed. Technomic Publishing Company, Estados Unidos.
- Bellia, S., G. Cusimano, M.T. González, R.C. Rodríguez, y G. Giunta, 1992, *El Valle de México. Consideraciones preliminares sobre los riesgos geológicos y análisis hidrogeológico de la Cuenca de Chalco*, Quaderni Instituto Italo-Latino Americano, Serie Scienza, 3, Roma, Italia, 96 p.
- BGS-CNA, 1998, "Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico", *Final Report, 1998*.

³ Donde las descargas de aguas negras de casas-habitación y otros establecimientos son infiltradas directamente al acuífero por la falta de drenaje en el suelo volcánico.

- Cifuentes, E., J. Villanueva y H. Sanin, 2000, "Predictors of blood lead levels in agricultural villages practicing wastewater irrigation in central México", *Env. J. Occup Environ Health*, 75, pp. 177-182.
- Cifuentes, E., L. Suárez, M. Espinosa, L. Juárez y A. Martínez Palomo, "The risk of *Giardia intestinalis* infection in children from an artificially recharged groundwater area, Mexico City", *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* (en prensa).
- Cifuentes, E., L. Suárez, M. Solano y R. Santos, 2002, "Diarrhea diseases in children from water reclamation site, Mexico City", *Environ Health Perspect*, 110 (9), pp. 219-624.
- Cifuentes, E., M. Gómez, U. Blumental, M. Tellez-Rojo, I. Romieu y G. Ruiz-Palacios, 2000, "Risk factors for *Giardia Instestinalis* infection in agricultural villages practicing wastewater irrigation in Mexico", *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 62 (3), pp. 388-392.
- Craun, G., 1988, "Surface Water Supplies and Health", *Journal of American Water Works Association*, 80, pp. 40-52.
- DDE, 1985, *Actividades geohidrológicas en el Valle de México*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Contrato 7-33-1-0403, México.
- DGCOH, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1998, *Compendio de la situación del agua en el Distrito Federal*, Gobierno del D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF)*, 2000, "Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", octubre 20, pp. 1-8.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF), 1999, *Compendio DGCOH 1999*, Gobierno del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 82 p.
- Guerrero, L., J.J. Calva, A.L. Morrow, R. Velázquez, F. Tuz-Dzib, Y. López-Vidal, H. Ortega, H. Arroyo, T.G. Cleary, L.K. Pickering y G. Ruiz-Palacios, 1994, "Asymptomatic, *Shigella* infections in a cohort of Mexican children younger than two years of age", *Pediatric Infectious Diseases J.*, 13, pp. 596-602.
- Haarhoff, J. y B. Van der Merwe, 1995, "Twenty five years of wastewater reclamation in Windhoke, Namibia", en Angelakis *et al.* (ed.), *Proc. of the 2nd International Symposium on Water Reclamation and Reuse*, Iraklio Crete, Grece, 17-20 octubre.
- Hernández V. y B. Jiménez, 2001, "Costos para el abastecimiento futuro del agua en la Ciudad de México", *Revista de la Federación Mexicana de Ingenieros y Ciencias Ambientales*, 52, pp. 22-26.
- Jiménez, B. y A. Chávez, 1997, "Treatment of Mexico City wastewater for irrigation purposes", *Environmental technology*, 18, pp. 721-730.
- Jiménez, B. y A. Chávez, "Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: 'El Mezquital Valley' case", *Water Science and Technology*, en prensa.

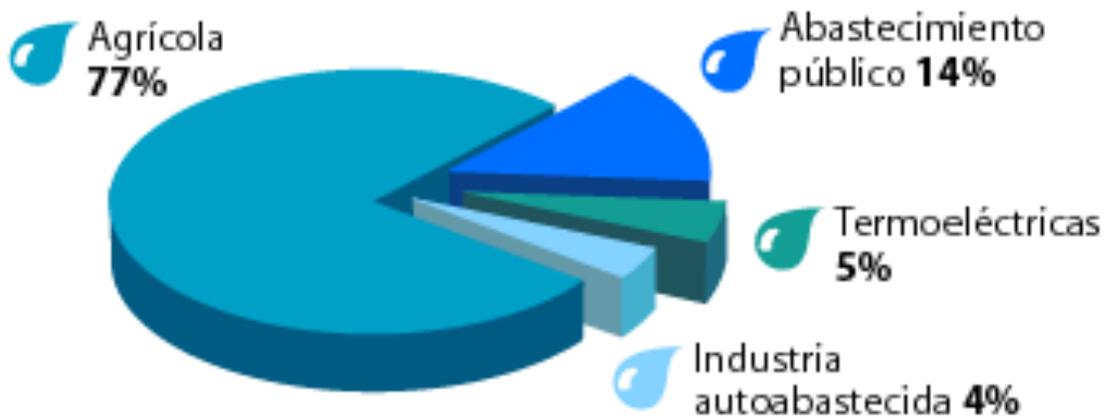
- Jiménez, B., A. Chávez, E. Barrios y R. Pérez, 2000, "Impact and potential of reused water in the Mezquital Valley", *Water*, 21, IWA, 6, pp. 31-36.
- Jiménez, B., A. Chávez y A. Capella, 1997, "Wastewater in the Valley of Mexico and its Reuse", en *70th Annual Conference and Exposition*, 7, 2/32, 311-320, IAWQ. Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- LeBaron, C.W., J. Lew, G.I. Glass, J.M. Weber J., G. Ruiz-Palacios. The Rotavirus Study Group, 1990, "Annual Rotavirus Epidemic Patterns in North America", *J. American Medical Association*, 264 (8), pp. 983-988.
- Lesser, J.M., F. Sánchez y D. González, 1986, "Hidrogeoquímica del acuífero de la Ciudad de México", *Ingeniería Hidráulica de México*, sept.-dic., pp. 64-77.
- López-Vidal, Y., J.J. Calva, A. Trujillo, A. Ponce de León, A. Ramos, A.M. Svennerholm y G. Ruiz-Palacios, 1990, "Enterotoxins and adhesins of enterotoxigenic *Escherichia coli*: are they a risk factor for acute diarrhea in the community?", *J. Infectious Diseases*, 162, pp. 442-447.
- Marín, L.E. y Antonio Trinidad-Santos, 2002, "Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin", en Fenn, M.E., L.I. de Bauer y T. Hernández-Tejeda, *Ecological Studies Series*, 156, Springer-Verlag. New York City, Nueva York, Estados Unidos, pp. 44-67.
- Mazari-Hiriart, M., 2001, "Alivio del crítico problema del agua en la Región Central de México", en *Memoria 2001*, El Colegio Nacional, México, pp. 211-222.
- Mazari-Hiriart, M., B. Torres Beristain, E. Velázquez, J. Calva y S. Pillai, 1999, "Bacterial and viral indicators of fecal pollution in Mexico City's southern aquifer", *Journal of Environmental Science Health*, A34 (9), pp. 1715-1735.
- Mazari-Hiriart, M., E. Cifuentes, E. Velázquez y J.J. Calva, 2000, "Microbiological Groundwater Quality and Health Indicators in Mexico City", *Urban Ecosystems*, 4 (2), pp. 91-103.
- Mazari-Hiriart, M., Y. López-Vidal, G. Castillo-Rojas, S. Ponce de León y A. Cravioto, 2001, "Helicobacter pylori and Other Enteric Bacteria in Freshwater Environments in Mexico City", *Archives of Medical Research*, 32 (5), pp. 458-467.
- Mazari-Hiriart, M., Y. López-Vidal, S. Ponce de León, J.J. Calva-Mercado y E. Rojo-Callejas, 2002, "Significance of Water Quality Indicators: A case study In Mexico City", en *Proceedings of the International Conference: Water and Wastewater, Perspectives of Developing Countries*, Indian Institute of Technology Delhi-International Water Association, New Delhi, India, diciembre 11-13, pp. 407-416.
- Organización Mundial de la Salud, "Guías para la calidad de agua potable", 1995, 2ª ed., Ginebra, Suiza, Editorial OMS.
- Ryan, C.M., 1989, "An investigation of inorganic nitrogen compounds in the groundwater in the Valley of Mexico", *Geofísica Internacional*, 28 (2), pp. 417-433.

- Saade Hazin, L., 1998, "New strategy in urban water management in Mexico: the case of Mexico's Federal District. Natural", *Resources Forum*, 22 (3), pp. 185-192.
- Santoyo E. y E. Ovando-Shelley, 2002, "Underexcavation at the Tower of Pisa and at Mexico City's Metropolitan Cathedral", en *Proc. International Workshop, ISSMGE-Technical Committee TC36 Foundation Engineering in Difficult, Soft Soil Conditions*, CD edition, Mexico City.
- Sayre J., 1988, "International Standards for Drinking Water", *Journal of American Water Works Association*, 80 (1), pp. 53-60.
- UNAM/SMA y GDF, 2002, Subcomité de Calidad del Agua. Propuesta que presenta el Subcomité de Calidad del Agua sobre la definición de parámetros microbiológicos, físicos y químicos para el Anteproyecto de Norma Ambiental del Distrito Federal sobre "Condiciones y requisitos para la recarga artificial en el Distrito Federal del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México", Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, documento no publicado.

1.4 USOS DEL AGUA

Fuente: Usos del agua en México, [rev. 7 de enero, 2015], <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/ usos.aspx?tema=T>

En México, 77% del agua se utiliza en la agricultura; 14%, en el abastecimiento público; 5%, en las termoeléctricas y 4%, en la industria.



Fuente: SEMARNAT. Estadísticas del agua en México 2011.

Agrícola. El agua se utiliza para el riego de cultivos.

Abastecimiento público. Se distribuye a través de las redes de agua potable (domicilios, industrias y a quienes estén conectados a dichas redes).

Industria autoabastecida. Son aquellas empresas que toman el agua directamente de los ríos, arroyos, lagos y acuíferos del país.

Termoeléctricas. El agua se utiliza para producir electricidad.

Fuente: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_110814.pdf

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), “en el Artículo 3. Para los efectos de esta Ley se entenderá”

LII. "Uso": Aplicación del agua a una actividad que implique el consumo, parcial o total de ese recurso;

LIII. "Uso Agrícola": La aplicación de agua nacional para el riego destinado a la producción agrícola y la preparación de ésta para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial;

LIV. "Uso Ambiental" o "Uso para conservación ecológica": El caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema;

LV. "Uso Consuntivo": El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo;

LVI. "Uso Doméstico": La aplicación de agua nacional para el uso particular de las personas y del hogar, riego de sus jardines y de árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa, en términos del Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos;

LVII. "Uso en acuicultura": La aplicación de aguas nacionales para el cultivo, reproducción y desarrollo de cualquier especie de la fauna y flora acuáticas;

LVIII. "Uso industrial": La aplicación de aguas nacionales en fábricas o empresas que realicen la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como el

agua que se utiliza en parques industriales, calderas, dispositivos para enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa, las salmueras que se utilizan para la extracción de cualquier tipo de sustancias y el agua aun en estado de vapor, que sea usada para la generación de energía eléctrica o para cualquier otro uso o aprovechamiento de transformación;

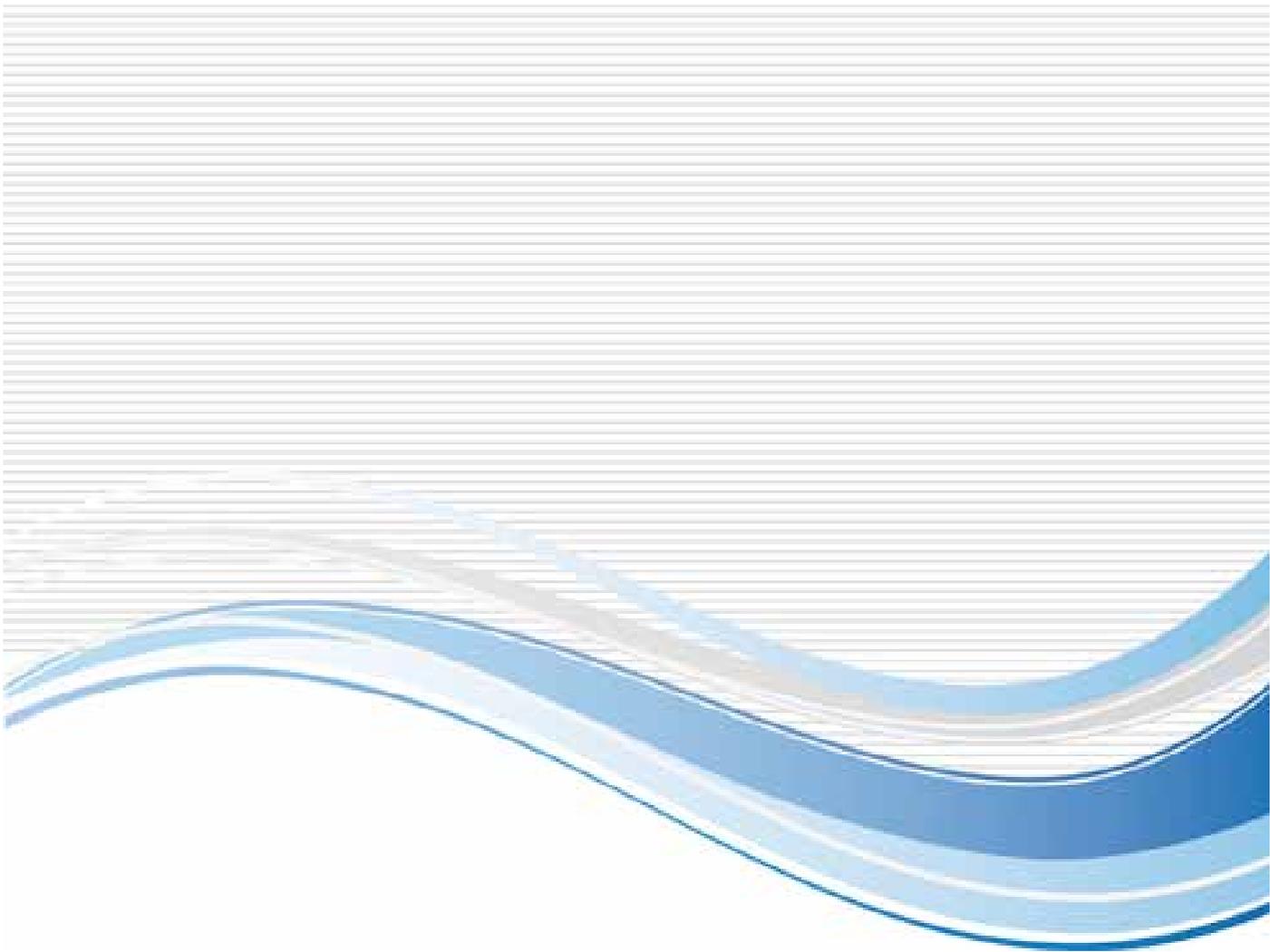
LIX. "Uso Pecuario": La aplicación de aguas nacionales para la cría y engorda de ganado, aves de corral y otros animales, y su preparación para la primera enajenación siempre que no comprendan la transformación industrial; no incluye el riego de pastizales;

LX. "Uso Público Urbano": La aplicación de agua nacional para centros de población y asentamientos humanos, a través de la red municipal;

Fuente: *Ley de Aguas Nacionales*, Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1º de diciembre de 1992, Texto vigente última reforma publicada en el DOF 11-08-2014, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, "Usos del agua", en Comisión Nacional del Agua. *Estadísticas del agua en México*, Edición 2012, p. 35 a la 44. (rev. 16 de diciembre de 2014), disponible en:

http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_110814.pdf



USOS DEL AGUA **3**

Consumo de las distintas actividades económicas.

3.1 Clasificación de los usos del agua

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), se registran los volúmenes concesionados (o asignados para el caso de cantidades destinadas al uso público urbano o doméstico) a los usuarios de aguas nacionales.

En dicho registro se tiene clasificados los usos del agua en 12 rubros, mismos que para fines prácticos se han agrupado en tres grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos: el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y la generación de energía eléctrica, excluyendo hidroelectricidad,

y por último el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo.

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde al agrupado agrícola. Cabe destacar que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo.

Debe aclararse que para las centrales hidroeléctricas de uso no consuntivo la misma agua se turbinada y se contabiliza varias veces, en todas las centrales del país.



Referencia: 3, 25

Nota: U

T3.1 Usos consuntivos: origen y volumen

Uso	Origen		Volumen total	Porcentaje de extracción (%)
	Superficial	Subterráneo		
Agrícola	40.57	20.92	61.49	76.7
Abastecimiento público	4.33	7.11	11.44	14.3
Industria autoabastecida	1.47	1.73	3.20	4.0
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.63	0.44	4.08	5.1
TOTAL	50.01	30.20	80.21	100.0

Usos consuntivos agrupados según tipo de origen de fuente de extracción, 2010 (km³)

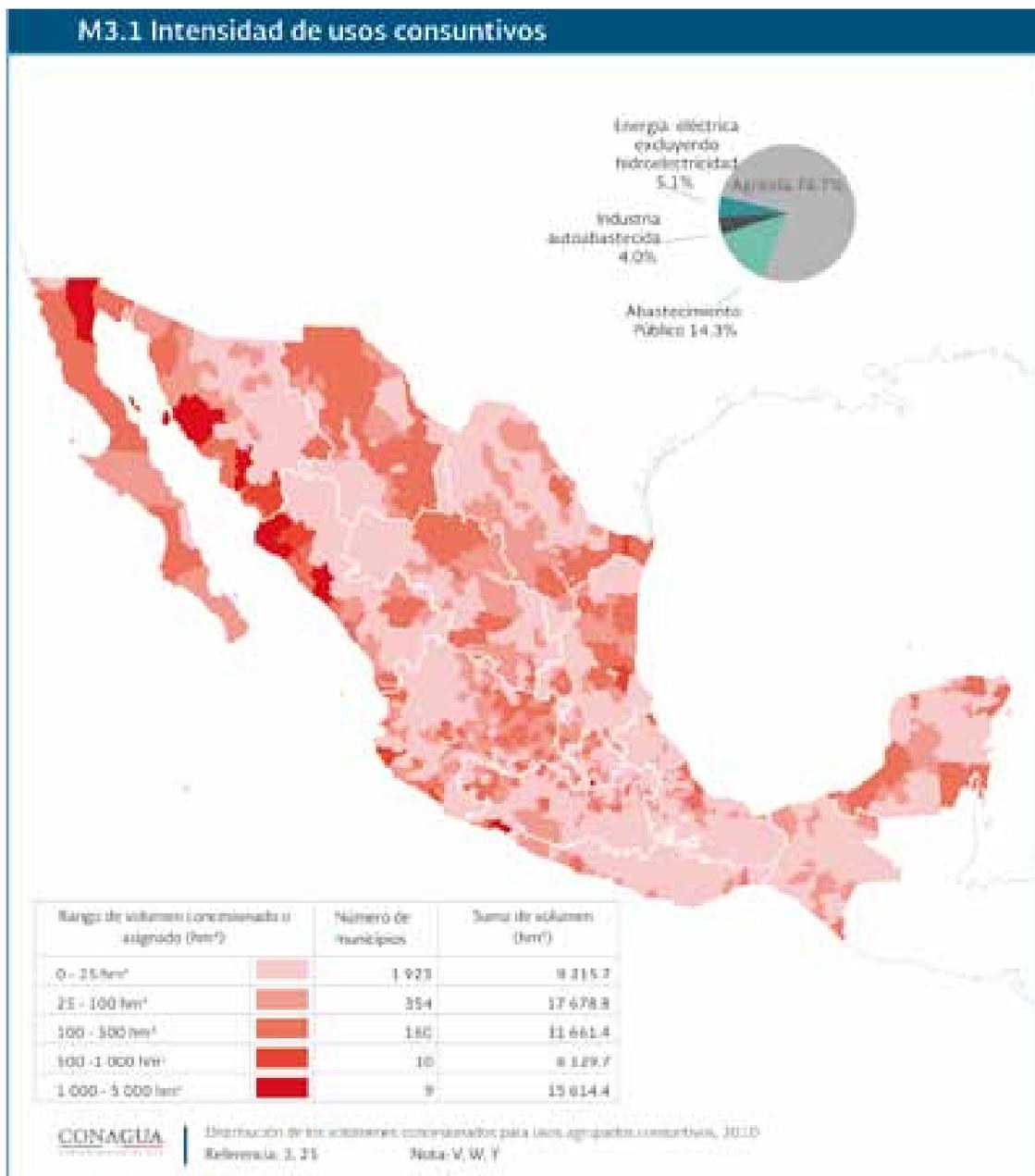
Referencia: 25

Nota: B, V, W, X

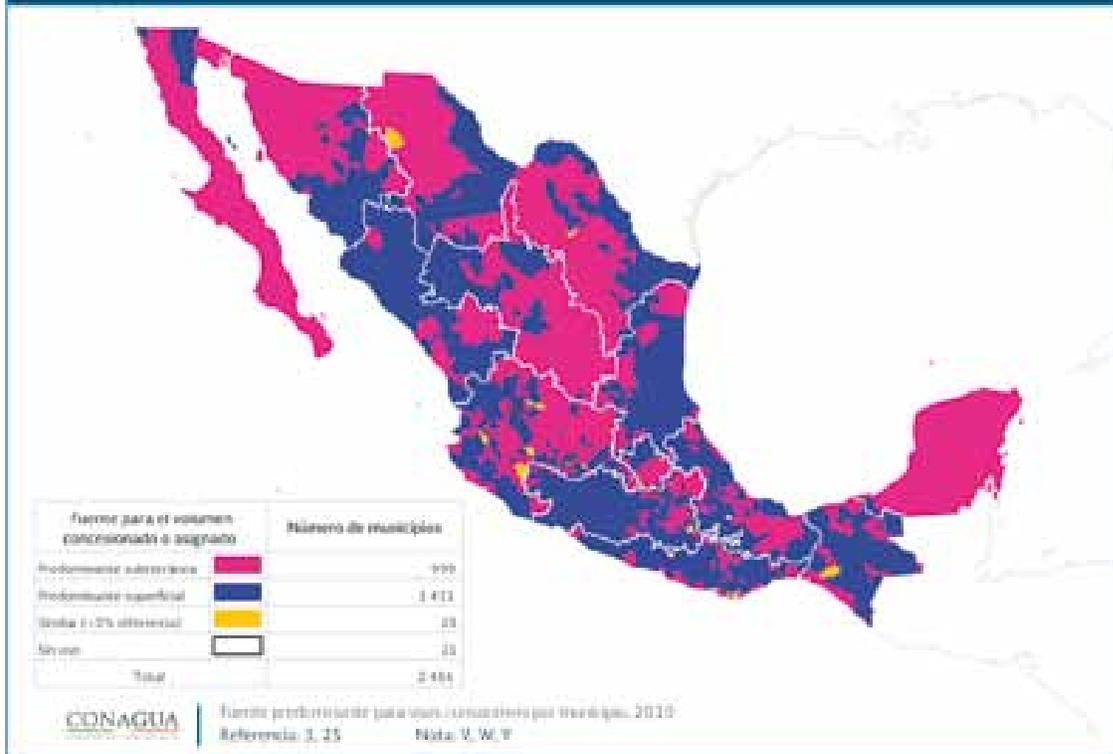
3.2 Distribución de los usos en el territorio nacional

El volumen se concede o asigna de fuentes superficiales y subterráneas. Cabe destacar que cuando existe una diferencia menor al cinco por ciento entre ambas fuentes se considera que no existe fuente predominante y se designa como fuentes similares.

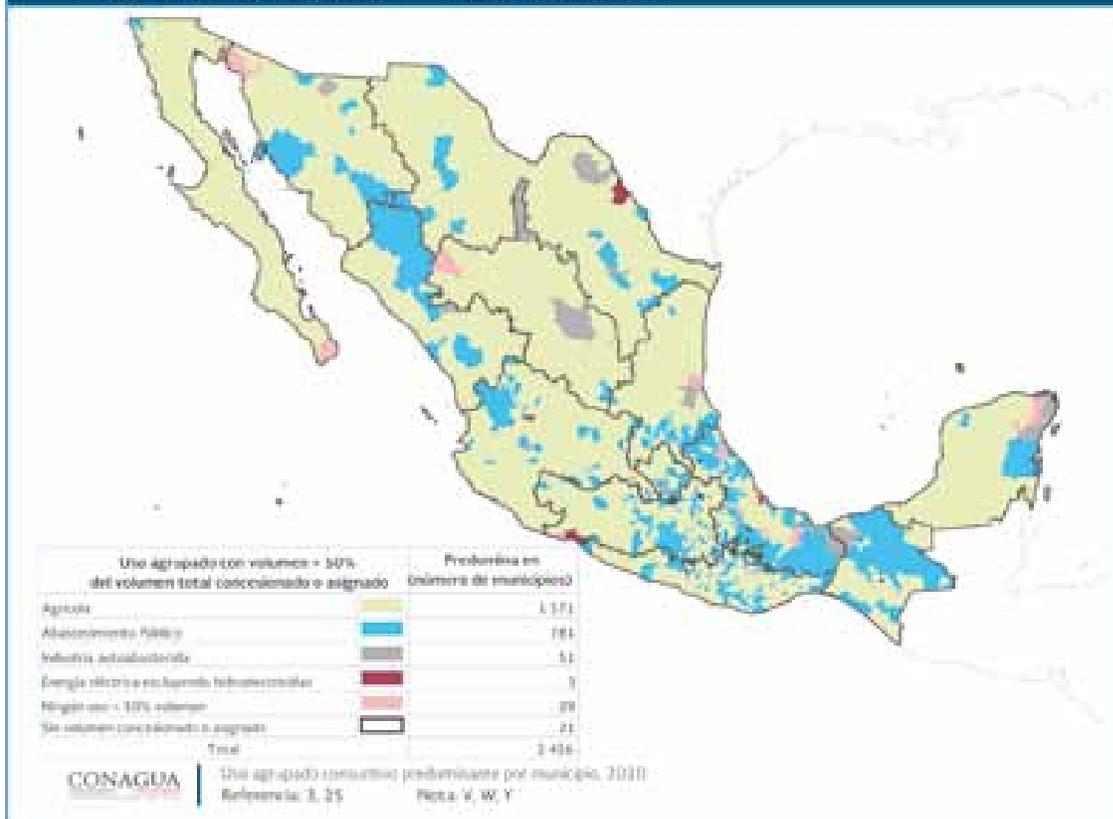
La distribución de los usos varía a lo largo del territorio nacional al considerar a nivel municipal los volúmenes concesionados o asignados, es posible establecer si algún uso agrupado predomina sobre el resto.



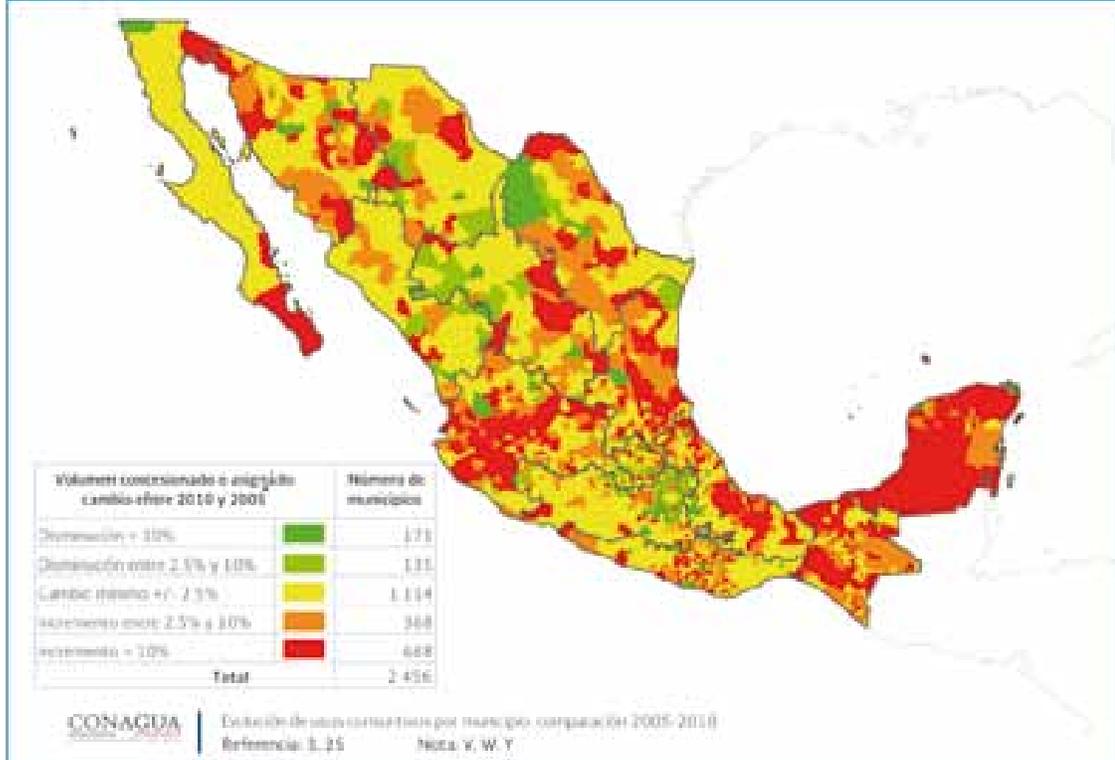
M3.2 Fuente predominante para usos consuntivos



M3.3 Uso agrupado consuntivo dominante



M3.4 Evolución de uso consuntivo



T3.2 Volúmenes por región

No	Región hidrológico-administrativa	Volumen concesionado o asignado	Agrícola	Abastecimiento público	Industria autoabastecida sin termoeléctricas	Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad
I	Península de Baja California	3 856.4	3 129.5	432.4	95.3	199.1
II	Noroeste	7 258.2	6 235.8	924.4	90.9	7.0
III	Pacífico Norte	10 376.1	9 679.6	640.0	56.4	0.0
IV	Balsas	10 358.1	5 958.8	1 012.3	216.8	3 170.2
V	Pacífico Sur	1 428.8	1 057.3	350.0	21.4	0.0
VI	Río Bravo	9 318.5	7 818.3	1 178.2	210.5	111.5
VII	Cuencas Centrales del Norte	3 700.5	3 222.0	369.5	80.6	28.3
VIII	Lerma Santiago Pacífico	14 550.0	11 944.9	2 134.8	449.6	20.7
IX	Golfo Norte	4 828.6	3 769.5	523.5	470.0	65.6
X	Golfo Centro	4 825.6	3 009.7	714.0	724.9	377.0
XI	Frontera Sur	2 162.7	1 605.1	456.6	100.9	0.0
XII	Península de Yucatán	2 843.8	1 728.8	589.5	516.5	9.1
XIII	Valle de México	4 706.2	2 330.8	2 117.7	168.1	89.6
Total		80 213.4	61 490.1	11 443.1	3 202.2	4 078.0

Volúmenes concesionados para usos consuntivos agrupados, por región hidrológico-administrativa, 2010 (hm³)

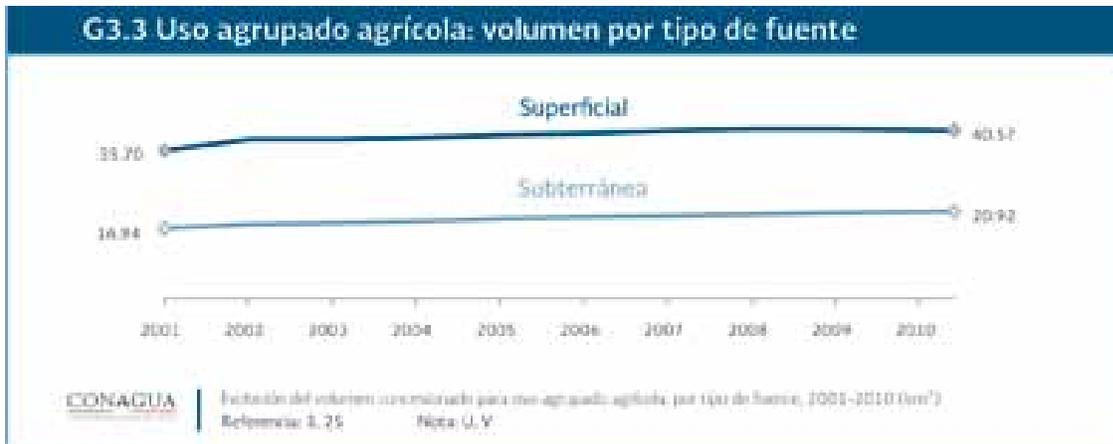
Referencia: 3, 25

Nota: V, W, Y

3.3 Uso agrupado agrícola

El principal uso agrupado del agua en México es el agrícola, el cual en términos de uso

de agua nacional se refiere principalmente al agua utilizada para riegos de cultivos.



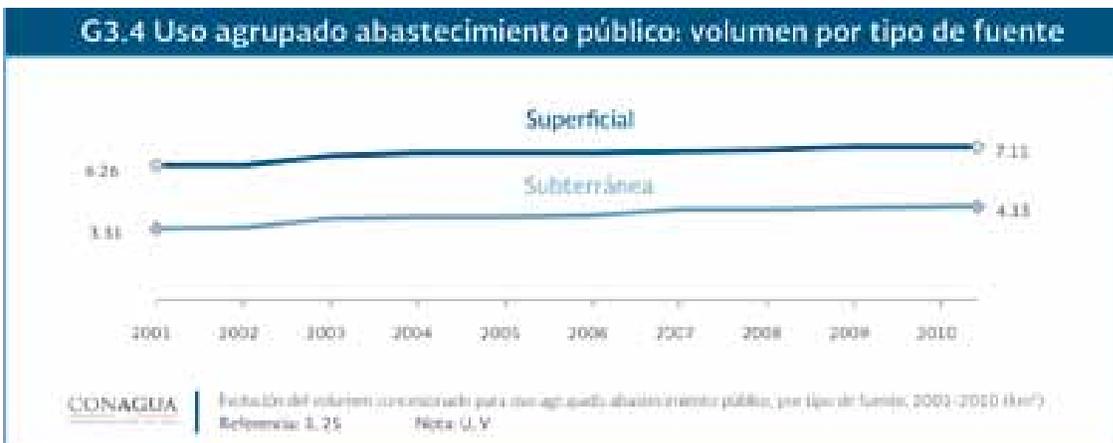
3.4 Uso agrupado abastecimiento público

El uso agrupado para abastecimiento público consiste en el agua entregada mediante las redes de agua potable, las que abastecen a los usuarios domésticos, así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes.

una de las demandas básicas de la población, pues incide directamente en su salud y bienestar general.

El disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es

Esta característica es reconocida por los instrumentos rectores de planeación nacional: el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 y el Programa Nacional Hídrico 2007-2012.

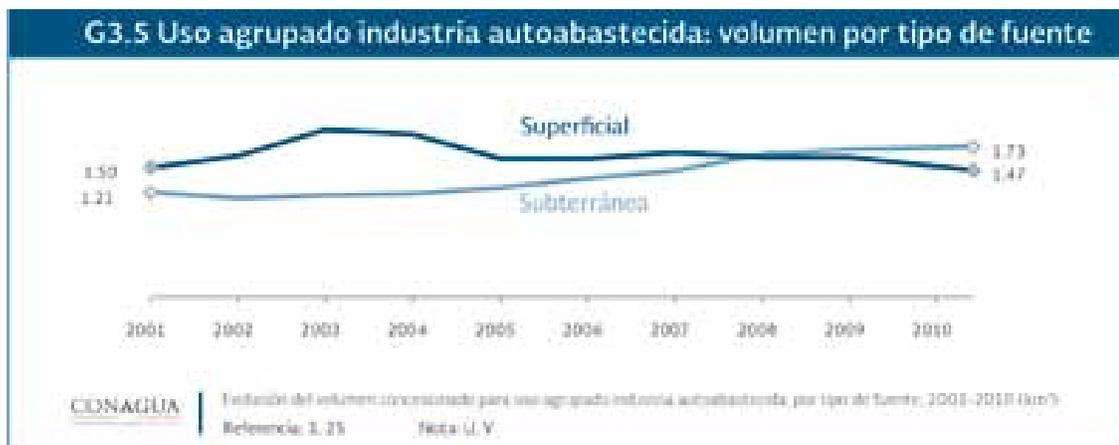


3.5 Uso agrupado industria autoabastecida

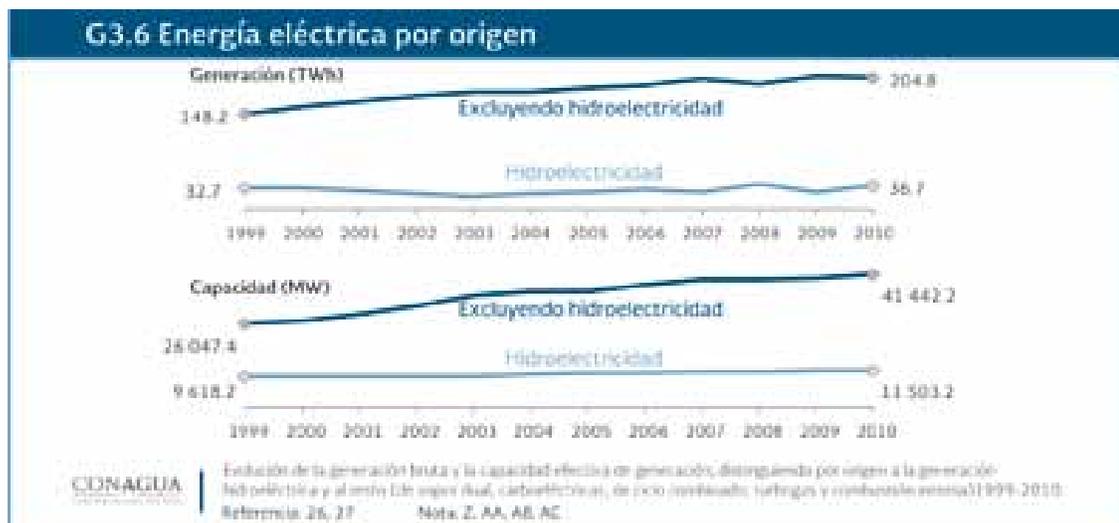
En este rubro se incluye la industria que toma el agua que requiere directamente de los ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país.

Conforme al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) las actividades secundarias, conocidas tradicionalmente como “la industria”,

están conformadas por los sectores de minería, electricidad, agua y suministro del gas por ductos al consumidor final, así como la construcción y las industrias manufactureras. Cabe destacar que la clasificación de usos de agua del REPDA no sigue precisamente esta clasificación, sin embargo se considera que existe un razonable nivel de correlación.



3.6 Uso energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad



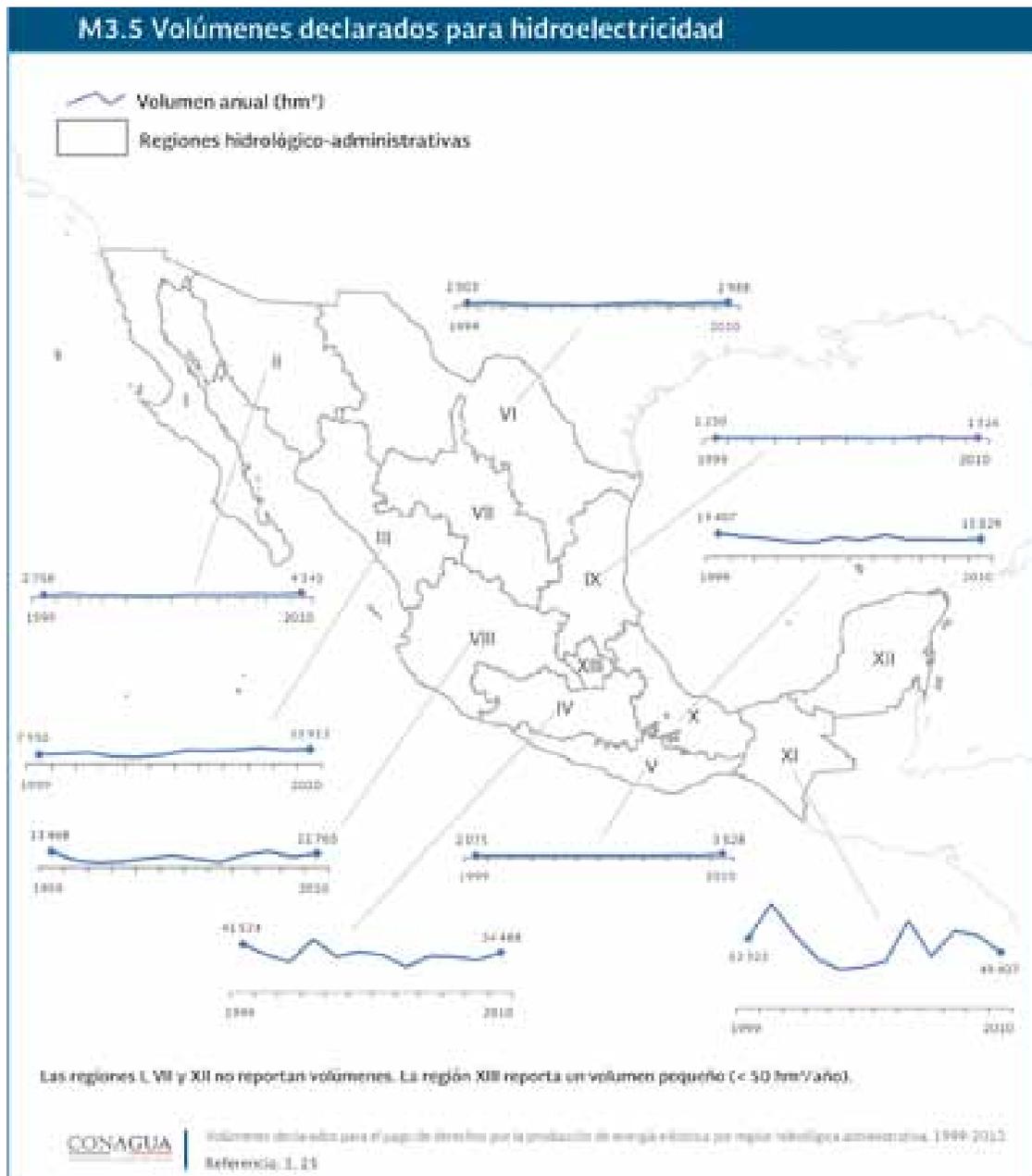
El agua incluida en este rublo se refiere a la utilizada en generación de energía excepto la hidroeléctricidad, por lo que

contempla centrales de vapor duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbogas y de combustión interna.

3.7 Uso en hidroeléctricas

Las regiones hidrológico-administrativas IV Balsas, y XI Frontera Sur tienen la concesión de agua más importante en este

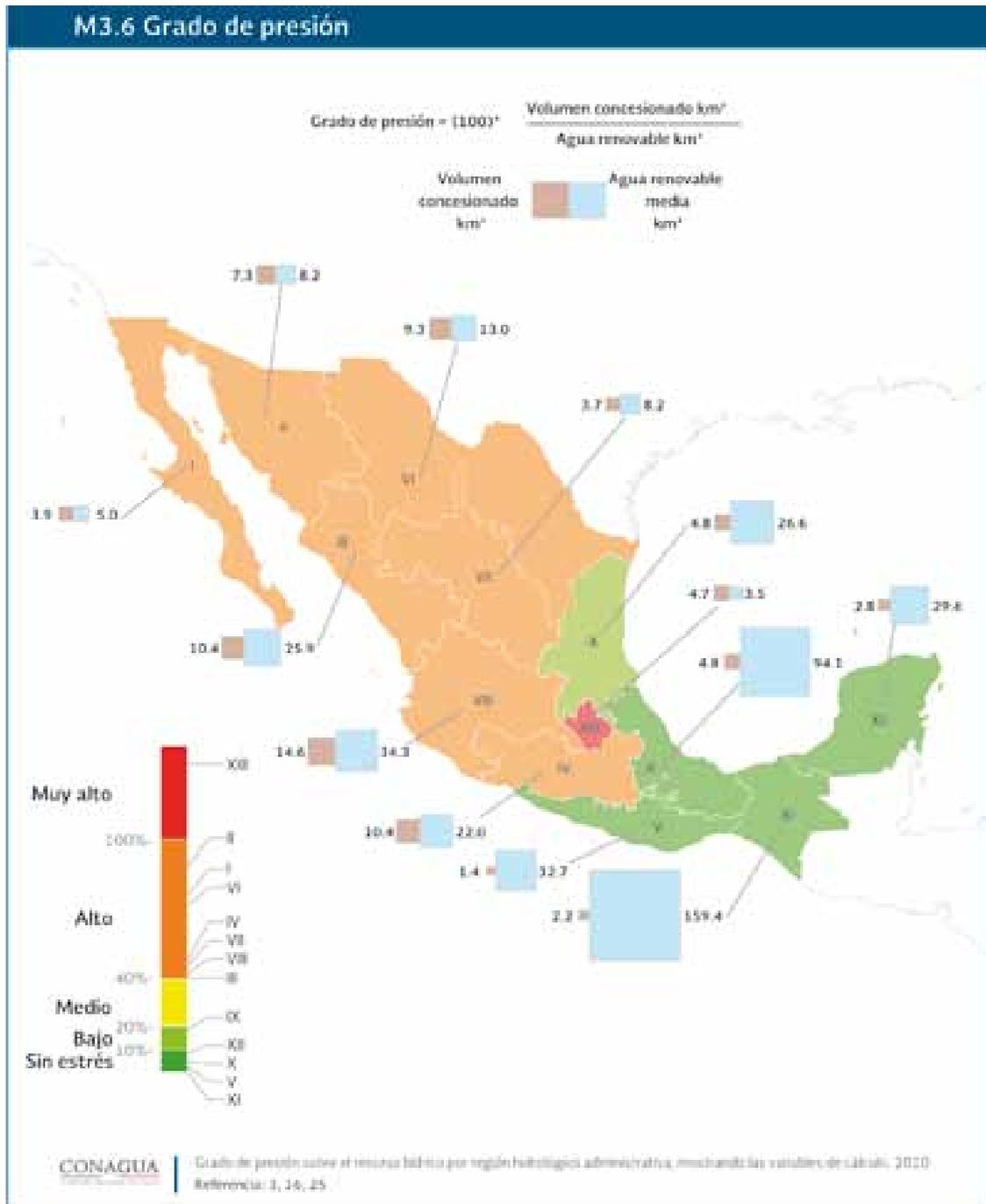
uso, ya que en ellas se localizan los ríos con mayor caudal y las centrales hidroeléctricas más grandes del país.



3.8 Grado de presión sobre el recurso

El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto al agua renovable es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico.

Se considera que si el porcentaje es mayor al 40 por ciento se ejerce una fuerte presión sobre el recurso.

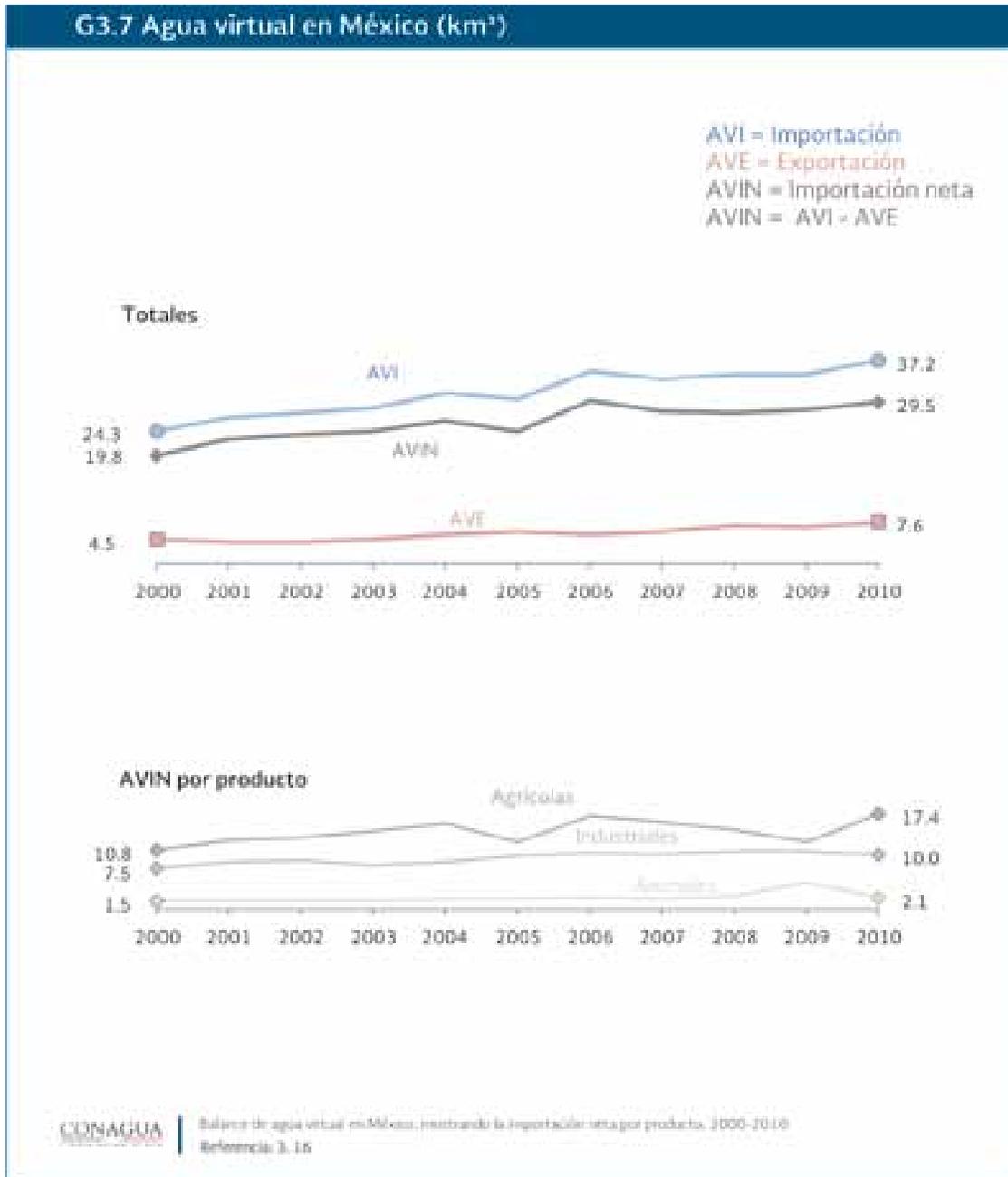


3.9 Agua virtual en México

El agua virtual se define como la cantidad total de este líquido que se utiliza o se integra a un producto, bien o servicio.

mil litros de agua, mientras que para llevar un kilogramo de carne de res a la mesa de una persona, se requieren 13 mil 500 litros; estos valores varían según el país.

Por ejemplo para producir un kilogramo de trigo en México se requiere en promedio



2. HUELLA HÍDRICA Y AGUA VIRTUAL

2.1 ANTECEDENTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES

Fuente: Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica, WWF, SAB-Miller y Agroder, 2012, p. 3 – 8. (Rev. 17 de diciembre de 2014). Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/AgroDer,%202012.%20Huella%20h%C3%ADdrica%20en%20M%C3%A9xico.pdf>

INTRODUCCIÓN

Si únicamente pudiéramos ver el 4% de lo que pasa a nuestro alrededor, seguramente habría muchas cosas que no percibiríamos, no nos daríamos cuenta que ahí están ni mucho menos podríamos hacer algo con o por ellas.

Este es el caso del agua. Ahorrar y usarla eficientemente es algo que hemos escuchado por muchos años: cerrar la llave mientras nos enjabonamos, no lavar autos con manguera y usar solo un vaso para lavarnos los dientes. Sin embargo, el agua de consumo doméstico (aquella que vemos correr frente a nuestros ojos mientras lavamos nuestras manos, los platos, regamos el jardín, o la utilizamos en casa) es solo el 4% del agua que utilizamos en nuestras actividades diarias.

Al intercambiar productos y servicios, también se intercambian grandes cantidades de agua. Lo que comemos en un día, la ropa que usamos, la energía que consumimos, y todos los productos con los que estamos en contacto requirieron agua en distintas cantidades para su creación, producción o generación. Por esto, al comercializar productos, también estamos comercializando el agua que implicaron sus procesos productivos.

El impacto que tienen las actividades humanas en el recurso hídrico ha sido contabilizado de distintas maneras. Una visión integral debe considerar como parte de nuestro consumo el volumen de agua que extraemos de

cuerpos superficiales y subterráneos, el agua de lluvia que utilizamos para crecer cultivos, la que se evapora debido a sistemas de almacenamiento y el agua contaminada.

El momento en que el agua se utiliza y el lugar del que se obtiene son de gran relevancia: su valor e impactos serán distintos en la temporada de lluvias que en la de estiaje, así como en una zona tropical con lluvias todo el año que en un desierto donde hay extensiones muy grandes de terreno sin ninguna laguna o río.

Cuando sumamos el conjunto de usos de agua en una región, encontramos sitios en los que la inadecuada distribución de la misma ha afectado a los ecosistemas, que quedan al final en la distribución del agua que no se utiliza para abasto público, agricultura, industria y generación de energía, y que muchas veces se ha repartido totalmente.

Es imprescindible tener en cuenta todos estos factores para entender las condiciones en que el agua es utilizada por la sociedad, y así tomar conciencia sobre la magnitud del impacto que nuestro aprovechamiento del recurso tiene sobre su disponibilidad y sobre los ecosistemas. Sólo de esta manera podremos explicar por qué se habla tanto de estrés hídrico y escasez, y por qué el agua se ha convertido en un tema de debate alrededor del mundo.

¿QUÉ ES HUELLA HÍDRICA Y QUÉ ES AGUA VIRTUAL?

EL AGUA QUE USAMOS



96%

Agua que consumimos indirectamente

4%

Agua que vemos

Para vivir requerimos agua, es el elemento esencial de nuestro ser. No obstante, el agua que bebemos no es la única que consumimos, también lo hacemos al bañarnos, lavar trastes, limpiar, regar, cocinar y muchas otras actividades que implican que veamos agua correr frente a nuestros ojos todos los días. Todo esto representa un gran consumo, sin embargo, sólo constituye el uso directo y representa una proporción mínima de nuestro uso total de agua.

Además de nuestro uso directo, cada vez que consumimos un alimento o utilizamos algún producto o servicio, indirectamente aprovechamos el agua involucrada en sus procesos de producción, que es donde utilizamos la mayor parte del agua.

Al darnos cuenta que la mayor parte de nuestro consumo de agua es indirecto, se ha hecho necesario cuantificar los volúmenes de agua que están “escondidos” detrás de la fabricación o elaboración de cada producto.

Por ejemplo, cuando bebemos una taza de café, generalmente pensamos que consumimos 125 ml de agua. No obstante, para crecer el grano se requirió agua, que pudo ser agua de lluvia o riego, lo mismo que para los procesos de secado, tostado, molido y empaquetado. En promedio, para nuestra taza de café fueron necesarios 140 litros de agua durante todo su proceso de elaboración. A esta cantidad de agua se le conoce como agua virtual (AV).



También es preciso tomar en cuenta que hay procesos productivos que aunque no consumen agua, la contaminan (como el lavado de autos o vertido de aguas residuales a cuerpos de agua), y otros más que sí utilizan agua, pero ésta es devuelta al ecosistema en el mismo lugar del que fue extraída sin estar contaminada (como las hidroeléctricas). Otro factor importante es que el agua no se distribuye homogéneamente en el mundo y a lo largo de los meses y años: hay lugares y épocas más secas, y otras en donde llueve más.

Con la intención de tomar todos estos factores en cuenta y poder contabilizar lo que el comercio de productos entre regiones implica en materia de agua, fue creado el concepto de huella hídrica (HH), que toma en cuenta toda el agua que de alguna manera nos apropiamos para nuestras actividades, con lo que alteramos el ciclo del agua en el planeta. La HH puede aplicarse a productos, regiones, organizaciones o personas, y puede referirse a la producción o al consumo.

AGUA VIRTUAL Y HUELLA HÍDRICA

Agua virtual

El agua que es usada a lo largo de la cadena de procesos para elaborar un producto final es lo que se considera como agua virtual (AV) de un producto.

Huella hídrica

La huella hídrica (HH) es un indicador de toda el agua que utilizamos en nuestra vida diaria; la que utilizamos para producir nuestra comida, en procesos industriales y generación de energía, así como la que ensuciamos y contaminamos a través de esos mismos procesos.

Nos permite conocer el volumen de agua que aprovecha ya sea un individuo, un grupo de personas o consumidores, una región, país o la humanidad en su conjunto.

Contenido de Agua Virtual de productos comunes

Producto	Mililitros o Gramos	Agua Virtual (litros)
Playera de algodón	250 g	2,000
Hoja de papel A4	80g/m ²	10
Microchip	2g	32
Par de zapatos	piel bovina	8,000
Taza de café	125 ml	140
Vaso de jugo de naranja	200 ml	170
Vaso de leche	200 ml	200
Huevo	40 g	135
Copa de vino	125 ml	120
Vaso de cerveza	250 ml	75
Jitomate	70 g	13
Hamburguesa	150 g	2,400

Fuente: Hoekstra, A. y Chapagain, 2006.

DIFERENCIAS BÁSICAS ENTRE HUELLA HÍDRICA Y AGUA VIRTUAL

La huella hídrica (HH) es un concepto que se refiere al agua utilizada en la creación de un producto.

En este contexto, podemos hablar del “contenido de agua virtual” de un producto, en lugar de su huella hídrica. Sin embargo, la HH tiene una aplicación más amplia. Podemos, por ejemplo, hablar de la HH de un consumidor a través de la HH de cada producto y servicio que consume; o bien de un productor (negocios, manufactura o proveedores de servi-

cios) a través de la HH de los bienes y servicios que elabora.

El concepto de HH no sólo se refiere a volumen como el “contenido de agua virtual”. La HH es un indicador multidimensional que hace explícito el lugar de origen, la fuente (color) y el momento en que el agua es utilizada y regresada (al lugar de origen o bien a otro lugar).

¿DE QUÉ SE COMPONE LA HUELLA HÍDRICA?

▶ ESCASEZ DE AGUA Y ESTRÉS HÍDRICO

La Escasez de Agua, según la definición de ONU Agua, es el momento en el que los impactos acumulados de todos los usuarios afectan la oferta y calidad del agua hasta el punto en que la demanda de todos los sectores, incluyendo el ecosistema, no puede ser cubierta o satisfecha en su totalidad.

Para Hoekstra, la Escasez de Agua Azul, se define como la proporción entre la huella hídrica azul y la disponibilidad de agua del mismo color. El agua azul comprende la escorrentía natural (a través de ríos y agua subterránea) de una cuenca, menos los requerimientos hídricos ambientales.

Estrés Hídrico, según la definición de UNEP, ocurre cuando la demanda por agua excede la cantidad disponible de ésta durante un cierto periodo, o bien cuando la calidad es tan pobre que restringe su uso. El estrés hídrico provoca el deterioro de los recursos de agua dulce en términos cuantitativos (sobreexplotación de mantos acuíferos, desecamiento de ríos) y cualitativos (eutrofización, intrusión salina, contaminación, entre otros).

La HH considera únicamente el agua dulce y se conforma de 4 componentes básicos:

- Volumen
- Color/clasificación del agua
- Lugar de origen del agua
- Momento de extracción del agua

Identificar estos datos nos da la base para el análisis de la huella hídrica, que además debe tomar en cuenta factores locales para dar un contexto real y útil al concepto; es decir, evaluar los impactos en tiempo y espacio de la extracción del agua y su retorno como agua residual o tratada, la afectación al régimen hidrológico, la importancia ecológica de la zona, la productividad del agua, las condiciones de escasez o estrés hídrico imperantes, los usos locales del agua y el acceso de la población al recurso, impactos en la cuenca baja y otros criterios que puedan incidir en el mantenimiento de un balance sustentable y equitativo del agua en cada cuenca hidrológica.

La HH considera la fuente de donde proviene el agua y, en función de ello, la clasifica en 3 tipos o colores: azul, verde y gris. Los costos de oportunidad, el manejo y los impactos para cada uno difieren significativamente para cada color.



AGUA AZUL

Se denomina así a la que se encuentra en los cuerpos de agua superficial (ríos, lagos, esteros, etc.) y subterráneos. La huella hídrica azul se refiere al consumo de agua superficial y subterránea de determinada cuenca, entendiendo consumo como extracción. Es decir, si el agua utilizada regresa intacta al mismo lugar del que se tomó dentro de un tiempo breve, no se toma en cuenta como HH.



AGUA VERDE

Es el agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad, siempre y cuando no se convierta en escorrentía. Igualmente, la huella hídrica verde se concentra en el uso de agua de lluvia, específicamente en el flujo de la evapotranspiración del suelo que se utiliza en agricultura y producción forestal.



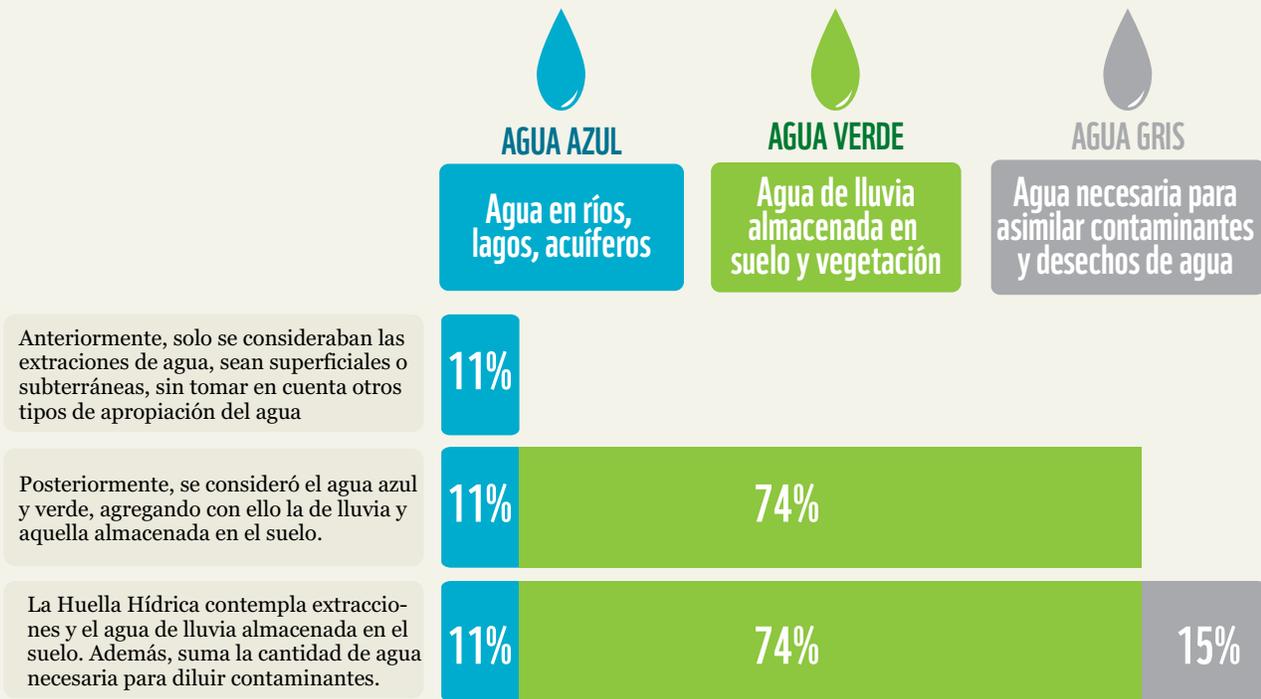
AGUA GRIS

Es toda el agua contaminada por un proceso. Sin embargo, la huella hídrica gris no es un indicador de la cantidad de agua contaminada, sino de la cantidad de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales conocidas de éstos y los estándares locales de calidad del agua vigentes.

La suma del agua verde, el agua azul y el agua gris que requiere un producto o servicio dentro de todo el proceso de elaboración será su **huella hídrica**.

CAPÍTULO 1

USAS MÁS AGUA DE LA QUE VES



Anteriormente, solo se consideraban las extracciones de agua, sean superficiales o subterráneas, sin tomar en cuenta otros tipos de apropiación del agua

Posteriormente, se consideró el agua azul y verde, agregando con ello la de lluvia y aquella almacenada en el suelo.

La Huella Hídrica contempla extracciones y el agua de lluvia almacenada en el suelo. Además, suma la cantidad de agua necesaria para diluir contaminantes.

¿CUÁL ES EL SENTIDO DE LA HUELLA HÍDRICA?

Este concepto aporta un enfoque más amplio, que nos permite visualizar y tomar en cuenta el consumo real de agua de las actividades humanas, y relacionarlo con factores antes considerados externos, tales como el comercio. Así, nos permite cambiar el modo en que se han abordado los problemas de agua a nivel global a través del concepto de agua virtual, que incorpora al análisis los flujos de agua implícitos en el intercambio de mercancías.

Pretende, a su vez, ser una herramienta de planeación del manejo del recurso hídrico, que al añadirse al resto de indicadores que ya existen, brinde una visión más integral del impacto que tiene la población humana en el ambiente y en los ecosistemas. Como elemento en el diseño de planes, políticas, programas y proyectos en todos los niveles, sustenta la toma de decisiones de una manera más acorde con las necesidades actuales en distintas regiones.

También es útil para generar conciencia sobre el esfuerzo hídrico que implica nuestro estilo de vida. Permite conocer más a fondo el impacto que tienen los patrones de consumo de una región o país en el sitio donde son producidos los bienes importados.

¿CÓMO SE MIDE LA HUELLA HÍDRICA?

Para un producto, es el contenido total de agua azul, verde y gris involucrada en toda la cadena de procesos de elaboración del mismo.

La HH de una persona se obtiene de sumar la HH de todos los productos, bienes y servicios que consume y utiliza.

La HH de producción de un país se obtiene de sumar el agua verde, azul y gris en todos sus procesos productivos agropecuarios, así como el agua azul y gris de los industriales y domésticos.

La HH de consumo de un país es lo que produce para consumir (quitando las exportaciones), y lo que importa para consumo.

La HH externa es la proporción del consumo de un país que fue producido en otro país.

Transferencias de Agua Virtual: El contenido de agua virtual transferido a otros países mediante el comercio de productos.

¿QUÉ TIENE QUE VER CONMIGO?

Nuestros patrones de consumo y producción involucran mucha agua, y quizá tienen efectos en otra región del país o del mundo.

Los hábitos alimenticios, patrones de consumo y estilo de vida (transporte, tecnología, entretenimiento, ocupación, aficiones) son los factores que determinan la magnitud de nuestra huella hídrica individual, es decir, qué tanta agua es necesaria para que podamos vivir de la forma en que lo hacemos. Debemos considerar que, invariablemente, la cantidad de agua que se utilizó en un proceso fue a costa de otro posible uso, o del agua que requieren los ecosistemas.

Los principales factores que determinan la huella hídrica de una región o país, son:

- Prácticas agropecuarias
- Hábitos alimenticios de los habitantes
- Patrones de consumo de los habitantes
- Tipo de industria y grado de tecnificación

Fuente: WFN, 2011

▶ CONCEPTOS IMPORTANTES

El **uso no consuntivo** del agua se refiere a aquel en el que, después de usarse, el volumen es reintegrado al mismo cuerpo de agua de donde fue extraído originalmente, en la misma cantidad y calidad, es decir, no contaminada. Por ejemplo, para generar energía hidroeléctrica generalmente el agua es regresada a la misma fuente después de su uso; también en algunas formas de navegación y uso recreativo el agua no se extrae y permanece en el río o lago, con la misma calidad y cantidad.

El **uso consuntivo** se refiere al agua que se extrae de la fuente de agua y no regresa totalmente en la misma calidad y cantidad. El riego es un uso consuntivo, ya que el agua se incorpora a los cultivos, es evapotranspirada y la mayor parte no regresa a la fuente original. El abastecimiento humano también es un uso consuntivo. La métrica utilizada para calcular flujos de agua virtual y huella hídrica se enfoca en usos consuntivos.

Sitios críticos o hot spots

Los *hot spots* se identifican con base en 2 criterios:

- 1) que la HH sea significativa en ese lugar y periodo del año; y
- 2) que existan problemas de escasez de agua y contaminación en ese lugar durante ese periodo.

2.2 HUELLA HÍDRICA EN EL MUNDO

Fuente: Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica, WWF, SAB-Miller y Agroder, 2012, p. 12 – 24. (Rev. 17 de diciembre de 2014). Disponible en:

<http://www.huellahidrica.org/Reports/AgroDer,%202012.%20Huella%20h%C3%ADdrica%20en%20M%C3%A9xico.pdf>

**ALGODÓN:
COMERCIO CON ALTA
HUELLA HÍDRICA**



En promedio se utilizan 11,000 litros de agua para producir 1 kg de algodón en el mundo, lo que lo hace uno de los cultivos de mayor consumo de agua. En 2009, los principales productores fueron: China 25% del total mundial, EUA el 20%, y la India, el 15%. México produjo 278 mil toneladas (lugar 26°).

Es el producto mediante el cual Norteamérica importa la mayor cantidad de AV, representa 45% de las importaciones de EUA, 41% de México y 27% de Canadá.

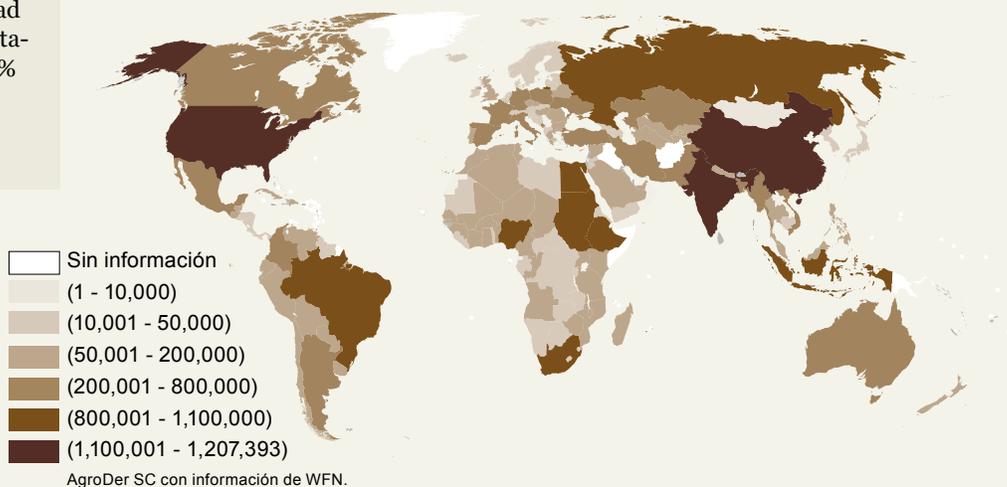
Fuente: AgroDer, con información de WFN 2010 y FAOSTAT 2011.

¿CÓMO FLUYE POR EL MUNDO?

Las actividades productivas que se desarrollan en cada país son distintas y definen su estructura económica: hay naciones con vocación agropecuaria, otras con un mayor auge industrial y algunas más que se han enfocado en los servicios.

La manera en que cada sector en los distintos países da un uso productivo al agua da forma a su huella hídrica de producción. Este indicador refleja la cantidad de agua que emplea un país en producir tanto lo que consume como lo que exporta.

Huella hídrica de producción (Hm³/año)



**HUELLA HÍDRICA
EN EL MUNDO**



La huella hídrica mundial se estima en 9,087 Km³ al año:

- 74% verde
- 11% azul
- 15% gris

El 92% está relacionado con actividades agrícolas.

El 38% de la huella hídrica de producción está en sólo 3 países:

- China (1,207 Km³)
- India (1,182 Km³)
- Estados Unidos (1,053 Km³)

China es el país con mayor huella hídrica gris (26% del total mundial).

China (22%) y EUA (18%) tienen la mayor huella hídrica de producción industrial.

China, India y EUA tienen la mayor HH de consumo (1,368 Km³, 1,145 Km³ y 821 Km³). Esto se debe a:

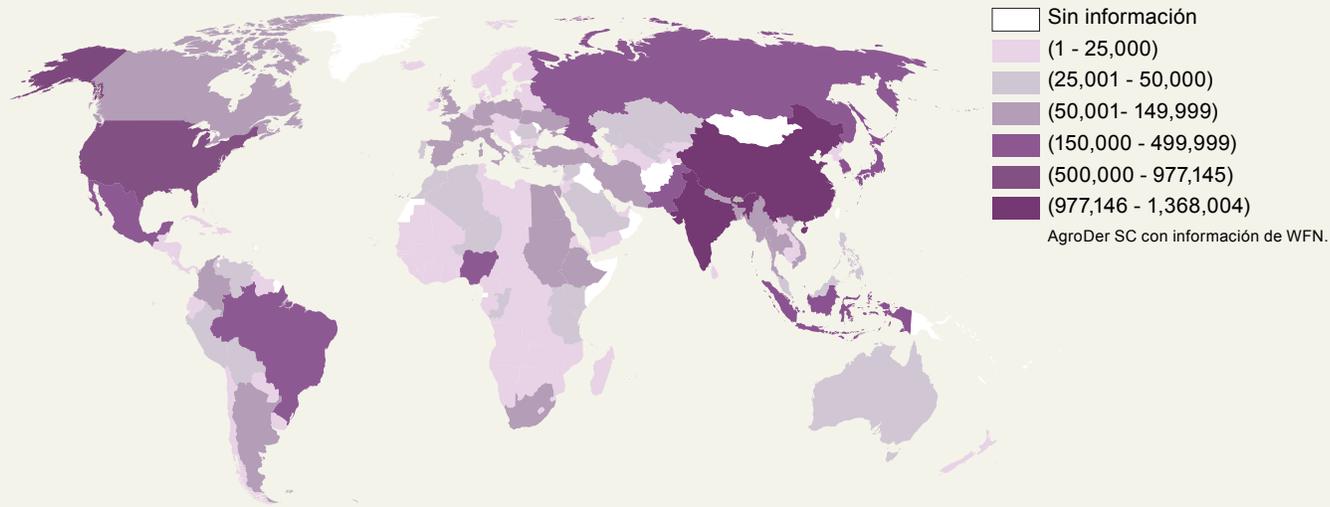
- Tamaño de la población
- Hábitos de consumo

La HH de alimentos en el mundo se distribuye en:

- 27% cereales
- 22% carne
- 7% derivados lácteos
- 44% otros productos

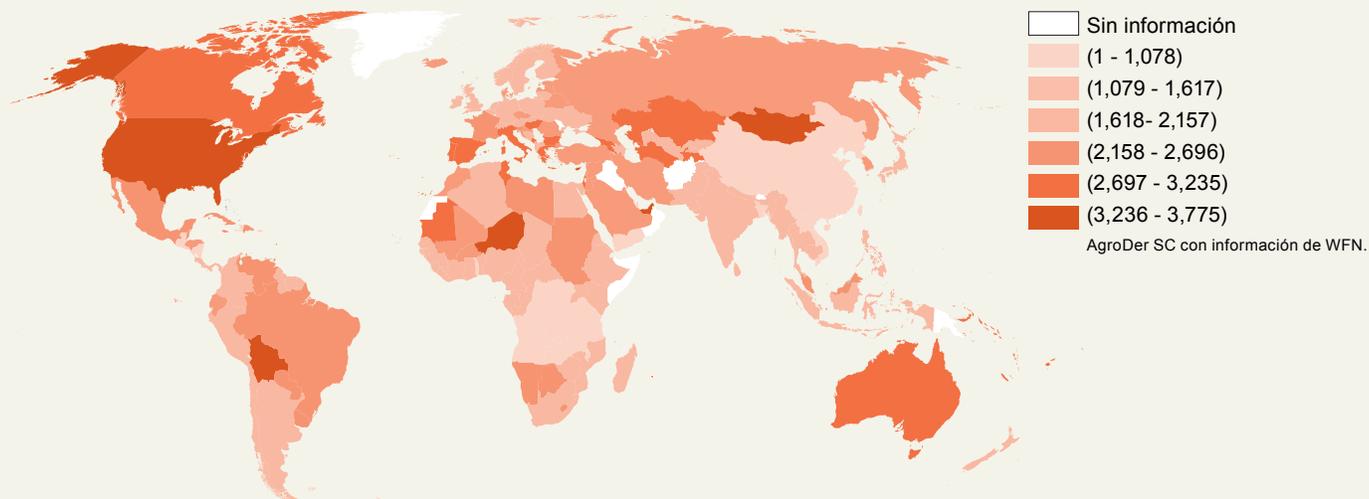
Huella hídrica de consumo (Hm³ / año)

Dado que cada país tiene costumbres y hábitos de consumo distintos, tanto de alimentos como de bienes y servicios, la huella hídrica varía para cada región. Generalmente las naciones con mayor cantidad de habitantes tienen una mayor huella hídrica de consumo.



Huella hídrica de consumo *per cápita* (m³ / año)

Al identificar la huella hídrica de consumo por habitante, vemos cómo inciden directamente en ella los patrones de consumo del respectivo país, disparados generalmente por el poder adquisitivo de sus ciudadanos. Algunas excepciones ocurren cuando, a pesar de tener bajos niveles de consumo, los productos fueron elaborados involucrando mucha agua en sus procesos. Tal es el caso de Mongolia, Nigeria y Bolivia.

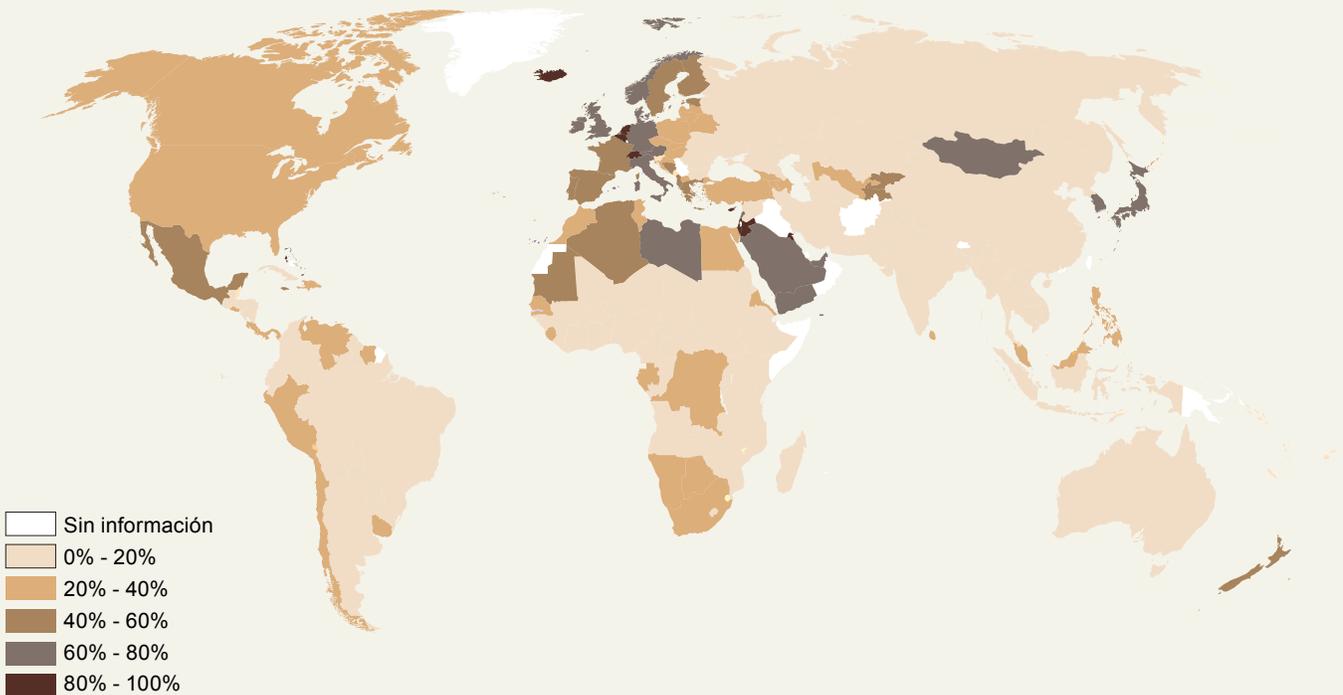


El comercio internacional facilita el acceso a productos que no se producen en el país de origen del consumidor, o bien, que al ser producidos en otra región pueden tener una mejor calidad o un costo más bajo, lo que los hace más atractivos para el consumidor.

El agua utilizada en lo que se produce en cada país y es consumido al interior del mismo se llama huella hídrica interna. Muchos países, para satisfacer sus necesidades de consumo importan diversos artículos, con lo que indirectamente importan el agua que se utilizó para fabricarlos o producirlos. A esta importación se le llama huella hídrica externa, que es la cantidad de agua requerida para elaborar los productos consumidos y que fueron elaborados en otro país. Los impactos que tiene este consumo de agua quedan íntegramente en el lugar de origen de los productos, es decir, se externalizan y regularmente los países importadores no toman responsabilidad ni sufren directamente las consecuencias por el impacto de la HH en la cuenca del país productor.

Entre mayor sea la proporción de HH de productos locales sobre los importados, se dice que el país es más autosuficiente en términos de HH. Por el contrario, si la proporción de HH de las importaciones es mayor, el país será más dependiente del agua de otras regiones del mundo.

Huella hídrica externa (% del total de HH de consumo)

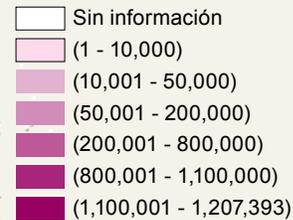


AgroDer SC con información de WFN.

CAPÍTULO 2 EL AGUA FLUYE POR TODAS PARTES

Exportaciones de agua virtual (Hm³ / año)

Por su estructura económica y productiva, hay países que exportan grandes cantidades de productos a distintas regiones del planeta, siendo también grandes exportadores de agua.



AgroDer SC con información de WFN.

Importaciones de agua virtual (Hm³ / año)

Un país puede ser exportador e importador de agua virtual al mismo tiempo, como reflejo de sus transacciones internacionales.



AgroDer SC con información de WFN.

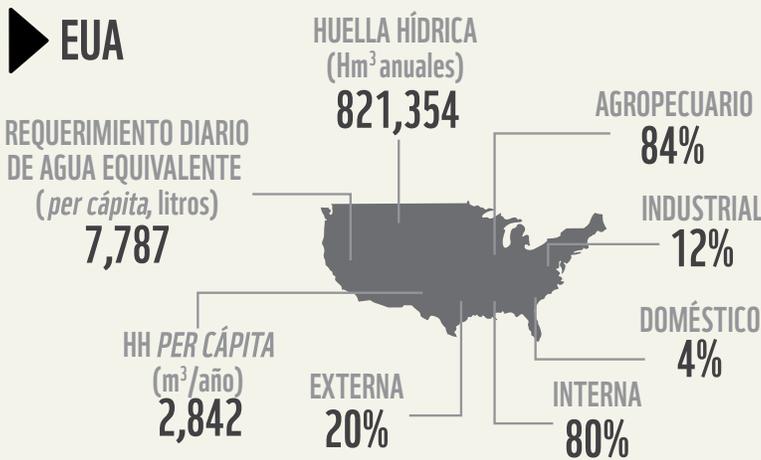
Balance de agua virtual (Hm³ / año)

Como resultado de lo anterior, tenemos países que son exportadores de agua virtual y otros que son importadores. Estos se diferencian según su balance de agua. Un balance positivo significa que se importa más agua de la que se exporta.



AgroDer SC con información de WFN.

¿QUÉ PASA EN NORTEAMÉRICA?



NORTEAMÉRICA EN CIFRAS

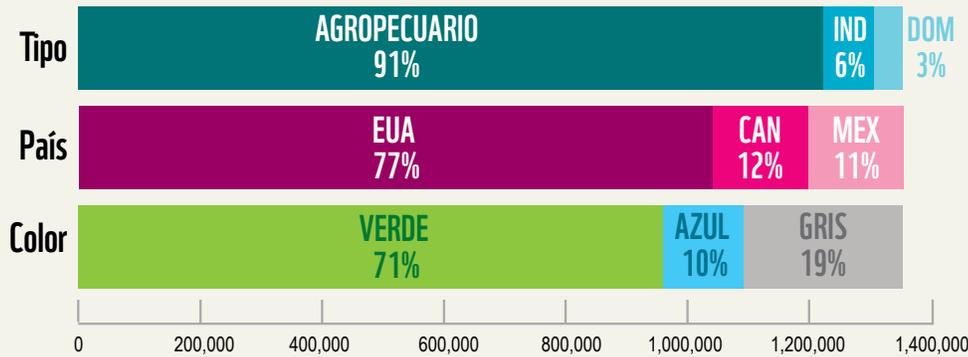
	México	EUA	Canadá
Población (millones)	114	313	34
Edad Promedio	27.1	36.9	41
Tasa de Crecimiento	1.10%	0.96%	0.79%
Migración	↓ -3.24	↑ 4.18	↑ 5.65
Población Urbana	78%	82%	81%
Expectativa de vida	76.47	78.37	81.38
Alfabetismo	86.1%	99.0%	99.0%
PIB (trillones de \$US)	\$1.57	\$14.66	\$1.33
PIB per cápita	\$13,900	\$47,200	\$39,400
PIB por sector	Primario 4% Industrial 33% Servicios 64%	1% 22% 77%	2.20% 26.30% 71.50%
Población por debajo de la línea de la pobreza	18.20%	15.10%	9.40%
Exportaciones (billones de \$US)	\$299	\$1,289	\$393
Importaciones (billones de \$US)	\$306	\$1,936	\$401

	México	EUA	Canadá
Área (miles de km ²)	1,964	9,827	9,985
Tierra	1,944	9,162	9,094
Cuerpos de agua	20	665	891
Línea de costa (km)	9,330	19,924	202,080
Uso de la tierra	Tierra arable 12.7% Cultivos 1.3% Otros 86.1%	18.0% 0.2% 81.8%	4.6% 0.7% 94.8%
Área cultivable	63,000	230,000	8,550
Recursos hídricos renovables totales (km ³)	457	3,069	3,300
Ext. de agua dulce (km ³ /año)	Totales 78.22 Dom. 17% Ind. 5% Agro. 77%	477 13% 46% 41%	44.72 20% 69% 12%
Per cápita (m ³ /año)	731	1,600	1,386
Acceso a agua	94%	99%	100%

AgroDer SC con información de WFN, 2011.

**HUELLA HÍDRICA DE PRODUCCIÓN EN NORTEAMÉRICA
POR TIPO, PAÍS Y COLOR (Hm³/AÑO)**

NA= 15% de la HH de producción el mundo



Norteamérica (NA) representa el 14.5% de la superficie en el mundo, el 7.5% de su población y el 27% del PIB (WB Databank, 2012). En esta región se ubica el 15% de la HH de producción en el mundo, mayoritariamente originada por el sector agropecuario.

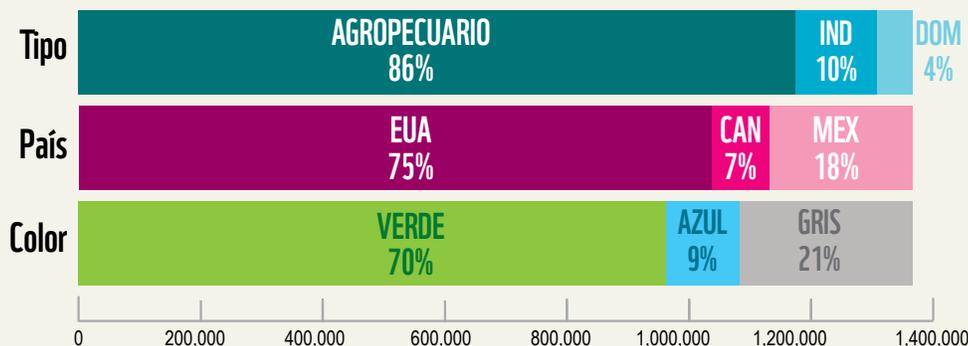
**HUELLA HÍDRICA POR PAÍS Y COLOR
(Hm³/AÑO)**



Tres cuartas partes de la población, 40% de la superficie y 83% del PIB de NA corresponden a EUA (WB Databank, 2012). De igual manera, el 77% de la HH de producción de NA se origina en EUA. El uso que tiene mayor proporción es el agropecuario, siendo principalmente agua verde.

**HUELLA HÍDRICA DE CONSUMO EN NORTEAMÉRICA
POR TIPO, PAÍS Y COLOR (Hm³/AÑO)**

NA = 12.8% del mundo

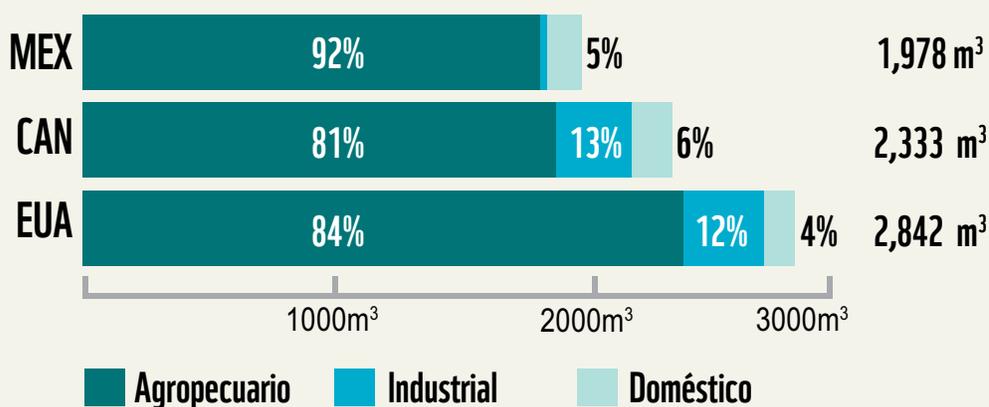


En cuanto a consumo, NA representa el 13% de la HH total mundial. A su vez, EUA representa la mayor proporción dentro de NA, con el 75%.



El consumo en cada país es distinto y su dependencia del comercio internacional también. Canadá y EUA son mayoritariamente autosuficientes (solo importan el 20% de su HH de consumo), en tanto que México depende en un 43% de lo que se produce en el exterior.

HUELLA HÍDRICA PER CÁPITA EN NORTEAMÉRICA
m³/AÑO POR TIPO

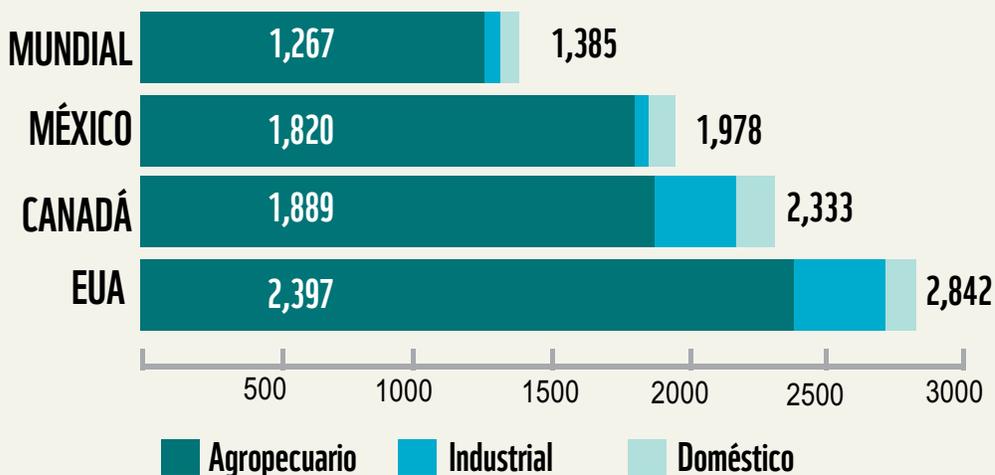


AgroDer SC con información de WFN.

HUELLA HÍDRICA DE CONSUMO PER CÁPITA

Nuestra HH de consumo se compone de lo que comemos, bebemos y utilizamos. A nivel mundial, la HH de consumo *per cápita* se estima en 1,385 m³/año. Los tres países norteamericanos se encuentran por encima de este promedio: EUA ocupa el 8° lugar, Canadá el 20° y México el 49° para este indicador. El consumo de productos agropecuarios compone la mayor parte de nuestra HH como individuos.

HUELLA HÍDRICA PER CÁPITA
m³/AÑO



HUELLA HÍDRICA PER CÁPITA

Los hábitos de consumo de Canadá y EUA son muy distintos a los de México. En los primeros, la dieta incluye más productos que son intensivos en agua (principalmente carne) y menos granos, lo que implica una mayor HH *per cápita* que en México.

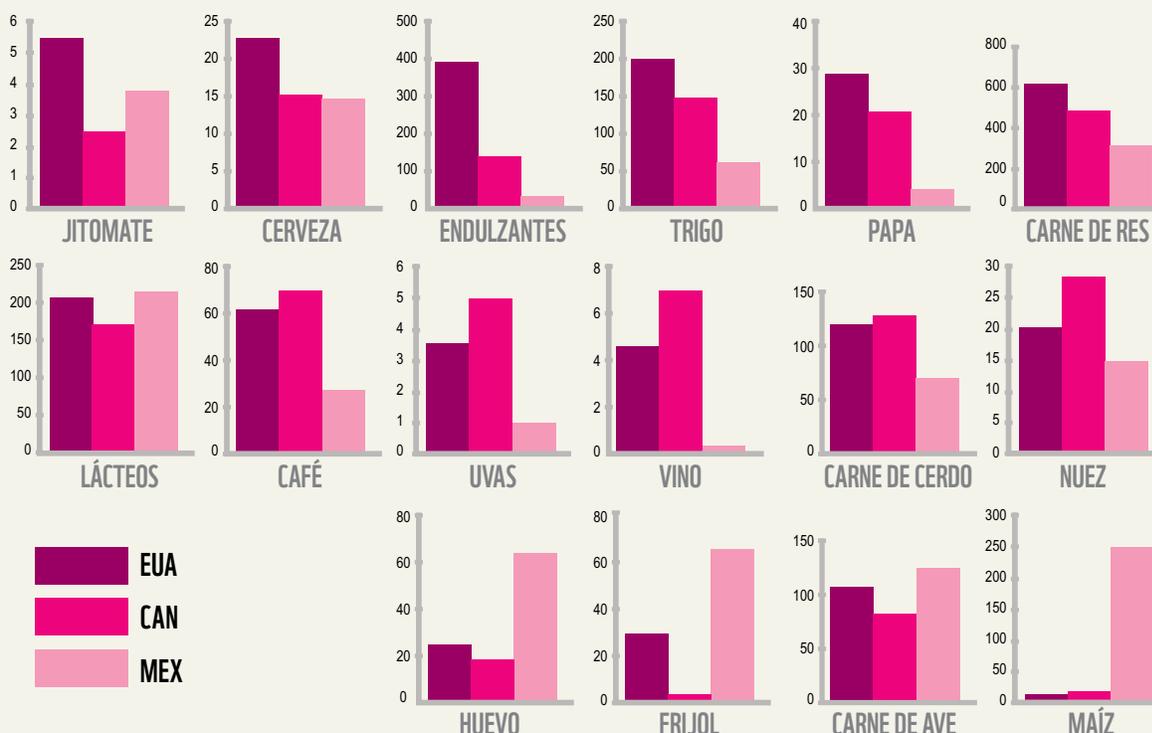
Producto	Mundial	NA	CAN	MEX	EUA
Manzana	9.1	25.0	20.3	6.4	25.5
Frijol	2.4	3.0	1.2	10.8	3.2
Cerveza	26.3	86.2	84.1	58.7	86.4
Café	1.2	4.4	7.2	0.8	4.1
Uva	3.9	8.7	10.8	2.1	8.5
Maíz	16.8	13.3	19.5	122.9	12.6
Papa	31.7	57.0	69.6	17.5	55.7
Jitomate	18.0	43.7	31.7	19.2	45.0
Trigo	65.9	85.2	88.9	35.5	84.8
Vino	3.7	7.3	11.0	0.2	6.9
Res	9.6	40.4	32.8	18.2	41.2
Cerdo	15.1	29.5	27.4	13.6	29.7
Ave	12.6	49.4	37.5	29.4	50.7
Huevo	8.6	14.0	11.0	18.4	14.3
Leche	50.1	119.3	35.5	91.1	128.3
Queso	2.8	14.7	12.7	2.2	14.9

CONSUMO DE PRODUCTOS SELECCIONADOS
KG/PER CÁPITA/AÑO

Agroder con información de FAOSTAT.

Norteamérica supera el promedio mundial de consumo *per cápita* en todos los principales productos agropecuarios, salvo maíz. Al comparar los países de NA, México supera a Estados Unidos y Canadá únicamente en consumo de huevo, maíz y frijol. Además del volumen consumido para cada producto, en el cálculo inciden el origen de la producción y su propia HH. Todas estas diferencias en el consumo *per cápita* se reflejan en la huella hídrica.

HUELLA HÍDRICA PER CÁPITA PARA PRODUCTOS SELECCIONADOS (M³/AÑO)



FLUJOS DE AGUA VIRTUAL EN NORTEAMÉRICA

PRINCIPALES FLUJOS DE AV ENTRE PAÍSES NORTEAMERICANOS

Canadá exporta:

A EUA, 27,556 Hm³ en bovinos, oleaginosas, cereales, porcinos, azúcar y estimulantes.

A México, 5,298 Hm³ en oleaginosas, cereales, bovinos, porcinos y legumbres.

EUA exporta:

A Canadá, 15,175 Hm³ en oleaginosas, cereales, bovinos, estimulantes, azúcar y frutas.

A México, 71,063 Hm³ en oleaginosas, cereales, bovinos, porcinos, azúcar, legumbres y lácteos.

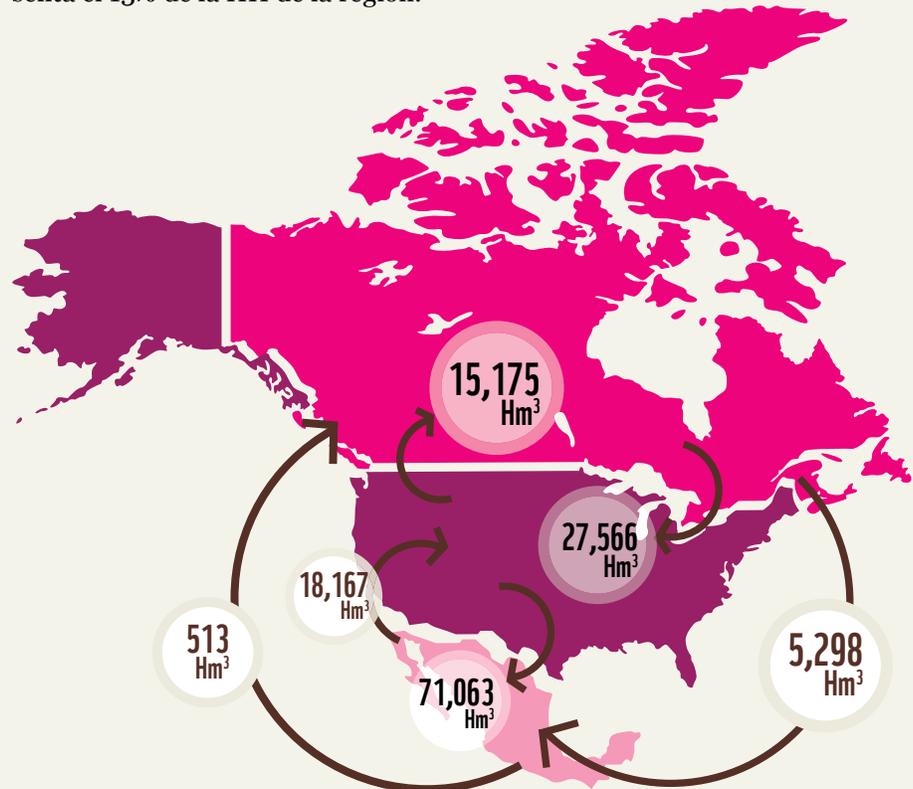
México exporta:

A Canadá, 513 Hm³ en estimulantes, oleaginosas y frutas, primordialmente.

Hacia EUA, 18,167 Hm³ en oleaginosas, estimulantes, bovinos y frutas, principalmente.

Los flujos de AV de los tres países son distintos: Canadá y EUA tienen mayor importación de productos industriales que México, donde la importación en mayor proporción es de productos agropecuarios.

Norteamérica es un buen ejemplo del flujo de agua que ocurre a través de transacciones internacionales. Mediante el comercio de distintos productos fluyen 137,772 Hm³ anualmente entre ellos, cifra que representa el 13% de la HH de la región.



AgroDer SC con información de WFN, 2011.

El mayor flujo de agua virtual ocurre entre EUA y México. Las exportaciones de agua desde el primero al segundo, sólo de productos agropecuarios, equivalen a 71,063 Hm³ anuales, mientras que a la inversa son 18,167 Hm³. El flujo entre EUA y Canadá es menor, aunque Canadá exporta a EUA cerca del doble de lo que importa. El comercio entre México y Canadá es poco representativo, pero Canadá exporta a México diez veces lo que le importa.

A la par, China ha ido creciendo como socio comercial de NA, principalmente como proveedor de productos. En consecuencia, una parte importante de la HH vz de los 3 países se origina en el país asiático, principalmente para EUA (es su principal proveedor de importaciones) y Canadá.

▶ CHINA
HUELLA HÍDRICA
EXTERNA



CHINA COMO SOCIO COMERCIAL DE NORTEAMÉRICA:
PROVEEDOR DE HUELLA HÍDRICA EXTERNA

China se posicionó como la segunda economía más grande en el mundo en 2009. Es el 2º lugar entre los países que proveen la HH externa de EUA y Canadá, y el 30 para México. Durante el mismo periodo que lleva el TLCAN (desde 1994), el comercio entre China y NA ha crecido exponencialmente: 1,000% para EU, 1,400% para Canadá y 9,000% para México. En consecuencia, la balanza comercial de los 3 países con China es negativa.

Las importaciones provenientes de China son preponderantemente industriales, aún sin existir tratado comercial alguno entre los países de NA y China.

En China se localiza actualmente el 9% de la HH externa de EUA, 6% de la HH de Canadá y 2% de la HH de México.

AgroDer, con información de WB Databank, 2012; WFN, 2011; Canadian International Merchandise Trade Database, 2004-2011; United States Census Bureau, 2004-2011; Secretaría de Economía, 2004-2011; WaterStat, 2011; FAOSTAT, 2011.

Canadá tiene el 48% de su HH externa fuera de NA; del mismo modo, únicamente el 40% de sus exportaciones tienen como destino a EUA y México. El balance de AV de Canadá es negativo ya que exporta más del doble del agua que importa; esto significa que no dependen del AV que importan.

Tipo	Hm ³ / año	%
Agrícola	25,538	67%
Pecuario	4,418	12%
Industrial	8,225	21%

FLUJOS DE AGUA VIRTUAL
CANADÁ

Tipo	Hm ³ / año	%
Agrícola	64,578	71%
Pecuario	17,237	19%
Industrial	8,943	10%

IMPORTACIONES
38,181 Hm³



EXPORTACIONES
90,758 Hm³

ORIGEN

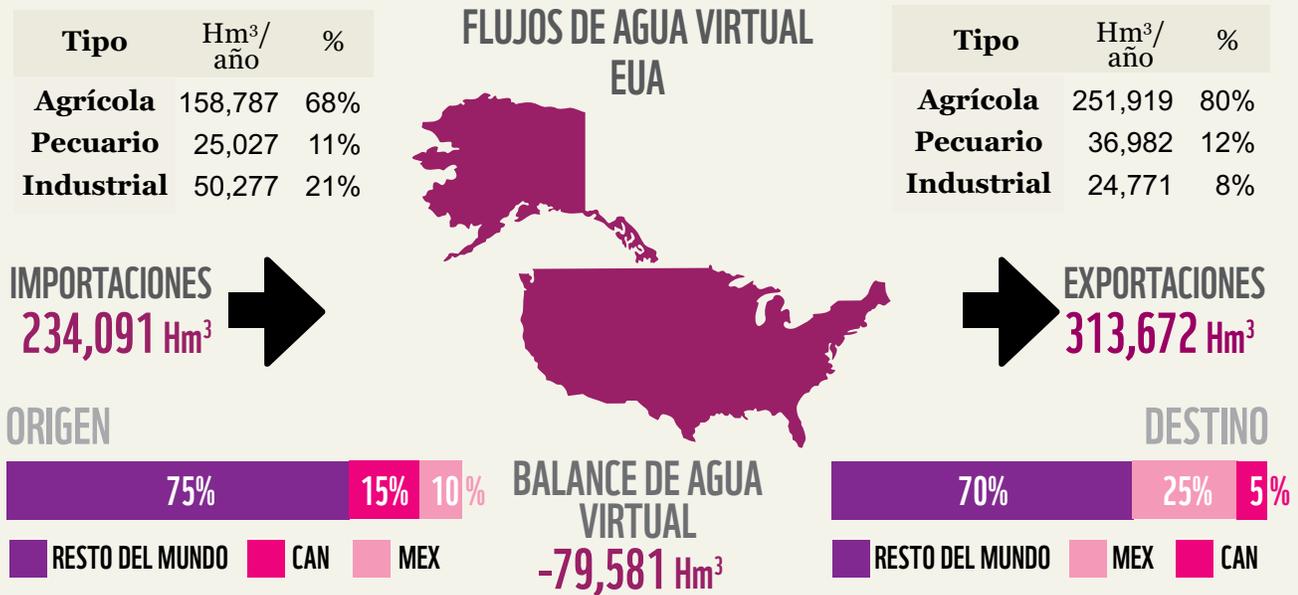


BALANCE DE AGUA VIRTUAL
-52,577 Hm³

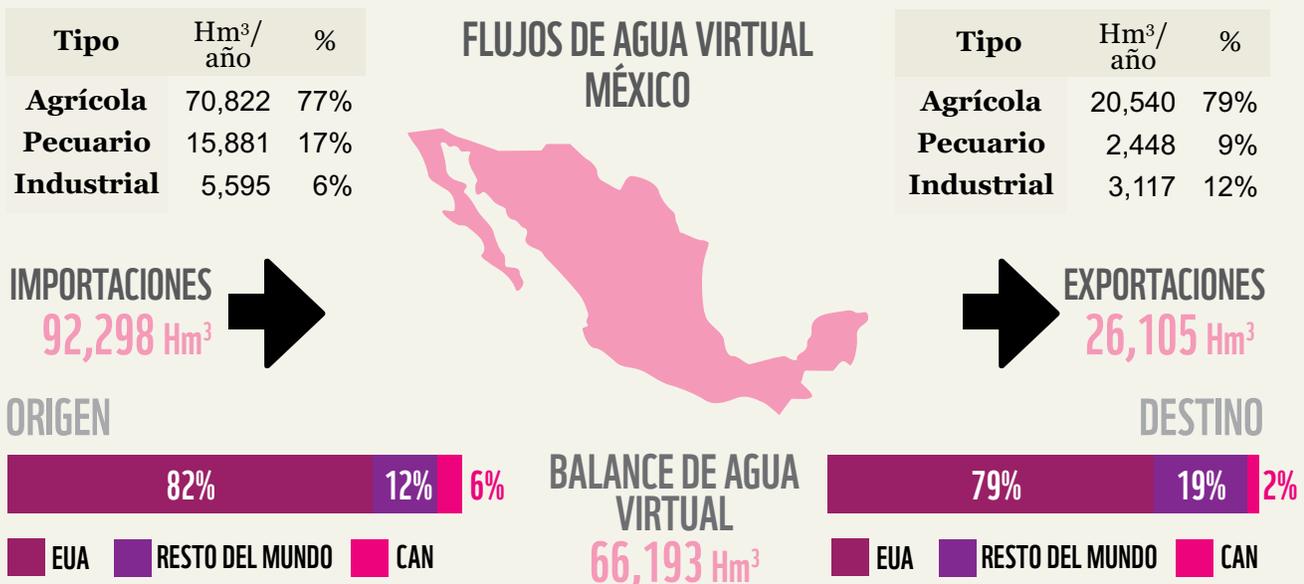
DESTINO



Para EUA, el 75% de su HH externa está fuera de NA. La proporción de importaciones es semejante a la de Canadá en el tipo de productos. En cuanto a sus exportaciones de AV, las principales son productos agropecuarios a países distintos de México y Canadá. Aunque importa un volumen considerable, su balance es negativo ya que exporta 40% más agua de la que importa.



A diferencia de Canadá y EUA, México depende más de las importaciones. Tiene un balance positivo de flujos de AV, ya que importa grandes volúmenes a través de productos agropecuarios, provenientes principalmente de EUA. De los tres países, es el único cuyos principales socios comerciales están en NA y cuyo balance de AV es positivo.



▶ IMPACTO DEL TRATADO DE LIBRE COMERCIO DE NORTEAMÉRICA EN LA HH EXTERNA REGIONAL

México es el país con más tratados de libre comercio en el mundo (12 con 43 países). El de mayor peso comercial es el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), firmado en 1994, que quintuplicó el valor del comercio en la región (al pasar de \$297 billones de dólares en 1994 a \$1.6 trillones en 2010), lo que representa el 48% de la actividad comercial de los 3 países.

Durante este mismo lapso, nuestras importaciones agropecuarias de EUA y Canadá se incrementaron casi 500%.

Fuente: United States Census Bureau, 2003-2011; FAOSTAT, 2003-2011.

EL COMERCIO EN NORTEAMÉRICA COMO POTENCIAL REDUCTOR DE LA HUELLA HÍDRICA

El comercio regional puede verse como una forma de reducir la HH: si un país produce un bien o cultivo y lo provee a otro país al cual le cueste más agua elaborarlo, contribuye a la reducción de la HH mundial.

AHORRO DE AGUA VÍA COMERCIO: MAÍZ DE EUA A MÉXICO



Mediante importaciones como ésta, México reduce el uso de sus propios recursos en 83 Gm³/anuales, siendo el 2º país que más agua ahorra mediante comercio (sólo detrás de Japón, con 134 Gm³/año).

▶ COMERCIO INTERNACIONAL DE MAÍZ

¿SE AHORRA AGUA?

México es el mayor consumidor de maíz en el mundo (123 kg/cápita/año) y EUA el principal productor. La demanda continúa al alza y 30% del consumo mexicano se abastece con importaciones. Representa el 7% del total de las importaciones de AV; las procedentes de EUA (21,171 Km³ de AV/año) se han incrementado 556% desde que inició el TLCAN, lapso en que la producción mexicana ha crecido 20%. Los usos del maíz detonan estos cambios: durante los últimos 20 años, el consumo *per cápita* de carne de ave ha crecido 300% en México, disparando el consumo de maíz (35% se utiliza como insumo pecuario, principalmente avícola). EUA aumentó 30% su producción en 10 años: 40% de su maíz se utiliza para producir bioetanol (estimado, 2010).

En promedio, se requieren 900 litros de agua para producir 1 kg de maíz. Si México produjera la cantidad de maíz importada en su territorio, generaría una HH mucho mayor: su HH verde (1,852 m³/ton) es 72.4 % mayor que la de EUA, y la gris 54% mayor. Desde el punto de vista de comercio de maíz, este intercambio ahorra agua.

Sin embargo, **si se analiza tomando en cuenta otros factores, el resultado puede ser muy distinto**: en varias regiones de México se ha dejado de cultivar maíz y en su lugar se sembraron otros productos agrícolas considerados más rentables, algunos de ellos con mayor HH por hectárea, como arroz (8,400 m³/ha) y jitomate (9,212 m³/ha). En consecuencia, el ahorro de AV por importaciones de maíz se tradujo en una mayor HH regional.

AgroDer, con datos de FAOSTAT, 2004-2011; SIAP-SAGARPA, 2011; SNIIM, Secretaría de Economía, 2010; National Corn Growers Association, 2011 y WFN, 2011.

ASIMETRÍAS EN NORTEAMÉRICA

Esta investigación indaga la realidad de la huella hídrica en NA, con un mayor enfoque en México y muestra cómo el contexto de cada país impide que se analicen como un solo grupo, lo cual pone en duda la factibilidad de establecer políticas uniformes de manejo de agua como bloque económico.

De los 3 países, México es el más dependiente del agua externa, utilizando también una mayor proporción de agua azul para producción agropecuaria que EUA y Canadá.

El TLCAN ha impactado en gran medida la HH de Norteamérica: el comercio y los flujos de agua virtual se han incrementado drásticamente entre los 3 países desde su puesta en marcha. México es el más dependiente del flujo regional, ya que EUA y Canadá son sus principales socios comerciales (87% de la HH externa de México queda en NA).

El comercio ha crecido exponencialmente y se ha vuelto más fácil, rápido y mucho más eficiente entre regiones en todo el mundo. Enfocar producción local a mercados específicos ha significado subordinar la vocación productiva a la utilidad económica. Ya no es más lo que puede ser cultivado sustentablemente, sino lo que puede ser vendido lucrativamente, aún cuando la producción signifique una HH más alta a costa de otros usos del agua menos intensivos o del funcionamiento de los ecosistemas.

Las economías de diversas naciones están conectadas mediante acuerdos y flujos comerciales: la competitividad lleva a algunos mercados a producir donde sea más barato y más eficiente. En algunos casos, es aparente

que estamos ahorrando agua: cultivar maíz en EUA usa menos agua que cultivarlo en México y pareciera en primera instancia que ambas naciones ahorran agua. Sin embargo, debe ser analizado por igual en términos de escasez y estrés hídricos en las cuencas donde es producido.

La industria también participa de este proceso: diversos países han invertido en México con miras al mercado estadounidense, tomando ventaja de la disponibilidad de mano de obra más barata y de una distancia más corta hacia el destino de los productos. Por tanto, la HH de producción industrial en NA también ha sido afectada por las dinámicas comerciales. Para este sector, el punto focal de atención debe estar en las medidas que mitiguen la huella gris, que representa un 12% de la HH total de producción.

En México, el agua ha sido distribuida para crear riqueza, más que para otros fines; esta riqueza se ha creado donde existen los mercados; es decir, se utiliza como un insumo barato de los procesos de un negocio rentable. Los mercados no toman en consideración el origen del agua utilizada para producir sus insumos ni tampoco cuán eficientemente se ha utilizado. La aplicación de los conceptos que engloba la HH puede facilitar el desarrollo de políticas y estándares relativos al manejo del agua dentro del país, así como proveer de información a los consumidores sobre la distribución de la misma entre los diversos usos, la eficiencia y la responsabilidad ambiental de sus proveedores.

2.3 HUELLA HÍDRICA EN MÉXICO

Fuente: Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica, WWF, SAB-Miller y Agroder, 2012, p. 25, 26, 28, 30 y 32. (Rev. 17 de diciembre de 2014).

Disponible en:

<http://www.huellahidrica.org/Reports/AgroDer,%202012.%20Huella%20h%C3%ADdrica%20en%20M%C3%A9xico.pdf>

HUELLA HÍDRICA EN MÉXICO

Su posición en el mundo:

- 2° en balance
- 6° en importaciones
- 8° en consumo
- 11° en producción
- 22° en exportaciones
- 49° en *per cápita*
- 57° en HH externa

Producción:

- 73% verde
- 11% azul
- 16% gris

Consumo:

- 92% agropecuarios
- 42% externa

Per Cápita:

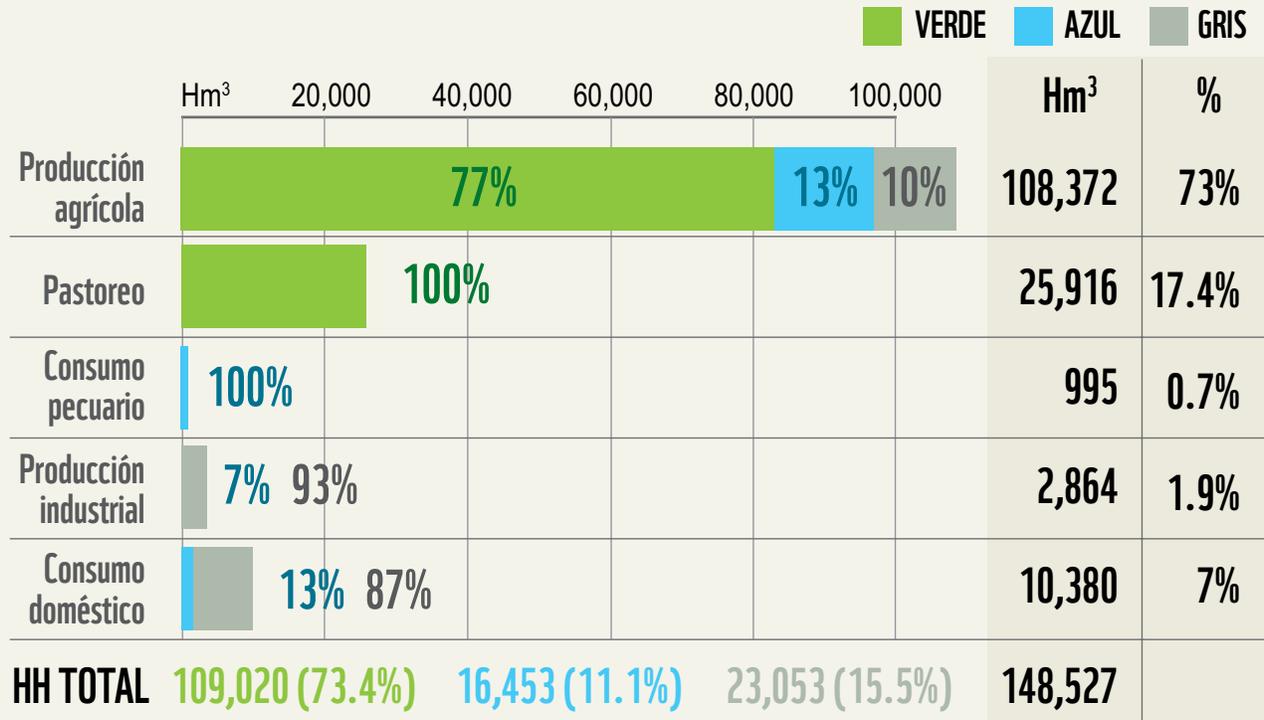
- 17% carne de res
- 13% maíz

HUELLA HÍDRICA DE PRODUCCIÓN EN MÉXICO

México es el 11° país con mayor HH de producción en el mundo. La producción agrícola es el componente mayoritario, seguido del sector pecuario (pastoreo y producción), juntos representan el 91%. Los consumos doméstico e industrial son responsables del 9% de la HH restante, en su mayoría agua gris.

El indicador de HH de producción es dinámico, ya que cambia cada año en función de la variabilidad que tienen los usos: la producción agrícola no es igual cada año, en la industria aparecen nuevos usuarios y, varía la eficiencia de sus procesos, y en las ciudades aumenta la población con acceso a agua potable, drenaje y las plantas de tratamiento. En paralelo, cuando llueve en exceso o hay sequía, varía la disponibilidad de agua y con ello los usos que ésta tiene.

HUELLA HÍDRICA DE PRODUCCIÓN EN MÉXICO
SECTOR/COLOR/Hm³ ANUALES



AgroDer SC con información de WFN, 2011.

▶ LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA AFECTA LA HH DE MÉXICO

La sequía que afecta la mayor parte del territorio mexicano, así como gran parte de EUA y Canadá, ha detonado cambios en la producción y comercio regional. En 2012, México perderá 6 millones de toneladas de maíz y 120 mil toneladas de frijol, que hubieran representado una HH de 56 mil Hm³ y 602 Hm³ respectivamente.

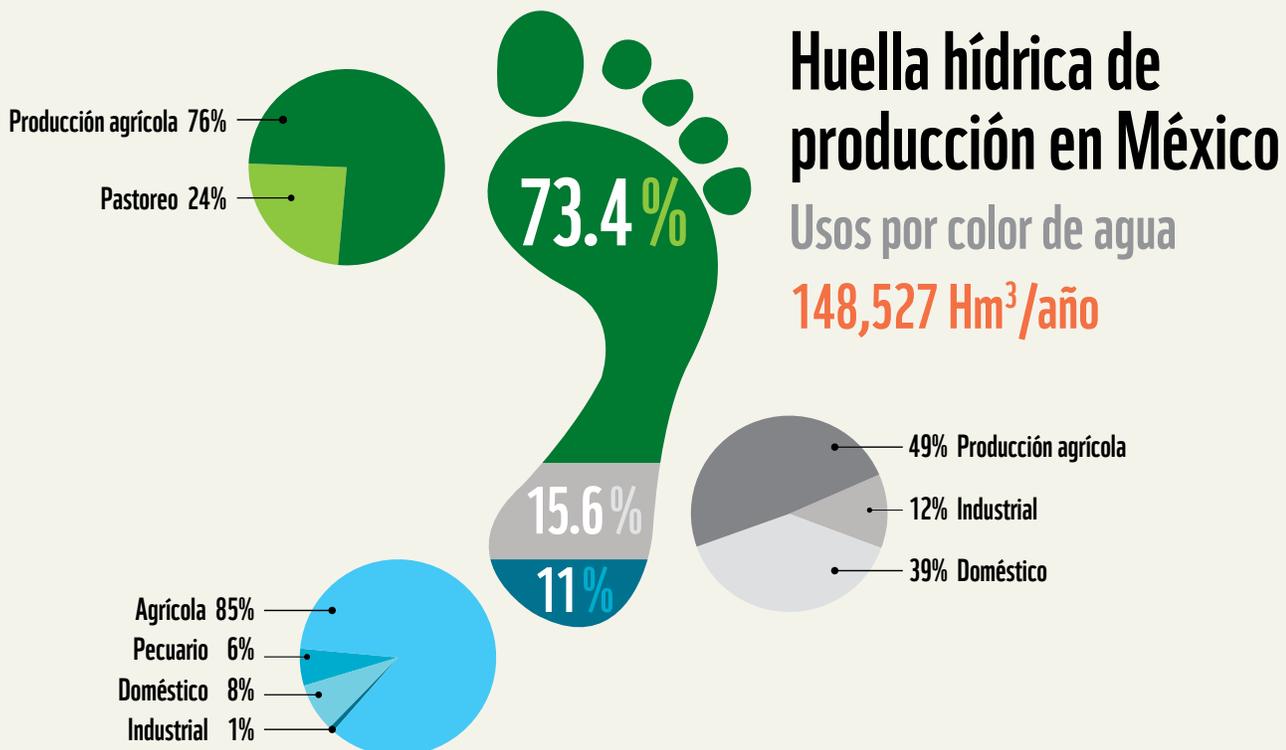
En el caso del maíz, para cubrir la demanda se sembraron de emergencia 144 mil ha en Oaxaca, Chiapas, Campeche y Veracruz, estados con una HH menor (2,157 m³/ton) que en donde originalmente se sembraba (Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, con un promedio de 2,762 m³/ton). Al mismo tiempo, México importará más frijol del habitual para cubrir la demanda.

Durante el periodo 2001-2009, México importó en promedio 100,000 toneladas (HH de 500 Hm³ anuales). Para 2012, se espera importar por lo menos el doble, lo que implica duplicar la HH externa relacionada con frijol.

AgroDer con información de SAGARPA, 2012; WFN, 2011 y FAOSTAT, 2011.

La mayor parte de la HH verde de México está asociada a la actividad agrícola (76%), mientras que el pastoreo da cuenta del 24%. En agua azul, se atribuye al riego agrícola el 85%, y al uso industrial el 1%. Prácticamente la mitad del agua gris está asociada a producción agrícola, 39% al uso doméstico y 12% al industrial.

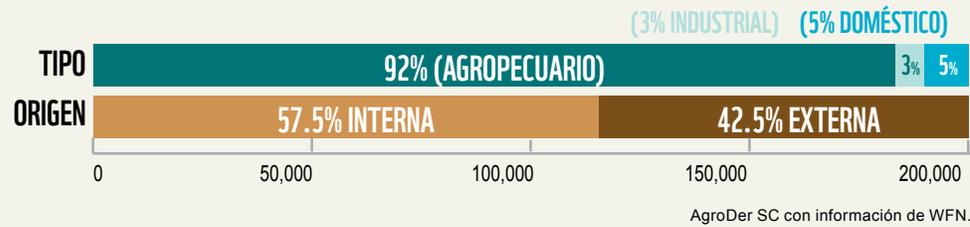
AgroDer con información de WFN, 2010.



HUELLA HÍDRICA DE CONSUMO EN MÉXICO

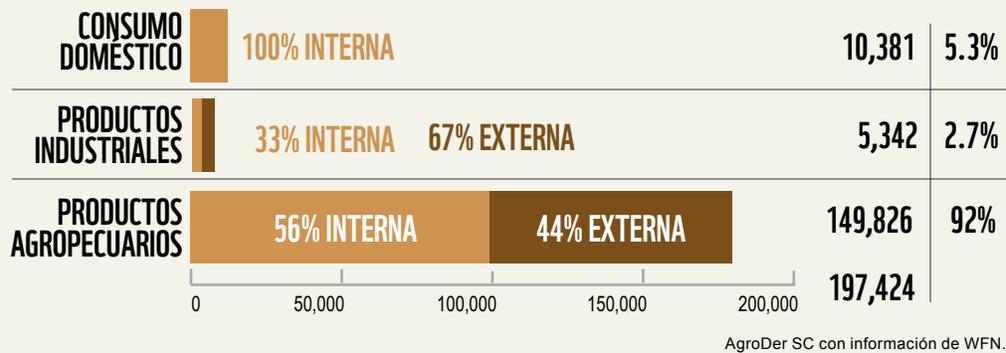
La HH de consumo en México es la octava mayor en el mundo, principalmente debido al tamaño de la población (11º país más poblado). Del total del consumo, únicamente 2.7% es industrial y 5.3% es doméstico. A nivel nacional, México tiene una HH de 197 mil Hm³.

▶ HH DE CONSUMO EN MÉXICO
TIPO/ORIGEN
Hm³ ANUALES
197,424 Hm³



El 58% de la HH de consumo es interna. México importa casi la mitad de su comida, lo que se refleja en la HH externa de productos agropecuarios. Para productos industriales, el 67% de la HH es externa.

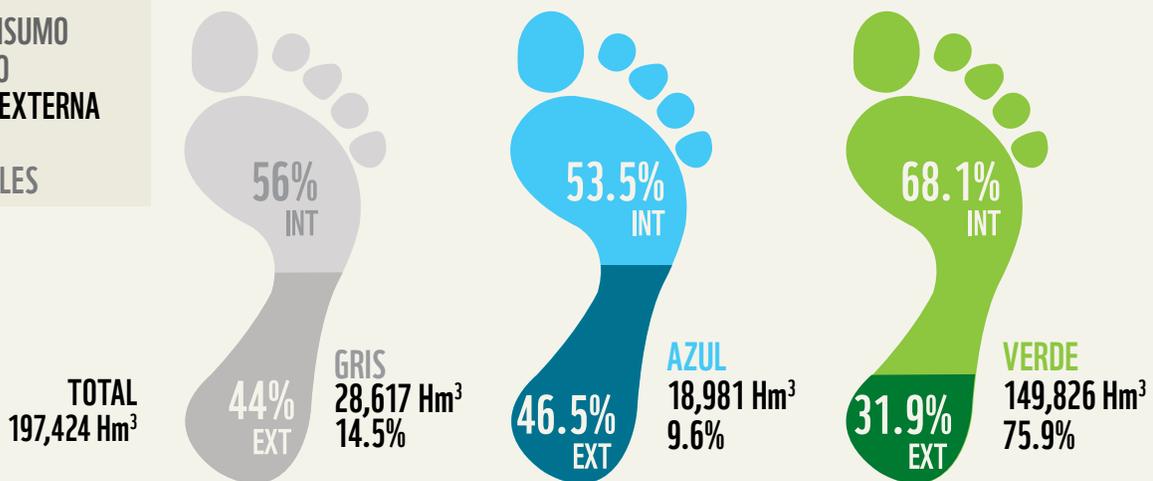
▶ HH DE CONSUMO EN MÉXICO
TIPO/ORIGEN
INTERNA/EXTERNA
Hm³ ANUALES



La importación de alimentos se refleja en un elevado volumen de importaciones de agua verde y una alta proporción de agua azul dentro de la HH de consumo.

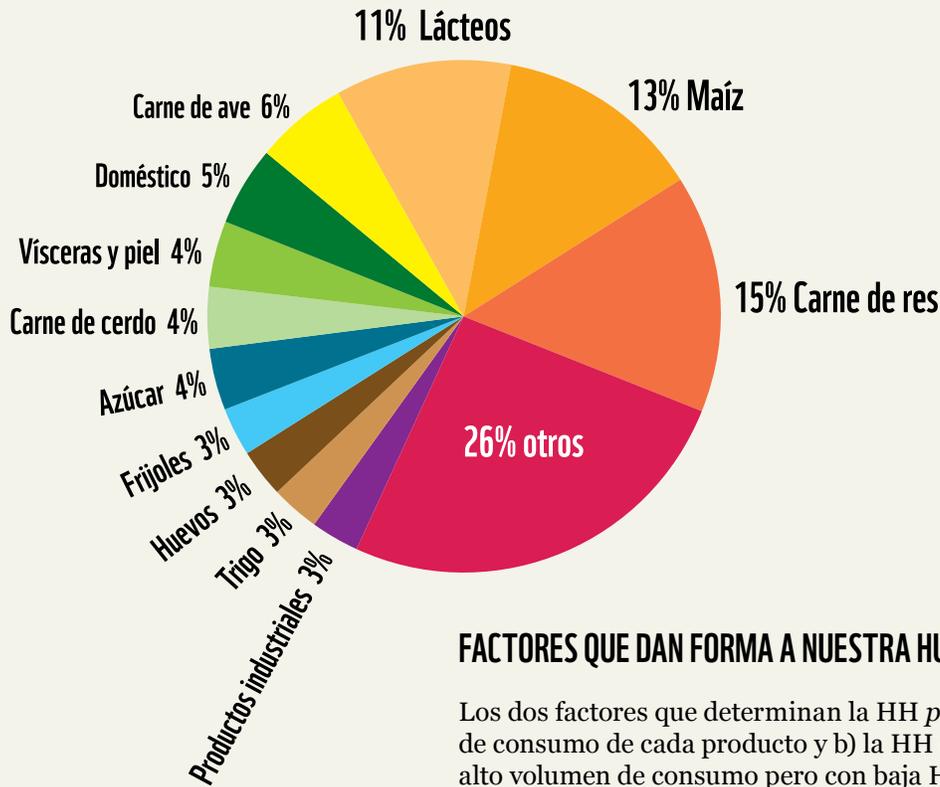
En cuanto a la HH de consumo *per cápita*, México ocupa el lugar 49 en el mundo, con 1,978 m³ *per cápita* al año (superior al promedio mundial, de 1,385 m³ *per cápita* al año).

▶ HH DE CONSUMO EN MÉXICO
INTERNA/EXTERNA
COLOR
Hm³ ANUALES



HUELLA HÍDRICA PER CÁPITA DEL MEXICANO

El 86% de la HH de un mexicano son productos alimentarios y bebidas, 6% otros productos agropecuarios (pieles y algodón principalmente), 5% consumo doméstico y 3% productos industriales.



HUELLA HÍDRICA DE CONSUMO PER CÁPITA POR PRODUCTO EN MÉXICO

AgroDer SC con información de FAOSTAT, SIAP y WFN.

FACTORES QUE DAN FORMA A NUESTRA HUELLA HÍDRICA

Los dos factores que determinan la HH *per cápita* son: a) el volumen de consumo de cada producto y b) la HH del mismo. Un producto con alto volumen de consumo pero con baja HH por kg puede implicar una menor HH *per cápita* que uno con más bajo volumen de consumo pero mayor HH por kg. Como ejemplo, en México, el 15% de nuestra HH es por consumo de carne de res y el 13% es maíz. Aunque comemos mucho más maíz (123 kg *per cápita* anual) que carne de res (18 kg *per cápita* anual), la elaboración de 1 kg de carne de res requiere en promedio 10 veces más agua que 1 kg de maíz. Por esto, aunque consumimos menos volumen de carne, su producción implica una mayor HH.

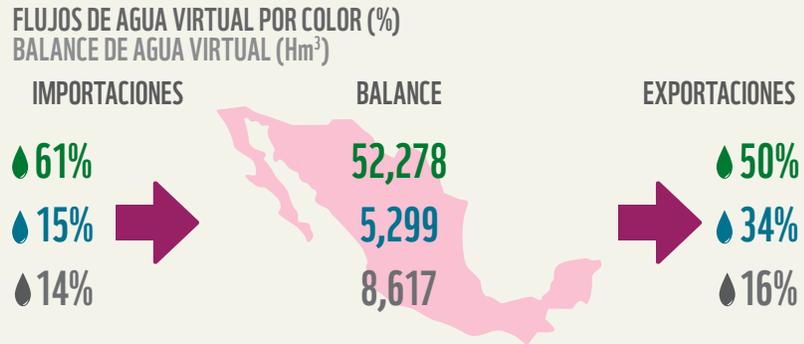
Nuestra HH externa se localiza principalmente en 3 países:

- 80.9% EUA
- 6.2% Canadá
- 1.3% China

El 76% de las importaciones de agua virtual son productos agrícolas, 7% pecuarios y 6% industriales, destacando aceites vegetales, cereales y bovinos. Las principales exportaciones (agrupadas en categorías de FAO) son aceites vegetales y estimulantes (café, cacao y té), así como un 12% relacionado con productos industriales.

CAPÍTULO 3 ¿QUÉ HUELLA DEJA MÉXICO?

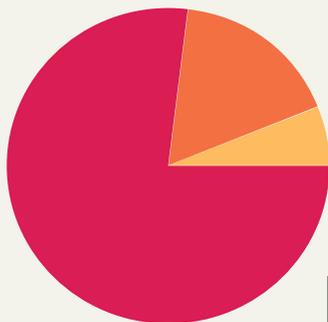
El balance de AV muestra que, en proporción, México exporta más agua azul (34%) de la que importa (15%), y recibe mayor proporción de agua verde de la que exporta.



Tanto importaciones como exportaciones de agua virtual son, en su mayoría, a través de la producción agrícola.

Fuente: FAOSTAT 2000-2011 y Agroder con información de WFN, 2010.

IMPORTACIONES DE AGUA VIRTUAL 92,299 Hm³ / año



- 79% Agrícola
- 17% Pecuario
- 06% Industrial

Hm ³ / año	Producto
5,595	Industrial

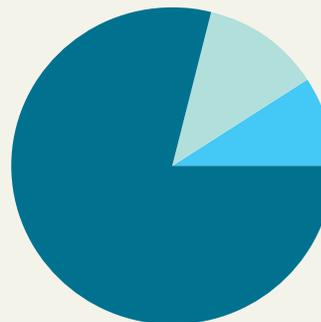
Importaciones de agua virtual a través de producción agrícola

Hm ³ / año	Producto
48,840	Aceites Vegetales
17,823	Cereales
1,015	Azucar
888	Legumbres
869	Estimulantes
503	Especies
374	Frutas
269	Nueces
80	Vegetales
63	Fibras vegetales
60	Raíces y tubérculos
31	Tabaco
6	Forraje
1	Otros
70,822 Hm³	Total

Importaciones de agua virtual a través de producción pecuaria

Hm ³ / año	Producto
12,227	Bovinos
1,503	Leche
1,289	Porcinos
435	Ovinos y Caprinos
238	Equinos
189	Aves
15,881 Hm³	Total

EXPORTACIONES DE AGUA VIRTUAL 26,105 Hm³ / año



- 79% Agrícola
- 12% Industrial
- 09% Pecuario

Hm ³ / año	Producto
3,117	Industrial

Exportaciones de agua virtual a través de producción agrícola

Hm ³ / año	Producto
10,756	Aceites Vegetales
4,876	Estimulantes
1,403	Frutas
1,096	Cereales
713	Azucar
703	Vegetales
329	Especies
239	Legumbres
237	Nueces
163	Raíces y Tubérculos
22	Tabaco
1	Forraje
1	Fibras Vegetales
1	Otros
20,540 Hm³	Total

Exportaciones de agua virtual a través de producción pecuaria

Hm ³ / año	Producto
1,922	Bovinos
224	Porcinos
161	Lácteos
126	Equinos
12	Aves
3	Ovinos y Caprinos
2,448 Hm³	Total

3 METODOLOGÍAS

Fuente: Fundación MAPFRE. “Metodología del cálculo de la huella hídrica”: “huella hídrica”, oferta demanda, análisis coste-beneficio y precios de la “huella hídrica” en España”, en Fundación MAPFRE, *Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España*, 2011, p. 61-87. (Rev. 17 de diciembre de 2014). Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/FundacionMapfre-2011-huella-hidrica-y-desarrollo-sostenible.pdf>

Fuente: *Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica*, WWF, SAB-Miller y Agroder, 2012, p. 41. (Rev. 17 de diciembre de 2014). Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/FundacionMapfre-2011-huella-hidrica-y-desarrollo-sostenible.pdf>

3. METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DE LA “HUELLA HÍDRICA”:

“HUELLA HÍDRICA”, OFERTA-DEMANDA, ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO Y PRECIOS DE LA “HUELLA HÍDRICA” EN ESPAÑA

3.1. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LA “HUELLA HÍDRICA”

El estudio de la “Huella Hídrica” a niveles territoriales inferiores y específicos permite conocer exactamente cuánta agua, y en qué condiciones, se utiliza de los sistemas de agua locales, y cuánta agua sería necesaria para contrarrestar las corrientes contaminadas (Chapagain y Orr, 2009). Más importante aún, podemos ver de donde procede el agua en el ciclo hidrológico, a la vez que se relacionan los productos comercializados con las zonas de producción. La base de este trabajo es la aplicación de la metodología desarrollada por Chapagain y Hoekstra (2004), actualizada en Hoekstra et al. (2009), y posteriormente en Hoekstra et al. (2011), donde se han establecido los estándares de cálculo a nivel mundial. Ésta metodología ha sido adaptada a los datos disponibles en España para realizar un análisis más detallado y preciso, a nivel municipal, provincial, autonómico y nacional, incorporando además el análisis por demarcaciones hidrográficas. Los años de estudio son 1996, 2005 y 2008.

3.1.1. Contabilidad de la “Huella Hídrica”

Hoekstra et al. (2009) establecieron algunas premisas para mantener la coherencia entre los diferentes tipos de contabilidad de la “Huella Hídrica”:

- La “Huella Hídrica” de un “proceso o etapa” es el elemento básico para calcular la “Huella Hídrica”. Se puede expresar en $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ o $\text{m}^3 \text{unidad de producto}^{-1}$.
- La “Huella Hídrica” de un producto es igual a la suma de la “Huella Hídrica” de los distintos procesos o etapas necesarios para producir un determinado producto, considerando toda la producción y la cadena de suministro. Se puede expresar en $\text{m}^3 \text{unidad de producto}^{-1}$, $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$, $\text{m}^3 \text{EUR}^{-1}$, o $\text{m}^3 \text{unidad de producto}^{-1}$.
- La “Huella Hídrica” de un consumidor es igual a la suma de la “Huella Hídrica” de todos los productos consumidos por el consumidor. Se puede expresar en $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, $\text{m}^3 \text{EUR}^{-1}$, o $\text{m}^3 \text{“per cápita”}$.
- La “Huella Hídrica” de una comunidad o conjunto de consumidores (municipio, provincia, Comunidad Autónoma o país) es igual a la suma de la “Huella Hídrica” de todos sus miembros o integrantes. Se puede expresar en $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, $\text{m}^3 \text{EUR}^{-1}$, o $\text{m}^3 \text{“per cápita”}$.
- La “Huella Hídrica” de una empresa o negocio es la suma de la “Huella Hídrica” de los productos finales o transformados que produce la empresa. Se puede expresar en $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, $\text{m}^3 \text{EUR}^{-1}$, o $\text{m}^3 \text{“per cápita”}$.
- La “Huella Hídrica” de un área geográfica determinada (cuenca hidrográfica, municipio, provincia, país) es la suma de la “Huella Hídrica” de todos los procesos que tienen lugar en esa área geográfica. Se puede expresar en $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ o $\text{m}^3 \text{EUR}^{-1}$.
- La “Huella Hídrica” total de la humanidad es la suma de la “Huella Hídrica” de todos los consumidores del mundo (habitantes), o lo que es lo mismo, es igual a la suma de la “Huella Hídrica” de todos los bienes y servicios de consumo finales que se consumen anualmente. También es igual

a la suma de toda el agua consumida o contaminada en los procesos que se llevan a cabo a nivel mundial. Se puede expresar en $m^3 \text{ año}^{-1}$, $m^3 \text{ EUR}^{-1}$, o $m^3 \text{ "per cápita"}$.

Para evitar la doble contabilidad de la "Huella Hídrica" de un producto final (listo para su consumo), se asigna siempre la "Huella Hídrica" del proceso al producto final, o se la divide entre los productos que requieren de dicho proceso. No se debe sumar la "Huella Hídrica" de productos intermedios para evitar la redundancia en la contabilidad de la "Huella Hídrica". Por ejemplo, la "Huella Hídrica" de los tejidos de algodón ya incluye la "Huella Hídrica" del algodón cosechado, o la "Huella Hídrica" del queso ya incluye una parte de la "Huella Hídrica" de la leche.

3.1.2. "Huella Hídrica" de un consumidor o un grupo de consumidores

La "Huella Hídrica" de los consumidores está relacionada con la "Huella Hídrica" de los productores en la cadena de suministro. La "Huella Hídrica" total de un consumidor es la suma de su "Huella Hídrica" directa e indirecta. Siendo la "Huella Hídrica" directa de un consumidor o productor, o de un grupo de consumidores o productores, el consumo de agua dulce y la contaminación asociada a su uso por el consumidor o el productor (Water Footprint Network, 2010). La "Huella Hídrica" indirecta de un consumidor o productor se define como el consumo de agua dulce y la contaminación que está detrás de los productos que son, consumidos o producidos. Se considera que es igual a la suma de la "Huella Hídrica" de todos los productos consumidos por el consumidor o de todos los insumos (no hídricos) utilizados por el productor.

La "Huella Hídrica" de un consumidor (WF_{cons}) se define como el volumen total de agua dulce consumida y contaminada para la producción de los bienes y servicios consumidos por el consumidor. La "Huella Hídrica" de un grupo de consumidores es igual a la suma de la "Huella Hídrica" de los consumidores individuales. Se calcula sumando la "Huella Hídrica" directa de la persona y su "Huella Hídrica" indirecta:

$$WF_{cons} = WF_{cons.dir} + WF_{cons.indir}$$

Donde $WF_{cons.dir}$ representa la "Huella Hídrica" directa, que se refiere al consumo y la contaminación del agua relacionada con su uso en el hogar o en el jardín. Mientras que $WF_{cons.indir}$ representa la "Huella Hídrica" indirecta, que se refiere al consumo y la contaminación del agua asociada con la producción de los bienes y servicios consumidos por el consumidor. Es decir, el agua que se utilizó para producir la comida, la ropa, el papel, la energía y los bienes industriales consumidos.

El uso indirecto del agua se calcula multiplicando todos los productos consumidos por sus respectivas huellas hídricas:

$$WF_{cons.indir} = \sum_p (C(p) * WF_{prod}^*(p))$$

Donde $C(p)$ es el consumo del producto p (unidades del producto / tiempo), y $WF_{prod}(p)$ es la "Huella Hídrica" de ese producto (volumen de agua / unidad de producto).

El volumen total consumido de p generalmente procede de diferentes lugares x . La "Huella Hídrica" promedio de un producto consumido p es:

$$WF_{prod}^*(p) = \frac{\sum_x (C(x,p) * WF_{prod}(x,p))}{\sum_x C(x,p)}$$

Donde $C(x,p)$ es el consumo de productos p procedentes de x (unidades de producto/tiempo), y $WF_{prod}(x,p)$ es la "Huella Hídrica" de los productos p procedentes de x (volumen de agua/unidad de producto).

La "Huella Hídrica" de los bienes y servicios privados se calcula para cada consumidor. La "Huella Hídrica" de los bienes y servicios públicos o compartidos se asigna a cada consumidor en base a la cuota de consumo de cada uno.

Como ejemplo, en el consumo de carne o de otros productos derivados de la producción ganadera, la "Huella Hídrica" directa del consumidor es el volumen de agua consumida o contaminada al preparar

y cocinar la carne. La “Huella Hídrica” indirecta del consumidor de carne depende de la “Huella Hídrica” directa del minorista que vende la carne, del procesador de alimentos que prepara la carne para la venta, de la explotación ganadera que alimenta el animal y de los cultivos necesarios para alimentar a los animales. La “Huella Hídrica” indirecta del minorista depende de la “Huella Hídrica” directa del procesador de alimentos, las explotaciones ganaderas y los cultivos, etc.

3.1.3. “Huella Hídrica” de un proceso y de un producto

3.1.3.1. De una etapa del proceso

En el cálculo de la “Huella Hídrica” de un proceso, Hoekstra et al. (2009) incluyen a la “Huella Hídrica” azul, la “Huella Hídrica” verde y la “Huella Hídrica” gris. La “Huella Hídrica” azul se incluye porque cuantifica la cantidad de agua disponible que es consumida en un período de tiempo determinado, por un grupo de personas. Entendiéndose, que las aguas superficiales y subterráneas no consumidas o utilizadas, sirven para mantener los ecosistemas que dependen de ellas.

En el caso de los productos agrícolas, el contenido azul de una cosecha se define como la suma de la evaporación del agua de riego en campo y del agua de los canales de riego. En el caso de la producción industrial y el uso doméstico de agua, el contenido de agua azul del producto o servicio es igual a la fracción de agua tomada de aguas superficiales o subterráneas que se evapora y, por lo tanto, no regresa al sistema del que provino.

3.1.3.1.1. “Huella Hídrica” azul

La “Huella Hídrica” azul ($WF_{proc,blue}$) es un indicador del uso consuntivo de agua azul en los siguientes procesos:

- Evaporación (BWE – Blue water evaporation).
- Agua incorporada en un producto (BWI – Blue water incorporation).
- Flujo de retorno perdido (LRF - Lost return flow):
 - Agua que no está disponible para su reutilización dentro de una misma área geográfica, porque no retorna al mismo cauce (por ejemplo cuando se vierte al mar o a otro sistema hídrico)
 - Agua que no está disponible para su reutilización dentro de una misma área geográfica, porque no retorna en el mismo período (por ejemplo cuando se extrae agua en un periodo de sequía y se devuelve en un período húmedo)

Generalmente, el agua azul evaporada es igual al uso consuntivo del agua, siendo incluidos los otros tres componentes cuando son relevantes en un proceso determinado. Siendo, la evaporación el uso más significativo del agua azul. La “Huella Hídrica” azul de una etapa o proceso se calcula mediante la siguiente expresión:

$$WF_{proc,blue} = BWE + BWI + LRF$$

Hoekstra et al. (2009) consideran que se pueden distinguir tres diferentes tipos de fuentes de agua azul en la evaluación de la “Huella Hídrica” azul de un proceso. Aunque, en la práctica por la falta de datos es difícil hacer la distinción entre aguas superficiales (“Huella Hídrica” azul claro), aguas subterráneas libres o renovables (“Huella Hídrica” azul oscuro) y aguas subterráneas fósiles (“Huella Hídrica” negra).

3.1.3.1.2. “Huella Hídrica” verde

El agua verde es la precipitación que llega al suelo y que no se pierde por escorrentía, almacenándose temporalmente en la parte superior del suelo o en la vegetación. Por tanto, la “Huella Hídrica” verde ($WF_{proc,green}$) es el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción. Este tipo de huella es relevante en los productos agrícolas y forestales, donde es igual a la evapotranspiración en los cultivos y plantaciones más el agua incluida en el producto cosechado. La “Huella Hídrica” verde en una etapa o proceso es igual a:

$$WF_{proc,green} = \text{Green Water Evaporation} + \text{Green Water Incorporation}$$

3.1.3.1.3. “Huella Hídrica” gris

La “Huella Hídrica” gris es un indicador del grado de contaminación del agua dulce en un determinado proceso. Se define como el volumen de agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes, basados en las normas vigentes de calidad ambiental del agua. Se calcula como el volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes hasta el punto de que la calidad del agua ambiental se mantenga por encima de lo estipulado en las normas de calidad del agua.

La “Huella Hídrica” gris se calcula dividiendo la concentración del contaminante (L , masa/tiempo) por la diferencia entre la calidad ambiental del agua para este contaminante (concentración máxima aceptable C_{max} , masa/volumen) y su concentración natural en el cuerpo de agua receptor (C_{nat} , masa/volumen):

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$$

La cantidad de producto químico que se ha liberado directamente en una masa de agua superficial, puede ser cuantificado directamente. Cuando un químico se aplica sobre o se incorpora al suelo, como en el caso de los residuos sólidos o el uso de fertilizantes o pesticidas, puede suceder que sólo una fracción de él se filtre en las aguas subterráneas o se escurra superficialmente hacia una corriente de agua superficial. En este caso, la carga contaminante es la fracción de la cantidad total de químicos aplicados que se vierte en las aguas superficiales o subterráneas.

Al ser la “Huella Hídrica” gris un indicador de la adecuada capacidad de asimilación, se utiliza como referencia la concentración natural antes que la real, porque la capacidad de asimilación de un cuerpo de agua receptor depende de la diferencia entre el máximo permitido y la concentración natural de una sustancia. Entendiéndose como concentración natural en un cuerpo de agua receptor, la concentración en el cuerpo de agua que se produciría si no existiese intervención humana en el sistema hídrico. Por el contrario, si se compara la concentración máxima permitida con la concentración real de una sustancia, se observará la capacidad de asimilación restante, que cambia constantemente en función del nivel de contaminación real en un momento determinado.

La concentración crítica (L_{crit} , masa/tiempo) es la concentración de contaminantes que tiene la mayor capacidad de asimilación de un cuerpo de agua. Se obtiene multiplicando la escorrentía del cuerpo de agua (R , volumen/tiempo) por la diferencia entre la concentración máxima aceptable (C_{max}) y la concentración natural (C_{nat}):

$$L_{crit} = R * (C_{max} - C_{nat})$$

Esta ecuación y la anterior asumen que la reducción de la concentración es insignificante en cortos periodos de tiempo, por lo que con el tiempo se incrementará la concentración en el cuerpo de agua receptor. Cuando la concentración en un cuerpo de agua alcanza la concentración crítica, la “Huella Hídrica” gris será igual a la escorrentía, lo que significa que la escorrentía total es adecuada para asimilar los residuos.

Cuando los contaminantes son parte del efluente vertido en un cuerpo de agua, la concentración del contaminante es igual al volumen de efluentes ($Effl$, volumen/tiempo) multiplicado por la diferencia entre la concentración del contaminante en el efluente (c_{effl} , masa/volumen) y su concentración natural en el cuerpo de agua receptor (C_{nat} , masa/volumen). En este caso, la “Huella Hídrica” gris se calcula con la siguiente fórmula:

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{Effl * (c_{effl} - C_{nat})}{C_{max} - C_{nat}}$$

La concentración del contaminante (L) es igual al incremento en la concentración natural de un cuerpo de agua receptor. Para las sustancias artificiales que naturalmente no se encuentran en el agua, $C_{nat} = 0$, por tanto:

$$WF_{proc, grey} = \frac{Effl * c_{effl}}{C_{max}}$$

Esta ecuación también se puede utilizar cuando las concentraciones naturales no se conocen con precisión pero se consideran que son relativamente bajas. Esta hipótesis da una “Huella Hídrica” gris sobreestimada cuando $c_{effl} < c_{max}$ y subestimada cuando $c_{effl} > c_{max}$.

En el caso de contaminación térmica, se aplica un método similar al utilizado para la contaminación por productos químicos. La “Huella Hídrica” gris es igual a la diferencia entre la temperatura del efluente y la del cuerpo de agua receptor (°C) multiplicado por el volumen de aguas residuales (volumen/tiempo) y dividido por el aumento de la temperatura máxima aceptable (°C):

$$WF_{proc.grey} = \frac{Effl * \Delta T_{effl}}{\Delta T_{max}} = \frac{Effl * (T_{effl} - T_{nat})}{T_{max} - T_{nat}}$$

3.1.3.2. De un producto

La “Huella Hídrica” de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza directa o indirectamente para producir un determinado producto. En su cuantificación se considera el consumo de agua y su contaminación en todas las etapas de la cadena de producción. No se incluye el agua consumida cuando se utiliza el producto, o aquella que se reutiliza, recicla o elimina.

El cálculo de la “Huella Hídrica” de un producto se aplica tanto a los productos de la agricultura, como de la industria o del sector servicios. Por tanto, se compone de agua verde, azul y gris. Su cálculo puede realizarse bajo dos enfoques: de cadena productiva en conjunto o por etapas o procesos, obteniéndose el mismo resultado.

3.1.3.2.1. Por cadena productiva en conjunto

Esta metodología es la más simple, pero sólo puede aplicarse cuando se obtiene un único producto transformado dentro de un sistema productivo. Se atribuye la “Huella Hídrica” de cada etapa del proceso productivo al producto que resulta del sistema. En este sistema de producción simple, la “Huella Hídrica” del producto transformado p es igual a la suma del agua utilizada en el proceso dividida por la cantidad producida del producto transformado (p):

$$WF_{prod}(p) = \frac{\sum_{s=1}^k WF_{proc}(s)}{P(p)}$$

Donde $WF_{prod}(p)$ es igual a la “Huella Hídrica” del producto transformado p (volumen/peso), $WF_{proc}(s)$ es igual a la “Huella Hídrica” del proceso de la etapa s (volumen/tiempo), y finalmente $P(p)$ representa la producción del producto transformado p (masa/tiempo).

3.1.3.2.2. Por etapas o procesos

Esta metodología es una forma genérica para el cálculo de la “Huella Hídrica” de un producto. Se basa en la “Huella Hídrica” de los insumos que fueron necesarios en la última etapa de obtención del producto transformado y la “Huella Hídrica” del proceso actual. Se consideran tres situaciones:

- Cuando se obtiene un único producto transformado a partir de una serie de insumos. De esta manera, se obtiene la “Huella Hídrica” del producto transformado sumando las huellas hídricas de los insumos y del proceso.
- Cuando se obtiene una serie de productos transformados a partir de un insumo. En este caso, es necesario distribuir la “Huella Hídrica” del insumo para cada uno de los productos transformados, en proporción a su valor.
- Cuando se obtiene un producto transformado p a partir de varios insumos (y). Éste el caso más genérico.

Si durante la obtención del producto transformado se usa agua, la “Huella Hídrica” del proceso se suma a las huellas hídricas de los insumos, antes de que el total sea distribuido a los productos transformados. La “Huella Hídrica” del producto transformado p se obtiene con la siguiente fórmula:

$$WF_{prod}(p) = \left(WF_{proc}(p) + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}(i)}{f_p(p,i)} \right) * f_v(p)$$

Donde $WF_{prod}(p)$ es igual a la “Huella Hídrica” (volumen/peso) del producto transformado p ; $WF_{prod}(i)$ es igual a la “Huella Hídrica” del insumo i ($i=1$, hasta y); $WF_{proc}(p)$ es igual a la “Huella Hídrica” del proceso o etapa donde se transforman los insumos y en los productos transformados z ($i=p$, hasta z), expresada en el uso de agua por unidad de producto transformado p (volumen / peso). Finalmente $f_p(p,i)$ es el parámetro que expresa la fracción de producto transformado p que se obtiene a partir del insumo i (peso/peso). Se define como la cantidad de producto transformado ($w(p)$, peso) obtenido por cantidad de insumo ($w(i)$, peso):

$$f_p(p,i) = \frac{w(p)}{w(i)}$$

El parámetro $f_v(p)$ expresa la fracción de valor del producto transformado p (unidad monetaria/unidad monetaria). Es el ratio entre el valor de mercado del producto p , que se obtiene al multiplicar el precio o valor del producto p ($price(p)$) por la cantidad de producto transformado ($w(p)$) y el valor agregado de mercado de todos los productos transformados obtenidos ($p=1$, hasta z) a partir de los insumos:

$$f_v(p) = \frac{price(p) * w(p)}{\sum_{p=1}^z (price(p) * w(p))}$$

El precio de un producto es un indicador de su valor económico, pero no siempre es el caso, como por ejemplo cuando no existe un mercado para un producto determinado o cuando se distorsiona el mercado. Por tanto, es mejor utilizar el valor económico real.

3.2. “HUELLA HÍDRICA” DENTRO DE UN ÁREA GEOGRÁFICAMENTE DEFINIDA

La “Huella Hídrica” dentro de un área geográfica se define como el consumo y la contaminación total del agua dulce dentro de los límites de dicha área. Es imprescindible definir claramente los límites del área. La cual puede ser una cuenca, una provincia, un estado o nación, o cualquier otra unidad espacial, hidrológica o administrativa.

La “Huella Hídrica” dentro de un área geográfica definida (WF_{area}) se calcula como la suma de la “Huella Hídrica” de todos los procesos que utilizan agua en dicha área:

$$WF_{area} = \sum_q WF_{proc}[q]$$

Donde $WF_{proc}[q]$ se refiere a la “Huella Hídrica” de un proceso dentro del espacio geográficamente definido. La ecuación suma todos los procesos que consumen o contaminan el agua de la zona.

El agua que se exporta de un espacio a otro, por ejemplo el traspaso de agua de una cuenca a otra, será contabilizada como “Huella Hídrica” de un proceso de la zona de la que proviene el agua.

Desde la perspectiva de la protección de recursos hídricos dentro de un territorio –especialmente con escasez de agua– es interesante saber cuánta agua se usa para elaborar productos de exportación y cuánta agua se importa en forma virtual (a la manera de productos que demandan un alto contenido de agua para su elaboración) de manera que no es necesario producirlos en la zona. Es decir, es interesante saber el “balance hídrico virtual” de un territorio. El balance hídrico virtual de un área geográficamente delimitada durante un período de tiempo se define como la cantidad neta de agua virtual importada durante este período ($V_{i,net}$), que es igual a la cantidad bruta importada (V_i) menos la cantidad exportada (V_e):

$$V_{i,net} = V_i - V_e$$

Un balance hídrico virtual positivo, implica una entrada neta de agua virtual en el área desde otros territorios. Un balance negativo, por otra parte indica una pérdida de agua virtual. En este sentido, la

cantidad bruta de agua virtual importada es interesante, debido a que importar agua virtual ahorra agua en el área considerada.

3.3. CONTABILIDAD DE LA “HUELLA HÍDRICA” NACIONAL

3.3.1. El régimen contable de la “Huella Hídrica” nacional

La “Huella Hídrica” nacional completa se obtiene a través de la combinación de la “Huella Hídrica” del consumo nacional” con la “Huella Hídrica” dentro de una nación”. La Figura 10 muestra una representación visual del plan de contabilidad de la “Huella Hídrica” nacional, según fue introducido por Hoekstra y Chapagain (2008).

Las cuentas tradicionales del uso nacional de agua se refieren únicamente a la extracción de agua dentro de un país. No distinguiéndose entre el uso de agua en la elaboración de productos para consumo interno y el uso de agua para la elaboración de productos dedicados a la exportación. Tampoco incluyen información sobre el agua utilizada en el extranjero para apoyar el consumo nacional. Además, incluyen únicamente el uso del agua azul, sin incluir el agua verde y el agua gris. Para mantener un análisis más global y más útil de cara a la toma de decisiones, hace falta ampliar las cuentas tradicionales del uso nacional del agua.

La “Huella Hídrica” de los consumidores en una nación ($WF_{cons,nat}$) tiene dos componentes: la “Huella Hídrica” interna y la “Huella Hídrica” externa.

$$WF_{cons,nat} = WF_{cons,nat,int} + WF_{cons,nat,ext}$$

La “Huella Hídrica” interna del consumo nacional ($WF_{cons,nat,int}$) se define como el uso de recursos domésticos de agua para producir bienes y servicios consumidos por la población nacional. Es la suma de la “Huella Hídrica” dentro de la nación ($WF_{area,nat}$) menos el volumen de agua virtual exportado a otras naciones en la medida que se relaciona con la exportación de productos elaborados con recursos hídricos nacionales ($V_{e,d}$):

$$WF_{cons,nat,int} = WF_{area,nat} + V_{e,d}$$

La “Huella Hídrica” externa del consumo nacional ($WF_{cons,nat,ext}$) se define como el volumen de agua usado en otras naciones para producir bienes y servicios consumidos por la población de la nación considerada. Equivale al agua virtual importada a la nación (V_i) menos el volumen de agua virtual exportada a otras naciones a través de la reexportación de productos importados ($V_{e,r}$):

$$WF_{cons,nat,ext} = V_i - V_{e,r}$$

El agua virtual exportada (V_e) de una nación consiste en el agua exportada de origen doméstico ($V_{e,d}$) y el agua reexportada de origen extranjero ($V_{e,r}$):

$$V_e = V_{e,d} + V_{e,r}$$

El agua virtual importada a una nación será en parte consumida, así constituirá la “Huella Hídrica” externa del consumo nacional ($WF_{cons,nat,ext}$), y en parte será reexportada ($V_{e,r}$):

$$V_i = WF_{cons,nat,ext} + V_{e,r}$$

La suma de V_i y $WF_{area,nat}$ es igual a la suma de V_e y $WF_{cons,nat}$. Esta suma se denomina “presupuesto de agua virtual” (V_b) de una nación.

$$V_b = V_i + WF_{area,nat} = V_e + WF_{cons,nat}$$

FIGURA 10. El régimen contable de la “Huella Hídrica”



Fuente: Elaboración propia a partir de Hoekstra et al., 2011. Muestra los balances de la “Huella Hídrica” en relación con el consumo nacional ($WF_{cons,nat}$), la “Huella Hídrica” dentro de la nación ($WF_{area,nat}$), el agua virtual total exportada (V_e) y el agua virtual total importada (V_i).

3.3.2. Cálculo de la “Huella Hídrica” dentro de una nación

La “Huella Hídrica” dentro de una nación ($WF_{area,nat}$ volumen/tiempo) se define como el consumo y la contaminación total de agua dulce dentro del territorio de la nación. Se puede calcular siguiendo el método para el cálculo de la “Huella Hídrica” dentro de un área geográficamente definida.

$$WF_{area,nat} = \sum_q WF_{proc} [q]$$

Donde $WF_{proc} [q]$ se refiere a la “Huella Hídrica” del proceso q dentro de la nación que consume o contamina el agua. La ecuación suma todos los procesos que consumen o contaminan el agua y ocurren en la nación. Huellas hídricas de procesos se expresan aquí en volumen/tiempo.

3.3.3. Cálculo de la “Huella Hídrica” de consumo nacional

La “Huella Hídrica” de consumo nacional ($WF_{cons,nat}$) puede calcularse a través de dos enfoques: el de arriba-abajo y el de abajo-arriba.

Enfoque de arriba-abajo

En el enfoque de arriba-abajo, la “Huella Hídrica” de consumo nacional ($WF_{cons,nat}$ volumen/tiempo) se calcula como la “Huella Hídrica” dentro de la nación ($WF_{area,nat}$) más el agua virtual importada (V_i) menos el agua virtual exportada (V_e):

$$WF_{cons,nat} = WF_{area,nat} + V_i - V_e$$

El agua virtual importada bruta se calcula como:

$$V_i = \sum_n \sum_p (T_i[n_e,p] \times WF_{prod} [n_e,p])$$

Donde $T_i[n_e, p]$ representa la cantidad importada del producto p de la nación exportadora n_e (unidades de producto/tiempo) y $WF_{prod}[n_e, p]$ representa la “Huella Hídrica” del producto p en la nación exportadora n_e , (volumen/unidad de producto). Si no se dispone de más detalles, se puede suponer que un producto es elaborado en la nación exportadora. Se puede así tomar la “Huella Hídrica” media del producto en la nación exportadora. Si se sabe el lugar de origen dentro del país exportador, se puede saber la “Huella Hídrica” del producto. Cuando un producto está importado de un país que no elabora dicho producto y cuando falta información sobre su origen verdadero, se puede tomar para esa importación la “Huella Hídrica” de ese producto según la media global. Lo ideal sería que, para cada producto importado, se tomara la “Huella Hídrica” del producto según se mide a lo largo de la cadena de suministro de ese producto, pero en la práctica esto es sólo posible a nivel de caso por caso (mostrado por Chapagain y Orr (2008) en un estudio de la “Huella Hídrica” del Reino Unido), pero no en un sentido genérico para todos los productos importados a un país. Obviamente, hace falta especificar las suposiciones específicas tomadas respecto a esto.

El agua virtual bruta exportada se calcula como:

$$V_e = \sum_p T_e[p] \times WF_{prod}^*[p]$$

Donde $T_e[p]$ representa la cantidad del producto p exportado de la nación (unidades de producto/tiempo) y $WF_{prod}[p]$ representa la “Huella Hídrica” media del producto exportado p (volumen/unidad de producto). El segundo se estima como:

$$WF_{prod}^*[p] = \frac{P[p] \times WF_{prod}[p] + \sum_{n_e} (T_i[n_e, p] \times WF_{prod}[n_e, p])}{P[p] + \sum_{n_e} T_i[n_e, p]} \quad [\text{volumen/unid.product}]$$

Donde $P[p]$ representa la cantidad de producción del producto p en la nación, $T_i[n_e, p]$ representa la cantidad importada del producto p de la nación exportadora n_e , $WF_{prod}[p]$ representa la “Huella Hídrica” de producto p cuando está producido en el país considerado y $WF_{prod}[n_e, p]$ representa la “Huella Hídrica” del producto p en la nación exportadora n_e . Aquí se supone que la exportación viene de la producción doméstica e importaciones según sus volúmenes relativos.

Enfoque de abajo-arriba

El enfoque de abajo-arriba se basa en calcular la “Huella Hídrica” de un grupo de consumidores. El grupo de consumidores está compuesto por los habitantes de una nación. La “Huella Hídrica” de una nación se calcula sumando las huellas hídricas directas e indirectas de los consumidores dentro de la misma:

$$WF_{cons, nat} = WF_{cons, nat, dir} + WF_{cons, nat, indir}$$

La “Huella Hídrica” directa se refiere al consumo y contaminación de agua usada en las casas y los jardines de los consumidores. La “Huella Hídrica” indirecta de los consumidores se refiere al agua usada por otras entidades en producir los bienes y servicios consumidos. Se refiere al agua que se ha usado para producir por ejemplo comida, ropa, papel, energía y bienes industriales consumidos. La “Huella Hídrica” indirecta se calcula multiplicando todos los productos consumidos por los habitantes de la nación por la “Huella Hídrica” de producto respectivo:

$$WF_{cons, nat, indir} = \sum_p (c[p] \times WF_{prod}^*[p])$$

$C[p]$ se refiere al consumo del producto p por parte de los consumidores dentro de la nación (unidades de producto/tiempo) y $WF_{prod}[p]$ representa la “Huella Hídrica” de este producto (volumen/unidad de producto). La colección de productos considerados describe la gama completa de bienes y servicios de consumo. Generalmente el volumen del producto p consumido en una nación tendrá su origen en parte en la nación misma y en parte en otras naciones. La “Huella Hídrica” media de un producto

p consumido en una nación se calculará aplicando la misma suposición usada que en el enfoque de arriba-abajo:

$$WF_{prod}^*[p] = \frac{P[p] \times WF_{prod}[p] + \sum_e (T_i[n_e, p] \times WF_{prod}[n_e, p])}{P[p] + \sum_e T_i[n_e, p]} \quad [\text{volumen/unid.product}]$$

Se supone que el consumo tiene su origen en la producción doméstica y en las importaciones según sus volúmenes relativos.

El enfoque de abajo-arriba versus el enfoque de arriba-abajo

Los enfoques de abajo-arriba y arriba-abajo teóricamente darán el mismo resultado, siempre que no haya cambios de stock de productos durante un año. El cálculo de arriba-abajo puede en teoría rendir una figura ligeramente más alta o más baja si los stocks de productos intensivos en agua aumentan o disminuyen durante el año. La razón para esto se debe a que el enfoque de arriba-abajo presupone un equilibrio: $WF_{area,nat}$ más V_i se convierte en $WF_{cons,nat}$ más V_i . Esto es solamente una aproximación porque, para ser más exacto: $WF_{area,nat}$ más V_i se convierte en $WF_{cons,nat}$ más V_e más el incremento de stock de agua virtual. Otro inconveniente del enfoque de arriba-abajo es que puede haber retrasos entre el momento del uso del agua para producción y el momento de la venta. Por ejemplo, en el caso del comercio en productos ganaderos, puede que ocurra lo siguiente: productos de vacuno o cuero canjeados en un año tienen sus orígenes en el ganado criado y alimentado en el año anterior. Una parte del agua virtualmente interiorizada en el vacuno o el cuero se refiere al agua utilizada para cultivar la cosecha alimenticia en años anteriores. Como resultado, el equilibrio asumido en el enfoque de arriba-abajo se sostendrá durante un período de unos años, pero no necesariamente durante un único año.

Después estarían las diferencias teóricas entre los dos enfoques. Las discrepancias pueden resultar por el uso de distintos tipos de información en la entrada de los cálculos. El enfoque de abajo-arriba depende de la calidad de la información de consumo, mientras que el enfoque de arriba-abajo depende de la calidad de la información del comercio. Cuando las dos bases de datos no concuerdan, los resultados de los dos enfoques serán distintos. En un tipo de caso en particular, el resultado del enfoque de arriba-abajo puede ser muy vulnerable a pequeños errores en la información de entrada. Esto ocurre cuando la importación y la exportación de un país son grandes en relación con su producción nacional, lo cual es típico en naciones relativamente pequeñas especializadas en comercio. Esto se ha demostrado en un estudio de casos prácticos para los Países Bajos (Van Oel et al, 2009). En este caso, la "Huella Hídrica" del consumo nacional calculada con el enfoque de arriba-abajo, será susceptible a los datos de importación y exportación utilizados. Errores relativamente pequeños en el cálculo de agua virtual importada y exportada se vuelven errores relativamente grandes en el cálculo de la "Huella Hídrica". En tal caso, el enfoque de abajo-arriba supondrá un cálculo más fidedigno que el enfoque de arriba-abajo. En naciones donde el comercio es relativamente pequeño comparado con la producción nacional, la fiabilidad de los resultados de los dos enfoques dependerá de la relativa calidad de las bases de datos usadas para cada enfoque.

"Huella Hídrica" externa del consumo nacional

Con el enfoque de arriba-abajo o el de abajo-arriba se puede calcular la "Huella Hídrica" total del consumo nacional ($WF_{cons,nat}$). Con el enfoque de arriba-abajo, se puede calcular el agua virtual importado a un país (V_i). Según los datos basados en el cálculo de la "Huella Hídrica" dentro de una nación ($WF_{area,nat}$), la "Huella Hídrica" externa del consumo nacional ($WF_{cons,nat,ext}$) se puede calcular como:

$$WF_{cons,nat,ext} = \frac{WF_{cons,nat}}{WF_{area,nat} + V_i} \times V_i$$

Esta fórmula se puede aplicar por separado en la categoría de productos ganaderos y en la categoría de los productos industriales. Según la fórmula se puede afirmar que un único porcentaje del agua virtual bruto importado corresponde a la "Huella Hídrica" externa del consumo nacional y que este

porcentaje es igual a la parte del presupuesto de agua virtual (la suma de la “Huella Hídrica” dentro de la nación y el agua virtual importada) que se le atribuirá al consumo nacional.

La “Huella Hídrica” externa del consumo nacional se puede calcular a través de la nación exportadora n_e y el producto p si se supone que el ratio nacional entre la “Huella Hídrica” externa y el agua virtual total importada se aplica a todas las naciones socias y los productos importados.

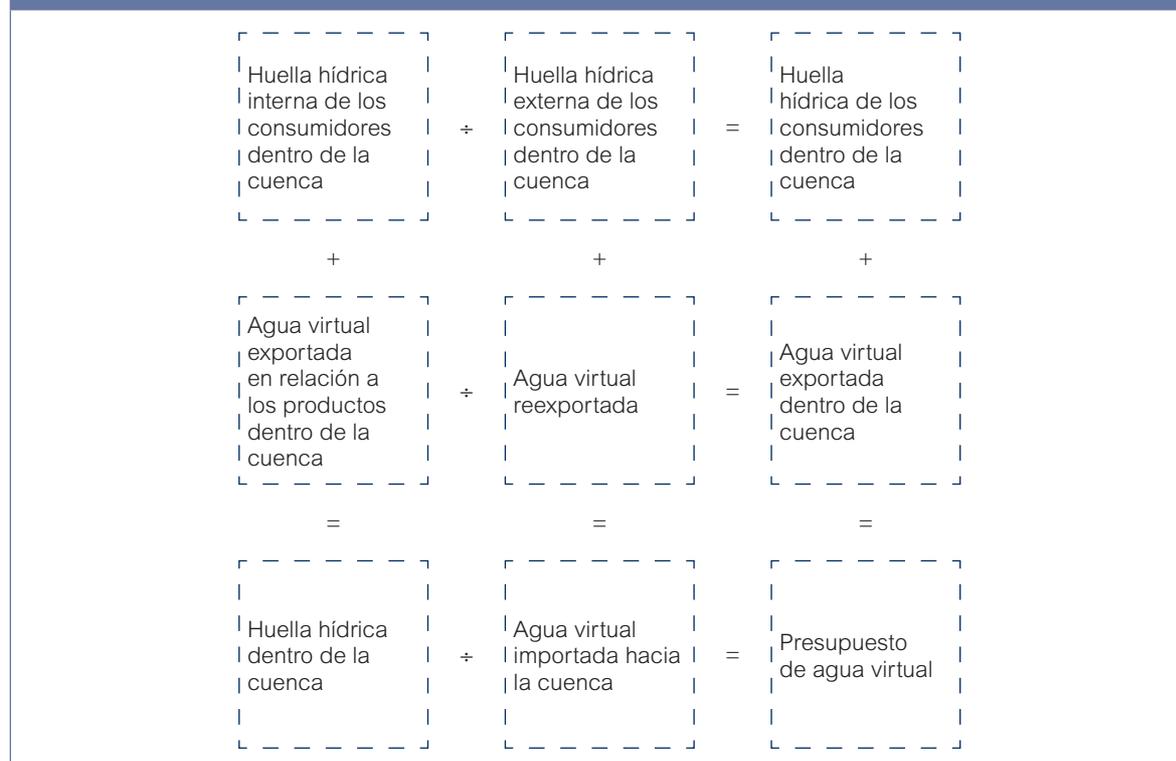
$$WF_{cons,nat,ext}[n_e,p] = \frac{WF_{cons,nat,ext}}{V_i} \times V_i[n_e,p]$$

Resulta además que en ocasiones, se importan productos desde naciones donde no están producidos. En el caso de estos productos hace falta seguir el rastro hasta el país de origen. En el caso de unos grupos de productos, la producción global está concentrada en regiones específicas. Para estos productos se puede calcular aproximadamente el lugar fundamental de origen basado en los datos de producción global. Esto significa que la “Huella Hídrica” de una nación no productora se distribuye hacia las naciones productoras, según la distribución de la producción global.

3.4. CONTABILIDAD DE LA “HUELLA HÍDRICA” EN CUENCAS Y DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS

Las cuentas totales de las huellas hídricas de las cuencas hidrográficas, son parecidas a las cuentas de la “Huella Hídrica” nacional. La única diferencia está en la definición de los límites geográficos considerados. Las cuentas de la “Huella Hídrica” nacional consideran la “Huella Hídrica” dentro del territorio nacional y la “Huella Hídrica” de los consumidores que viven en ese territorio. Las cuentas de la “Huella Hídrica” de las cuencas hidrográficas, solamente combinan las cuentas de las huellas hídricas de los consumidores que viven dentro de la cuenca. La Figura 11 muestra una representación visual del régimen contable de las huellas hídricas de las cuencas, siendo muy similar al régimen contable de las huellas hídricas nacionales.

FIGURA 11. El régimen contable de la “Huella Hídrica” de cuencas



Fuente: Elaboración propia a partir de Hoekstra et alii., 2011. Muestra los diferentes equilibrios que se sostienen para la “Huella Hídrica” de los consumidores que viven dentro de la cuenca, la “Huella Hídrica” dentro de la cuenca, el agua virtual total exportada y el agua virtual total importada a la cuenca.

De esta manera, se puede seguir el mismo método que se usa para la contabilidad de la “Huella Hídrica” nacional. Prácticamente la única diferencia con la contabilidad de la “Huella Hídrica” nacional, se encuentra en el hecho de que los datos de comercio no están disponibles como en el caso de las naciones. En cambio, los movimientos de comercio se tienen que deducir de datos disponibles o de cálculos aproximados en la producción y el consumo dentro de la cuenca. Se puede suponer que un superávit de producción (cuando producción > al consumo en la cuenca) ha sido exportado fuera de los límites geográficos de la cuenca (suponiendo que no se almacena dentro de la cuenca para el siguiente año); de modo parecido, se puede suponer que una falta de producción (producción < consumo) ha sido debido al agua importada.

3.5. “HUELLA HÍDRICA” DE LA AGRICULTURA (WF_{Agr})

Rodríguez Casado et al. (2008) incorporaron una serie de aportaciones a la metodología desarrollada por Chapagain y Hoekstra (2004), para adaptarla de la mejor manera posible al modelo de agricultura española. Primero, se consideró que la “Huella Hídrica” (m^3) de la agricultura es la suma de los recursos hídricos utilizados en la agricultura (UA_{Agr}) y de las importaciones de agua virtual contenida en los productos agrícolas y ganaderos ($VW_{I,Agr}$), menos el agua virtual exportada en estos productos ($VW_{E,Agr}$):

$$WF_{Agr} = UA_{Agr} + VW_{I,Agr} - VW_{E,Agr}$$

3.5.1. Recursos hídricos utilizados en la agricultura (UA_{Agr})

UA_{Agr} (m^3) es la suma de las demandas evaporativas de los cultivos producidos, sin contabilizar las pérdidas de agua que puedan producirse en el riego, asumiendo que en un porcentaje alto pueden ser reutilizadas. UA_{Agr} incluye tanto el agua azul como el agua verde. La demanda evaporativa de un cultivo es la suma de la evaporación directa del agua del suelo y de la transpiración de las plantas, considerando que es equivalente a sus necesidades hídricas.

$$UA_{Agr} = \sum_{j=1}^n (ETb_j * S_{reg_j}) + (ETg_j * S_{total_j})$$

Donde ETb representa evapotranspiración de agua azul ($m^3 \text{ ha}^{-1}$), S_{reg} es igual a la superficie en regadío (ha), ETg es evapotranspiración de agua verde ($m^3 \text{ ha}^{-1}$), S_{total} representa la superficie total (ha), y finalmente n es igual al número de cultivos (j).

Las necesidades hídricas mensuales (CWR_j) son la suma de la evapotranspiración mensual de agua verde (ETg_j) y la evapotranspiración mensual de agua azul (ETb_j). CWR_j en $m^3 \text{ ha}^{-1}$, se obtiene al aplicar el factor de corrección 10 a la evapotranspiración mensual de cada cultivo (ETc):

$$CWR_j = (ETg_i + ETb_i) = 10 * ETc$$

Donde, ETc se mide en mm mes^{-1} , y se obtiene al multiplicar el coeficiente del cultivo (Kc) por la evapotranspiración de referencia (ETo):

$$ETc = ETo * Kc$$

ETg_j es igual a la precipitación efectiva (P_{eff}), en el caso de que esta cantidad no supere las necesidades hídricas del cultivo (CWR). La P_{eff} es el agua procedente de la lluvia que realmente puede ser aprovechada por la planta y se expresa en $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$.

$$ETg_j = \min(CWR_j; P_{eff})$$

Para el régimen de producción en regadío se supuso que todos los cultivos ven cubiertas sus necesidades hídricas. De esta manera, la evapotranspiración de agua azul se corresponde con el riego realizado y compensa la diferencia, si existiese, entre sus necesidades hídricas y la precipitación efectiva.

$$ETb_j = \max(0, CWR_j - P_{eff})$$

3.5.2. Flujo de agua virtual en la agricultura

El contenido de agua virtual (V ; $m^3 t^{-1}$) de cada cultivo se calcula en función del tipo de agricultura, dividiendo sus necesidades hídricas (CWR) por el rendimiento del cultivo (R ; $t ha^{-1}$):

- En régimen de secano se considera que V es igual al valor del contenido de agua virtual verde (Vg_{sec}), que se obtiene al dividir la evapotranspiración de agua verde (ETb) por el rendimiento en secano (R_{sec}).
- En régimen de regadío se considera tanto al agua azul como al agua verde. El contenido de agua virtual azul (Vb_{reg}) se obtiene al dividir la evapotranspiración de agua azul del cultivo (ETg) entre su rendimiento en regadío (R_{reg}).
- Para los cultivos protegidos se considera V igual al valor del contenido de agua virtual azul (V_{bprot}).

En función del contenido de agua virtual de los cultivos, se calcula el volumen de agua virtual exportada en la agricultura ($VW_{E,Agr}$) al multiplicar la cantidad de producto exportado (X_j ; t) por su contenido en agua virtual (V_j ; $m^3 t^{-1}$):

$$VW_{E,Agr} = \sum_{j=producto} X_j * V_j$$

El volumen de agua virtual importada en la agricultura ($VW_{I,Agr}$) se obtiene multiplicando la cantidad de producto importada ($M_{j,p}$; t) por el contenido en agua virtual en el país de origen ($V_{j,p}$; $m^3 T^{-1}$):

$$VW_{I,Agr} = \sum_{\substack{j=producto \\ p=país}} M_{j,p} * V_{j,p}$$

3.6. FLUJO DE AGUA VIRTUAL EN LA AGRICULTURA

Chapagain y Hoekstra (2003) desarrollaron una metodología para calcular el contenido de agua virtual de los diferentes tipos de ganado y productos ganaderos, y cuantificar los flujos de agua virtual relacionados con el comercio internacional del ganado y sus productos. En este estudio se definió a la "Huella Hídrica" de la ganadería (WF_{Gan} ; m^3) como la suma de los recursos hídricos utilizados en la ganadería (UA_{Gan}) y las importaciones de agua virtual contenida en los productos ganaderos ($VW_{I,Gan}$), menos el agua virtual exportada en estos productos ($VW_{E,Gan}$):

$$WF_{Gan} = UA_{Gan} + VW_{I,Gan} - VW_{E,Gan}$$

Primero, calcularon el contenido de agua virtual de un animal vivo, para posteriormente distribuirlo entre los distintos productos que se obtienen de él. En la metodología de cálculo se diferenciarán n_p productos que proceden de n_a clase de animales, donde cada producto proviene de una sola clase de animal, asumiendo que un producto ganadero exportado se ha producido íntegramente en un área geográfica determinada (incluida su alimentación, y los recursos hídricos, entre otros).

3.6.1. Contenido de agua virtual de un animal vivo

El contenido de agua virtual de un animal al final de su vida se define como el volumen total de agua que se utilizó para cultivar y procesar su alimentación, para su consumo directo y para limpiar sus instalaciones. Se diferencian tres componentes en el contenido de agua virtual de un animal vivo:

$$VWC_a(e,a) = VWC_{feed}(e,a) + VWC_{drink}(e,a) + VWC_{serv}(e,a)$$

Donde, $VWC_a(e,a)$ es el contenido de agua virtual de un animal a en el país exportador e , $VWC_{feed}(e,a)$ es el contenido de agua virtual de la alimentación, $VWC_{drink}(e,a)$ es el contenido de agua virtual del consumo directo (hidratación) y $VWC_{serv}(e,a)$ es el contenido de agua virtual utilizada en la realización de las actividades ganaderas (servicios). Todos los componentes se expresan en m^3 por t de animal vivo.

El contenido de agua virtual de los alimentos consumidos tiene dos partes: el agua real que se requiere para preparar la mezcla de alimentos y el agua virtual incorporada en los diferentes ingredientes de los piensos.

$$VWC_{feed}(e, a) = \frac{\int_{birth}^{slaughter} \left\{ q_{mixing}(e, a) + \sum_{c=1}^{n_c} SWD(e, c) * C(e, a, c) \right\} dt}{W_a(e, a)}$$

Donde $q_{mixing}(e, a)$ es el volumen de agua necesario para mezclar la alimentación del animal a en el país exportador e ($m^3 \text{ día}^{-1}$), mientras que $C(e, a, c)$ es la cantidad de cultivo c consumido por un animal a en el país exportador e ($t \text{ día}^{-1}$), $W_a(e, a)$ es el peso vivo promedio de un animal a en el país exportador e , al final de su vida (t), finalmente $SWD(e, c)$ representa la demanda específica de agua del cultivo c en el país exportador e ($m^3 \text{ T de cultivo}^{-1}$).

$SWD(e, c)$ se obtiene al dividir los requerimientos de agua del cultivo c en el país e ($CWR(e, c)$; $m^3 \text{ ha}^{-1}$) por el rendimiento del cultivo c ($CY(e, c)$; $T \text{ ha}^{-1}$):

$$SWD(e, c) = \frac{CWR(e, c)}{CY(e, c)}$$

El contenido de agua virtual del consumo directo es igual al volumen total de agua consumido directamente por el animal (hidratación) durante todo su ciclo vital. El requerimiento diario de agua para su consumo directo del animal a en el país exportado e ($q_d(e, a)$, $m^3 \text{ día}^{-1}$) se obtiene al dividir el peso vivo del animal al final de su vida ($W_a(e, a)$, t) por el peso vivo promedio de un animal a en el país exportador e , al final de su vida ($W_a(e, a)$):

$$VWC_{drink}(e, a) = \frac{\int_{birth}^{slaughter} q_d(e, a) dt}{W_a(e, a)}$$

El contenido de agua virtual utilizada para la realización de las actividades ganaderas es igual al volumen total de agua utilizada para limpiar las instalaciones, lavar los animales y otros servicios necesarios para cuidar el hábitat o el ambiente durante todo el ciclo vital del animal. El contenido de agua virtual de un animal a en el país exportador e ($VWC_{serv}(e, a)$, $m^3 \text{ t de animal vivo}^{-1}$) se obtiene al dividir el requerimiento hídrico diario para las actividades de un animal a en el país exportador e ($q_{serv}(e, a)$, $m^3 \text{ día}^{-1}$) por el peso vivo promedio de un animal a en el país exportador e , al final de su vida ($W_a(e, a)$):

$$VWC_{serv}(e, a) = \frac{\int_{birth}^{slaughter} q_{serv}(e, a) dt}{W_a(e, a)}$$

3.6.2. Contenido de agua virtual de los productos ganaderos

El contenido de agua virtual de un animal vivo debe ser distribuido entre los productos que se obtienen de él, evitando una doble contabilidad o pérdida de información. Para ello, se establecen dos niveles de producción: productos pecuarios primarios (derivados directamente de un animal vivo, p.e. leche, carne, piel, huevos, etc.) y secundarios (producidos a partir de los productos primarios, p.e. embutidos, queso, mantequilla, etc.).

En el primer nivel de procesamiento (productos primarios procedentes de animales vivos) se incluye una parte del contenido de agua virtual del animal vivo más el agua necesaria para su procesamiento. El agua necesaria, por tonelada de animal vivo a , para producir productos primarios en el país exportador e ($PWR(e, a)$, $m^3 \text{ t de animal vivo}^{-1}$) se obtiene al dividir volumen de agua utilizada en el proceso en m^3 por animal vivo a en el país exportador e ($Q_{proc}(e, a)$) por el peso vivo promedio de un animal a en el país exportador e , al final de su vida ($W_a(e, a)$):

$$PWR(e, a) = \frac{Q_{proc}(e, a)}{W_a(e, a)}$$

El contenido total de agua virtual de un animal vivo (VWC_a) y el agua necesaria para su procesamiento (PWR) debe atribuirse a los productos primarios por tonelada de animal vivo de un modo lógico. Para ello, se utiliza la fracción de producto ($pf(e,p)$) y la fracción de valor ($vf(e,p)$). Siendo $pf(e,p)$ de un producto p en un país exportador e el peso del producto primario obtenido por tonelada de animal vivo, y $vf(e,p)$ la relación entre el valor de mercado de un producto animal y la suma de los valores de mercado de todos los productos obtenidos de ese animal. Para calcular estos dos parámetros se utilizan las siguientes fórmulas:

$$pf(e,p) = \frac{W_p(e,a)}{W_a(e,a)} \qquad vf(e,p) = \left[\frac{v(p) * pf(e,p)}{\sum (v(p) * pf(e,p))} \right]$$

donde,

- $W_p(e,p)$ es el peso del producto primario p obtenido de un animal vivo a en el país exportador e .
- $W_a(e,a)$ es el peso vivo de un animal a en el país exportador e .

donde,

- el denominador es la suma de los productos primarios obtenidos del animal base a .
- $v(p)$ = valor de mercado del producto p (US\$ t⁻¹).

Por lo tanto, el contenido de agua virtual (VWC) del producto primario p (m³ t⁻¹) es:

$$VWC_p(e,p) = (VWC_a(e,a) + PWR(e,a)) * \frac{vf(e,p)}{pf(e,p)}$$

El segundo nivel de procesamiento (productos secundarios a partir de los productos primarios) se compone de parte del contenido de agua virtual del producto primario base y del agua consumida en su procesamiento (PWR). Para calcular el contenido de agua virtual del producto secundario p , se utiliza la misma fórmula que en el primer nivel de procesamiento, pero considerando que:

- $PWR(e,p)$ es el volumen de agua necesario para procesar una tonelada de producto primario p en productos secundarios.
- $pf(e,p)$ es el cociente entre el peso del producto secundario p por tonelada de producto primario en el país exportador e .
- $vf(e,p)$ es el cociente entre el valor de mercado de un producto secundario y el valor total de mercado de todos los productos obtenidos de ese producto primario.

De esta manera, se puede calcular el contenido de agua virtual de los productos terciarios, etc. El primer paso es siempre obtener el contenido de agua virtual del insumo (producto base) y el agua necesaria para procesarlo. El total de estos dos elementos se distribuye para los distintos productos transformados, en función de su fracción de producto y de su fracción de valor.

3.6.3. Flujo de agua virtual de los productos ganaderos

Para cada país, el volumen del flujo de agua virtual de entrada y salida se calcula multiplicando el volumen de producto comercializado por su respectivo contenido de agua virtual. El flujo de agua virtual VWF (m³ año⁻¹) de un país exportador e a un país importador i en el año t , como resultado del comercio del producto ganadero p (T año⁻¹) es igual a:

$$VWF(e,i,p,t) = PT(e,i,p,t) * VWC_p(e,p)$$

Donde PT es el comercio de productos ganaderos (t año⁻¹) del país exportado e al importador i en el año t , mientras que VWC_p representa el contenido de agua virtual (m³ t⁻¹) del producto ganadero p en el país exportador.

La diferencia entre el total de las importaciones y el total de las exportaciones de agua virtual es el saldo neto de agua virtual del país en el período de tiempo en cuestión.

3.7. FLUJOS MONETARIOS DE LA “HUELLA HÍDRICA”

Como parte del análisis de la relación entre flujos físicos y monetarios, Madrid (2007) estimó la rentabilidad monetaria del agua, tanto en la producción como en el comercio. La rentabilidad monetaria del agua en producción (RMP_{ij}), en € m^{-3} , como:

$$RMP_{ij} = \frac{PM_{ij}}{AWU_{ij}}$$

Donde, PM es la producción monetaria y AWU el uso del agua en la agricultura, del cultivo i en el área geográfica j .

La rentabilidad monetaria del agua en el comercio (flujos de agua), € m^{-3} , se calcula con las siguientes fórmulas:

$$RME_{ij} = \frac{YX_{ij}}{VWE_{ij}} \text{ y } RMI_{ij} = \frac{YI_{ij}}{VWI_{ij}}$$

Donde, RME es la rentabilidad de la exportación, RMI de la importación en € m^{-3} , e YX el flujo monetario de la exportación e YI el de la importación expresadas en euros corrientes, del cultivo i en la provincia j .

3.8. CÁLCULO DEL PRECIO DE LA “HUELLA HÍDRICA”

La metodología de cálculo se basa en los esquemas teóricos propuestos por Ramsey (1927) y Feldstein (1972). La estimación de los precios de la “Huella Hídrica”, tendría como objetivo la racionalización del recurso. Los precios de Ramsey se basan en el principio por el cual, los servicios que más deben contribuir con su precio a financiar los costes fijos son aquellos que tienen una menor elasticidad de la demanda, mientras que los servicios que contribuyen menos son aquellos con una elevada elasticidad. Esta norma también se conoce como la regla de la elasticidad inversa. Los precios de Ramsey también se pueden aplicar para determinar la contribución de cada consumidor a la financiación de los costes fijos. De este modo, aquellos consumidores con una elasticidad de la demanda menor, seguramente los que tengan menos opciones de consumo, son los que deben contribuir más. Sin embargo, este sistema puede considerarse poco equitativo socialmente.

La fórmula siguiente es conocida como precios de Ramsey, precios de Ramsey-Boiteaux o regla de la elasticidad inversa. Respecto a la notación, p_i y CMg_i representan, respectivamente, el precio y el coste marginal del bien i -ésimo, y η_{ii} representa la elasticidad de la demanda de dicho bien con respecto a su propio precio. Por su lado, δ , se conoce bajo la denominación de *número de Ramsey*, constituyendo la constante que permite satisfacer la restricción presupuestaria planteada en el programa de optimización.

$$\frac{(p_i - CMg_i)}{p_i} = \delta \times \frac{1}{\eta_{ii}}$$

La cuantía de δ dependerá del nivel de beneficios que haya sido fijado en la restricción presupuestaria (Laffont y Tirole, 1993, Bös, 1994, y Lasheras 1999). Asimismo, su expresión concreta, que vendrá determinada en todo caso por el coste sombra de los fondos públicos (Laffont y Tirole, 1993), variará en función de la ponderación que se le otorgue a la función de beneficios del productor en la función objetivo a maximizar (García Valiñas, 2004).

3.9. LA OFERTA DE “HUELLA HÍDRICA” EN ESPAÑA

Para el estudio de la Oferta de “Huella Hídrica” en España, vamos a servirnos de lo que podemos dar en denominar: “Modelo General de la Oferta de “Huella Hídrica”. Debemos señalar que en el presente estudio, se ha considerado como oferta, al total de “Huella Hídrica” disponible en España, en los sectores primario (agrario y ganadero), secundario (industria y construcción) y terciario (uso doméstico y turismo), tomando como fecha de referencia el año 2008. Para el cálculo de la misma, se han empleado las distintas metodologías al uso de Champagain y Hoekstra (2004), Llamas, R. (2004), Rodríguez-Casado (2008) y Esteban Moratilla (2010).

Con ello, se define la oferta de “Huella Hídrica” (Water footprint – WFP ; m^3) como el volumen de agua necesaria (directa o indirectamente) para la producción de los productos y servicios consumidos por los habitantes de un área geográfica determinada o industria, o persona.

Debemos tener en cuenta que, cuando hablamos de oferta, nos estamos refiriendo al volumen de agua total de la que se dispone para la producción que, no necesariamente, ha de coincidir con el volumen total de agua necesaria para la producción. De este modo, las personas tienden a generar un “comercio” de agua en el que se importan o exportan bienes y servicios hídricos. Con ello, podemos afirmar, que la “Huella Hídrica” tiene dos componentes fundamentales: el agua doméstica y el agua foránea. Tanto para el cálculo de la “Huella Hídrica” Interna como Externa, se debe tener en cuenta la diferenciación, ya descrita anteriormente, entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas.

$$WFP = IWFP + EWFP$$

Donde:

- $IWFP$ es la “Huella Hídrica” Interna”, que es el agua procedente de los recursos nacionales de un área geográfica determinada.
- $EWFP$ es la “Huella Hídrica” Externa” externa que es la cantidad de agua necesaria para desarrollar los productos o servicios consumidos en un área geográfica determinada, cuando éstos han sido producidos en el exterior.

a. “Huella Hídrica” Interna ($IWFP$)

La “Huella Hídrica” interna se define como el uso de los recursos hídricos domésticos para producir bienes y servicios consumidos por los habitantes de un área geográfica determinada. Es la suma del volumen total de agua utilizada de los recursos de agua doméstico en la economía nacional, menos el volumen de agua virtual exportada a otras áreas geográficas (mediante la exportación de productos producidos en el área geográfica determinada):

$$IWFP = AWU + IWW + DWW - VWE_{dom}$$

Donde:

- AWU son los usos agrícolas del agua (Agricultural Water Use)
- IWW son los usos industriales (Industrial Water Withdrawal)
- DWW son los usos domésticos (Domestic Water Withdrawal)
- VWE_{dom} es la exportación de agua virtual a otras áreas geográficas (Virtual water export related to export of domestically produced products)

Los usos industriales del agua se refieren a todo el volumen de agua consumido en cualquier proceso industrial, y los usos domésticos se refieren al consumo de agua potable y la utilizada por los gobiernos locales. Llamas (2005) considera que todavía es necesario avanzar en las metodologías de cálculo del agua virtual de los usos urbanos, para la producción de alimentos manufacturados y de los productos industriales (Ver apartados anteriores, metodología).

a.1. “Huella Hídrica” de la agricultura (WF_{Agr}) y de la ganadería (WF_{gan})

Rodríguez Casado et al. (2008) incorporaron una serie de aportaciones a la metodología desarrollada por Chapagain y Hoekstra (2004), para adaptarla de la mejor manera posible al modelo de agricultura española. Primero, se consideró que la “Huella Hídrica” (m^3) de la agricultura es la suma de los recursos hídricos utilizados en la agricultura (UA_{Agr}) y de las importaciones de agua virtual contenida en los productos agrícolas y ganaderos ($VW_{I,Agr}$), menos el agua virtual exportada en estos productos ($VW_{E,Agr}$):

$$WF_{Agr} = UA_{Agr} + VW_{I,Agr} - VW_{E,Agr}$$

Donde:

- UA_{Agr} (m^3) son los recursos hídricos utilizados en la agricultura.
- $VW_{I,Agr}$ es el volumen de agua virtual importada en la agricultura.
- $VW_{E,Agr}$ es el volumen de agua virtual exportada en la agricultura.

Desglosando la formulación matemática tenemos que UA_{Agr} (m^3) es la suma de las demandas evapotranspirativas de los cultivos producidos, sin contabilizar las pérdidas de agua que puedan producirse en

el riego, asumiendo que en un porcentaje alto pueden ser reutilizadas. UA_{Agr} incluye tanto el agua azul como el agua verde.

TABLA 5. Fórmulas matemáticas utilizadas en el cálculo del consumo de agua en la agricultura		
Fórmula	Unidades	Descripción
$UA_{Agr} = \sum_{j=1}^n (ETb_j * S_{reg_j}) + (ETg_j * S_{total_j})$	UA_{Agr} $m^3 ha^{-1}$ ha $m^3 ha^{-1}$ ha	<ul style="list-style-type: none"> ■ Demanda evaporativa de los cultivos ■ ETb = evapotranspiración de agua azul ■ S_{reg} = superficie en regadío ■ ETg = evapotranspiración de agua verde ■ S_{total} = superficie total
$CWR_j = (ETg_i + ETb_i) = 10 * Etc$	$m^3 ha^{-1}$ mm mm mm	<ul style="list-style-type: none"> ■ CWR_j = Necesidades hídricas del cultivo ■ ETg_j = Evapotranspiración de agua verde ■ ETb_j = Evapotranspiración de agua azul ■ $Etc.$ = Evapotranspiración de cada cultivo
$ETc = ETo * Kc$		Eto = evapotranspiración de referencia Kc = coeficiente del cultivo
$ETg_j = \min(CWR_j; P_{eff})$		P_{eff} = agua procedente de la lluvia
$ETb_j = \max(0, CWR_j - P_{eff})$		
Flujo de agua virtual en la agricultura		
$VW_{I,Agr} = \sum_{\substack{j=producto \\ p=pais}} M_{j,p} * V_{j,p}$		
	$m^3 t^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> ■ $(V_{j,p}; m^3 T^{-1})$ = contenido en agua virtual en el país de origen ■ $(M_{j,p}; t)$ = cantidad de producto importada
$VW_{E,Agr} = \sum_{j=producto} X_j * V_j$		
	$m^3 t^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> ■ $(X_j; t)$ = cantidad de producto exportado ■ $(V_j; m^3 t^{-1})$ = contenido de agua virtual

Fuente: Elaboración propia a partir de Sotelo J.A. et alii (2010).

Los valores de superficie y precipitación se obtuvieron de los Anuarios de Estadística del MARM. Los valores de evapotranspiración se obtuvieron del Sistema Integrado de Información del agua (SIA) (MARM, 2008c).

TABLA 6. Fórmulas matemáticas utilizadas en el cálculo del consumo de agua en la agricultura

Fórmula	Unidades	Descripción
$VWC_a(e, a) = VWC_{feed}(e, a) + VWC_{drink}(e, a) + VWC_{serv.}(e, a)$	m ³ t ⁻¹ de animal vivo	<ul style="list-style-type: none"> ■ $VWC_a(e, a)$ = contenido de agua virtual de un animal a en el país exportador e ■ $VWC_{feed}(e, a)$ = contenido de agua virtual de la alimentación ■ $VWC_{drink}(e, a)$ = contenido de agua virtual del consumo directo (hidratación) ■ $VWC_{serv.}(e, a)$ = contenido de agua virtual utilizada en la realización de las actividades ganaderas (servicios)
$VWC_{feed}(e, a) = \frac{\int_{birth}^{slaughter} \left\{ q_{mixing}(e, a) + \sum_{c=1}^{n_c} SWD(e, c) * C(e, a, c) \right\} dt}{W_a(e, a)}$	m ³ día ⁻¹ t día ⁻¹ t m ³ t de cultivo ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> ■ $q_{mixing}(e, a)$ = volumen de agua necesario para mezclar la alimentación del animal a en el país exportador e. ■ $C(e, a, e)$ = cantidad de cultivo c consumido por un animal a en el país exportador e ■ $W_a(e, a)$ = peso vivo promedio de un animal a en el país exportador e, al final de su vida ■ $SWD(e, c)$ = demanda específica de agua del cultivo c en el país exportador e.
$SWD(e, c) = \frac{CWR(e, c)}{CY(e, c)}$	m ³ ha ⁻¹ T ha ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> ■ $CWR(e, c)$ = requerimientos de agua del cultivo c en el país e ■ $CY(e, c)$ = rendimiento del cultivo c
$VWC_{drink}(e, a) = \frac{\int_{birth}^{slaughter} q_d(e, a) dt}{W_a(e, a)}$	m ³ día ⁻¹ t	<ul style="list-style-type: none"> ■ $q_d(e, a)$ = requerimiento diario de agua para su consumo directo del animal a en el país exportado e ■ $W_a(e, a)$ = peso vivo del animal al final de su vida
$VWC_{serv.}(e, a) = \frac{\int_{birth}^{slaughter} q_{serv.}(e, a) dt}{W_a(e, a)}$	m ³ t de animal vivo ⁻¹ t	<ul style="list-style-type: none"> ■ $q_{serv.}(e, a)$ = requerimiento hídrico diario para las actividades de un animal a en el país exportador e ■ $W_a(e, a)$ = peso vivo promedio de un animal a en el país exportador e

b. “Huella Hídrica” Externa (EWFP)

Se define como el volumen anual de recursos hídricos usados en otras áreas geográficas para manufacturar los productos o prestar los servicios consumidos en una determinada área geográfica. Es igual al agua virtual importada ($VWEI$) menos el volumen de agua virtual exportada a otras áreas geográficas determinadas como resultado de la reexportación de productos importados ($VWE_{re.export}$):

$$EWFP = VWI - VWE_{re-export}$$

3.10. LA DEMANDA DE “HUELLA HÍDRICA” DE ESPAÑA

La demanda de “Huella Hídrica” (Water footprint – WFP) es el volumen de agua necesaria, directa o indirectamente, para la producción de los bienes y servicios consumidos por los habitantes de un área geográfica determinada. Dicha población se abastece de productos elaborados domésticamente e importados, con lo que la demanda de “Huella Hídrica” tiene dos componentes fundamentales: el agua doméstica y el agua foránea.

Atendiendo a ambos componentes, podemos establecer una única función de demanda en la que se englobe el total de los factores de la “Huella Hídrica” o podemos emplear diversas funciones de demanda, atendiendo a los componentes de la “Huella Hídrica” Interna” (agrícola, industrial y doméstica) y otra para función de demanda para la “Huella Hídrica” Externa” (agua importada o reexportada). En nuestro caso hemos utilizado una función de demanda distinta para cada componente de la “Huella Hí-

drica” atendiendo a la “Huella Hídrica” Interna”, dentro de la cual hemos analizado la propia “Huella Hídrica” Externa”; es decir, hemos estudiado el consumo, demanda de agua procedente de la exportación e importación de “Huella Hídrica” en los sectores agrarios (agricultura, ganadería, pesca y silvicultura), industrial (industrias y construcción) y doméstico (en el que hemos incluido el turismo). En el estudio se hace distinción entre la demanda total de “Huella Hídrica” en toda España, por Comunidades Autónomas y por Provincias, en el año 2008. Las dos Ciudades Autónomas (Ceuta y Melilla) no se han incluido, aunque si que se han tenido en cuenta en los cálculos, puesto que los valores son muy inferiores al resto de Comunidades y son poco representativos. Para la realización de los distintos cálculos se han empleado datos del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM), del Instituto Nacional de Estadística (INE), Instituto Nacional de Industria (INI), Hoekstra, A.; Chapagain, A.; Llamas, R.; Rodríguez Casado, R., Garrido, A.; Esteban Moratilla, F.; Observatorio de precios y mercados; y, el Observatorio de la sostenibilidad en España.

Para el cálculo de la demanda de “Huella Hídrica” en España, hemos tenido en cuenta, el total de Agua Virtual de España. Con todo ello, debemos tener en cuenta la, ya descrita anteriormente, “**Huella Hídrica” Interna**” (**internal water footprint - IWFP**), la cual se define como el uso de los recursos hídricos domésticos para producir bienes y servicios consumidos por los habitantes de un área geográfica determinada y, que está configurada por;

1. **el Agua Directa (AD)** que es la cantidad de agua requerida únicamente en el proceso productivo, es decir, el agua que tradicionalmente se contabiliza. No obstante, la obtención de un producto, por lo general, implica la entrada de varias materias primas, productos intermedios y una serie de servicios en las distintas etapas del proceso productivo. En la producción de estas entradas intermedias también se ha consumido agua. El Agua directa, a su vez, puede clasificarse (Llamas, R., 2004) atendiendo a tres colores;

1.1. **Agua Azul**, es el volumen de agua dulce extraído de fuentes superficiales o de aguas subterráneas que utiliza la gente y no es devuelta; para productos agrícolas se contabiliza sobre todo la evaporación del agua de regadío de los campos.

1.2. **Agua Verde**, es el agua que proviene de las precipitaciones y empapa el suelo permitiendo la existencia de vegetación natural (bosques, praderas, matorral, tundra, etc.) así como los cultivos de secano (rain-fed agriculture en la terminología anglosajona). Esta agua vuelve a evaporarse directamente desde el suelo o por la transpiración de las plantas (Llamas, R., 2004).

1.3. **Agua Gris**, el volumen de agua requerido para diluir los contaminantes liberados en los procesos de producción hasta tal concentración que la calidad del agua se mantenga por encima de los estándares de calidad acordados.

2. **El Agua Indirecta (AI)** que es el agua asociada a las entradas intermedias (Esteban Moratilla, F. et alii, 2010).

La “Huella Hídrica” Interna” es, por tanto, la suma del volumen total de agua utilizada de los recursos de agua doméstico en la economía nacional, menos el volumen de agua virtual exportada a otras áreas geográficas (mediante la exportación de productos producidos en el área geográfica determinada), es decir, la suma de las Aguas Directas menos las Aguas Indirectas:

$$IWFP = AWU + IWW + DWW - VWE$$

$$AV = AD - AI$$

Donde:

- *AWU* son los usos agrícolas del agua (Agricultural Water Use)
- *IWW* son los usos industriales (Industrial Water Withdrawal)
- *DWW* son los usos domésticos (Domestic Water Withdrawal)
- *VWEdom* es la exportación de agua virtual a otras áreas geográficas (Virtual water export related to export of domestically produced products).
- *AV* es el Agua Virtual Total • *AD* es el Agua Directa • *AI* es el Agua Indirecta

De igual modo, para la estimación de funciones económicas de demanda de “Huella Hídrica”, se ha planteado una especificación dinámica, en el contexto de datos de panel. Se ha propuesto una especificación lineal de las funciones de demanda, puesto que viene siendo una de las formas funcionales empleadas con mayor frecuencia en este contexto (Arbués et al., 2003). Este tipo de funciones genera

elasticidades mayores para usuarios que se enfrentan a mayores niveles de precios, aspecto que ha sido contrastado empíricamente (Billings y Day, 1989).

3.10.1. Demanda total de “Huella Hídrica” en España

La demanda de “Huella Hídrica” de los consumidores, está relacionada con la “Huella Hídrica” de los productores en la cadena de producción. La “Huella Hídrica” total de un consumidor es la suma de su “Huella Hídrica” directa e indirecta. Siendo la “Huella Hídrica” directa de un consumidor o productor, o de un grupo de consumidores o productores, el consumo de agua dulce y la contaminación asociada a su uso por el consumidor o el productor (Water Footprint Network, 2010). La “Huella Hídrica” indirecta de un consumidor o productor se define como el consumo de agua dulce y la contaminación que está detrás de los productos que son, consumidos o producidos. Se considera que es igual a la suma de la “Huella Hídrica” de todos los productos consumidos por el consumidor o de todos los insumos (no hídricos) utilizados por el productor.

La “Huella Hídrica” de un consumidor (WF_{cons}) es el volumen total de agua dulce consumida y contaminada, necesaria para la producción de los bienes y servicios consumidos por el consumidor. La “Huella Hídrica” de un grupo de consumidores es igual a la suma de la “Huella Hídrica” de los consumidores individuales. Se calcula sumando la “Huella Hídrica” directa de la persona y su “Huella Hídrica” indirecta:

$$WF_{cons} = WF_{cons.dir} + WF_{cons.indir}$$

Donde:

- $WF_{cons.dir}$ es la “Huella Hídrica” directa, que se refiere al consumo y la contaminación del agua relacionada con su uso en el hogar o en el jardín.
- $WF_{cons.indir}$ es la “Huella Hídrica” indirecta, que se refiere al consumo y la contaminación del agua asociada con la producción de los bienes y servicios consumidos por el consumidor. Es decir, el agua que se utilizó para producir la comida, la ropa, el papel, la energía y los bienes industriales consumidos.

El uso indirecto del agua se calcula multiplicando todos los productos consumidos por sus respectivas huellas hídricas:

$$WF_{cons.indir} = \sum p(C(p) * WF_{prod}(p))$$

Donde:

- $C(p)$ es el consumo del producto p (unidades del producto / tiempo).
- $WF_{prod}(p)$ es la “Huella Hídrica” de ese producto (volumen de agua / unidad de producto).

El volumen total consumido de p generalmente procede de diferentes lugares x . La “Huella Hídrica” promedio de un producto consumido p es:

$$WF_{prod}^*(p) = \frac{\sum_x (C(x, p) * WF_{prod}^*(x, p))}{\sum_x C(x, p)}$$

Donde:

- $C(x, p)$ es el consumo de productos p procedentes de x (unidades de producto/tiempo).
- $WF_{prod}(x, p)$ es la “Huella Hídrica” de los productos p procedentes de x (volumen de agua/unidad de producto).

La “Huella Hídrica” de los bienes y servicios privados se calcula para cada consumidor. La “Huella Hídrica” de los bienes y servicios públicos o compartidos se asigna a cada consumidor tomando como base la cuota de consumo de cada uno. Como ejemplo, en el consumo de carne o de otros productos derivados de la producción ganadera, la “Huella Hídrica” directa del consumidor es el volumen de agua consumida o contaminada al preparar y cocinar la carne. La “Huella Hídrica” indirecta del consumidor de carne depende de la “Huella Hídrica” directa del minorista que vende la carne, del procesador de alimentos que prepara la carne para la venta, de la explotación ganadera que alimenta el animal y de los cultivos necesarios para alimentar a los animales. La “Huella Hídrica” indirecta del

minorista depende de la “Huella Hídrica” directa del procesador de alimentos, las explotaciones ganaderas y los cultivos, etc.

3.10.1.1. Demanda de agua en los usos agrícolas

Para el cálculo del consumo de agua en la agricultura, se ha seguido la metodología de Champagain y Hoekstra (2004), de Rodríguez-Casado (2008) y Esteban Moratilla (2010).

En el sector agrario se han realizado los distintos cálculos atendiendo a las diferentes demandas de agua en la agricultura, ganadería y en la silvicultura.

– **El Agua Directa del sector agrícola** (AD Agricultura) es el volumen de agua utilizada para elaborar los productos agrícolas que se generan en España, considerando tanto los productos que se consumen dentro de nuestras fronteras como los productos destinados a consumirse en otros países (productos que se exportan). La estimación de este volumen de agua se realiza en función del agua asociada a cada cultivo y su producción, para los distintos municipios españoles.

$$AD_{AGRICULTURA} = \sum_{i=1}^n (AD_{verde,i} * Prod_i) + (AD_{azul,i} * Prod_i)$$

Donde,

- AD_{verde} es el Agua Directa Verde del cultivo i (m^3/t)
- AD_{azul} es el Agua Directa Azul del cultivo i (m^3/t)
- $Prod_i$ Producción del cultivo i (m^3/t)

Atendiendo a la metodología de Champagain y Hoekstra (2004), de Rodríguez-Casado (2008), el Agua Directa de la agricultura (UA_{Agr} (m^3)) es la suma de las demandas evaporativas de los cultivos producidos, sin contabilizar las pérdidas de agua que puedan producirse en el riego, asumiendo que en un porcentaje alto pueden ser reutilizadas. UA_{Agr} incluye tanto el agua azul como el agua verde. La demanda evaporativa de un cultivo es la suma de la evaporación directa del agua del suelo y de la transpiración de las plantas, considerando que es equivalente a sus necesidades hídricas (Sotelo, J.A. et alii, 2010).

– El **Agua Directa del sector ganadero** (AD Ganadería) es el volumen de agua consumida por las existencias ganaderas, constituida exclusivamente por Agua azul. Su estimación se realiza en función de las dotaciones, y del número de cabezas de los seis tipos de ganado existentes.

$$AD_{GANADERÍA} = \sum_{i=1}^{n=6} (AD_{AZUL,i} * N^{\circ} C_i)$$

Donde,

- AD_{azul} es el Agua Directa Azul para el tipo de ganado i ($m^3/cabeza$)
- $N^{\circ} C_i$ es el número de cabezas para el tipo de ganado ii

– El **Agua Directa de la Silvicultura** (AD Silvicultura) es el volumen de agua empleado en abastecer las necesidades anuales de las distintas especies, ETverde, se ha realizado a nivel municipal siguiendo un procedimiento análogo al empleado en el sector agrícola.

$$AD_{SILVICULTURA} = \min(NHF, PP_{ef})$$

Donde,

- NHF : necesidades hídricas de la especie (mm/mes), en este caso igual a la evapotranspiración de referencia (ET_o).
- PP_{ef} : precipitación efectiva (mm).

– El **Agua Directa de la Pesca** (AD Pesca) es el volumen de agua consumida por las extracciones pesqueras, constituida exclusivamente por Agua azul.

$$AD_{PESCA} = \sum_{i=1}^{n=10} (AD_{AZUL,i} * Volumen.Extr_i)$$

Donde,

- AD_{azul} es el Agua Directa Azul
- $Volumen.Extr$: Volumen de extracciones

Atendiendo a la demanda de “Huella Hídrica” agraria, donde el agua es uno de los principales recursos de producción (por el consumo directo e indirecto de los animales o plantas), se ha empleado

una función lineal de demanda total. En dicha función, se han eliminado los componentes aceleradores propios de la producción, por lo que se han tomado como base los precios del propio año 2008 sin tener en cuenta periodos de retardo.

$$x_{it} = \alpha + \rho x_{it} + \beta p_{it} + \gamma s_t + \zeta r_i + \mu_i + e_{it}$$

Donde:

x_{it} : Consumo total realizado.

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \mu$: Son parámetros.

x_{it} : Consumo realizado en el periodo anterior.

p_{it} : precios del agua con un solo periodo de retardo.

r_i : características concretas de la ganadería, agricultura, pesca o silvicultura.

s_t : Cambio temporal basado en variaciones en el clima.

e_{it} : Margen de error.

Por otro lado, para el cálculo del gasto en “Huella Hídrica” en el sector agrario realizado por cada una de las Comunidades Autónomas se ha empleado una función sumatorio del total de agua demandada en el sector agrario, atendiendo a los precios de mercado del año 2008 para cada una de las Comunidades Autónomas, entre el número total de habitantes de cada Comunidad.

$$Q_{AGUA.AGRICULTURA.PESCA.SILVICULTURA.Y.GANADERIA} = \left(\sum_{n=1,2,3\dots}^{añoi} p_{i,t} * q_{i,t} \right) / hab$$

Donde,

- Q es la demanda de agua en la agricultura ($\text{€}/\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$).
- p es el precio del recurso agua, en una determinada región en un momento de tiempo concreto (€).
- q es el consumo del recurso agua, en una determinada región en un momento de tiempo concreto (m^3).
- hab . es el número total de habitantes del área geográfica estudiada.

3.10.1.2. Demanda de agua en los usos industriales

Las fuentes de información disponibles a nivel nacional sobre consumos y captaciones son las Cuentas Satélite del Agua (INE), de momento sólo proporcionan valores globales para España, y la “Encuesta sobre el uso del agua en el sector industrial” de 2009 (INE), que muestra los datos desglosados por CC.AA. y los sectores industriales C.N.A.E. 93. De igual modo, se han empleado los datos publicados por el Ministerio de Medio Ambiente, Rural Y Marino, y la información económica del Banco de España para el año 2008. Puesto que los datos de los que se disponen son muy escasos, la estimación en el cálculo de la demanda de Agua Directa en el Sector Industrial (donde hemos incluido al Sector de la Construcción) se ha considerado que el agua consumida es directamente proporcional al Valor Añadido Bruto (VAB) del Sector. A favor de esta aproximación está el bajo consumo de agua asociado a la industria y la capacidad para reflejar el crecimiento y el decrecimiento de cada sector (Esteban Moratilla, F., 2010).

Para cuantificar el valor del Agua Directa consumida por los sectores industriales se han utilizado los siguientes datos:

- Volumen total de agua captada por la empresa (referido a captaciones propias).
- Volumen total de agua suministrada a través de una red pública.

Finalmente, se muestra como resultado de Agua Directa la suma de ambos datos. El siguiente paso ha sido el cálculo del Agua Directa empleada por los sectores de servicios que completan el sistema productivo español. Para ellos la única fuente de información disponible ha sido las Cuentas Satélite. Para proceder a la estimación del Agua azul a nivel autonómico se ha utilizado el VAB sectorial de cada Comunidad Autónoma repartiendo el agua total proporcionalmente al valor del VAB autonómico.

$$AD_{INDUSTRIAL.CC.AA.i} = \frac{AD_{INDUSTRIA.ESPAÑOLA.i} * VAB_{CC.AA.i}}{VAB_{España.i}}$$

Donde, (i) representa cada sector.

Respecto a la demanda de “Huella Hídrica” industrial, atendiendo a cada una de las Comunidades Autónomas de España, el agua supone un componente fundamental y principal en el proceso productivo en la mayor parte de las empresas e industrias. Atendiendo al propio proceso de producción, en la función de demanda se hace indispensable incorporar un componente acelerador (tomando como base los precios con un solo periodo de retardo) e incluir la variable dependiente retardada relativa al trimestre correspondiente al año anterior sin inercias estacionales (García Valiñas, M^a. A):

$$x_{it} = \alpha + \rho x_{it-4} + \beta p_{it-1} + \gamma s_t + \zeta r_i + \mu_i + e_{it}$$

Donde:

x_{it}: Consumo total realizado.

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \mu$: Son parámetros

x_{it-4}: Consumo realizado en el periodo anterior

p_{it-1}: precios del agua con un solo periodo de retardo.

r_i: características concretas de cada tipo de industria vs. comercio.

s_t: Cambio temporal basado en variaciones en el clima.

e_{it}: Margen de error.

En la función lineal, el vector de variables constantes en el tiempo, r_i, se identifica con indicadores del tipo y nivel de actividad de las empresas, que constituyen factores importantes a considerar en la estimación de las demandas industriales (Renzetti (2002), Reynaud (2003)). El término de error aparece desglosado.

De igual modo, se ha empleado una función sumatorio del total de las demandas del sector industrial atendiendo al precio del agua:

$$Q_{AGUA.INDUSTRIA} = \left(\sum_{n=1,2,3\dots}^{añoi} p_{i,t} * q_{i,t} \right) / hab$$

Donde,

- Q es la demanda de agua en la industria (€/m³/hab/año).
- p es el precio del recurso agua, en una determinada región en un momento de tiempo concreto (€).
- q es el consumo del recurso agua, en una determinada región en un momento de tiempo concreto (m³).
- hab. es el número total de habitantes del área geográfica estudiada.

3.10.1.3. Demanda de agua en los usos domésticos, turismo y servicios

Atendiendo a la demanda de agua doméstica, respecto a cada una de las Comunidades Autónomas de España, el agua es un bien de primera necesidad para los hogares, de ahí que parezca especialmente relevante reflejar las inercias existentes en el consumo, formalizando un modelo de *ajuste parcial* (García Valiñas, M^a. A), en el que se incorpora la variable dependiente retardada. Así, se propone una especificación de las funciones de demanda tal como sigue:

$$x_{it} = \alpha + \rho x_{it-1} + \beta p_{it-2} + \gamma s_t + \delta f_i + \mu_i + e_{it}$$

Analizando en detalle la notación, x_{it} denota el consumo que realiza en el período t el individuo i-ésimo, figurando como variable explicativa el consumo del período anterior, x_{it-1}. Se incorporan asimismo otras variables independientes, entre las que figura el precio, p_{it-2}, que ha sido incluido con un retardo de dos períodos, reflejando así posibles retrasos en la reacción de los usuarios. Se intuye que dicha reacción será más lenta que la atribuida a otros usuarios debido a la presencia de hábitos en el consumo. Así se espera que, aunque el usuario doméstico tenga conocimiento de la factura y su gasto total en agua en el período siguiente, reaccione al cabo de dos períodos. En consecuencia, hemos optado por incorporar el precio correspondiente a dos períodos precedentes.

El vector s_t incluye variables que presentan cambio temporal, pero no así por individuos, reflejando, básicamente, aspectos del clima en cada período. Por f_i representamos un vector de características individuales de las que se dispone información, y que no sufren ninguna modificación o que presentan escasa variabilidad en el intervalo temporal analizado. Se trata de algunos aspectos socioeconómicos, que reflejarían la capacidad económica de los hogares, así como su tamaño, y que tienen una influencia

destacable sobre la demanda de agua (Arbués *et al.*, 2003). Finalmente, los dos últimos componentes de la ecuación estarían reflejando un término de error compuesto, en el que tiene cabida la heterogeneidad individual no observable, que ha sido denotada por i , y el resto de perturbaciones aleatorias, especificados mediante el componente eit , variable temporal e individualmente.

El procedimiento utilizado para la estimación del consumo de Agua de forma Directa consiste en emplear los datos del Padrón municipal y los coeficientes de consumo medio por habitante y día (Esteban Moratilla, F., 2010):

$$AD_{CONSUMO.HUMANO.AÑO} = \frac{Cc_{Habitante} * N^o Habitantes * 365}{1000}$$

Donde,

- $Cc_{Habitante}$ es el coeficiente de consumo de agua (l/hab/día).
- N^o Habitantes es el número de habitantes.
- 365 son el número de días totales de un año no bisiesto.

Al igual que en los otros dos sectores, se ha empleado una formulación matemática en la que se relaciona consumo individual del volumen total de agua del sector con el precio (el coste) del agua en el sector en cada Provincia, para un determinado periodo de tiempo.

$$Q_{AGUA.CONSUMO.DOMESTICO} = \left(\sum_{n=1,2,3\dots}^{añoi} p_{i,t} * q_{i,t} \right) / hab$$

Donde,

- Q es la demanda de agua por las economías domésticas (€/m³/hab/año).
- p es el precio del recurso agua, en una determinada región en un momento de tiempo concreto (€).
- q es el consumo del recurso agua, en una determinada región en un momento de tiempo concreto (m³).
- $hab.$ es el número total de habitantes del área geográfica estudiada.

3.11. ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO

La metodología de cálculo del “coste-beneficio” de la “Huella Hídrica” de nuestro país, vamos a aplicarla a los sectores económicos.

a. Sector Primario o Agrario:

$$U = U(x, y) = X_{it}^{\alpha} \cdot Y_{it}^{\beta}$$

En los que X representa la superficie de tierra de cultivo y pastos, e Y el valor de la “Huella Hídrica” (Suma total del Agua Directa Total del Sector Primario, el Agua Total Interna, el Agua procedente del Comercio Exterior). Donde x depende a su vez de Y ; $X=f(Y)$, ya que se pretende averiguar si “ Y ” es un coste o un beneficio en términos de la función objetivo U .

$$U = U(x, y) = (Y_{it}^{\beta})_{it}^{\alpha} \cdot Y_{it}^{\beta}$$

Con lo que debemos hallar las derivadas parciales de la utilidad respecto de X como de Y :

Derivada Parcial respecto de X : $\frac{\delta U}{\delta X} = \alpha X_{i2008}^{\alpha-1} \cdot Y_{i2008}^{\beta}$

Deriva Parcial respecto de Y : $\frac{\delta U}{\delta Y} = X_{i2008}^{\alpha} \cdot \beta Y_{i2008}^{\beta-1}$

$$\frac{dU}{dX} = \frac{\delta U}{\delta X} + \left(\frac{\delta U}{\delta Y} \right) \cdot \left(\frac{\delta Y}{\delta X} \right)$$

$\frac{\delta U}{\delta X}$	Comportamiento de X
> 0	Beneficio directo
< 0	Coste directo
$= 0$	negligible

Donde:

$\frac{dU}{dX}$, es el Efecto Total

$\frac{\delta U}{\delta X}$, es la derivada Parcial respecto de X: Efecto Directo.

$(\frac{\delta U}{\delta Y}) \cdot (\frac{\delta Y}{\delta X})$, es el Efecto Indirecto o cruzado

b. Sector Secundario (Industria y Construcción)

$$U = U(x, y) = X_{it}^{\alpha} \cdot Y_{it}^{\beta}$$

En los que X representa el VAB de la producción industrial, e Y el valor de la “Huella Hídrica” (Suma total del Agua Directa Total del Sector Secundario, el Agua Total Interna, el Agua procedente del Comercio Exterior). Donde x depende a su vez de Y; $X=f(Y)$, ya que se pretende averiguar si “Y” es un coste o un beneficio en términos de la función objetivo U.

$$U = U(x, y) = (Y_{it}^{\beta})^{\alpha} \cdot Y_{it}^{\beta}$$

Con lo que debemos hallar las derivadas parciales de la utilidad respecto de X como de Y:

Derivada Parcial respecto de X: $\frac{\delta U}{\delta X} = \alpha X_{i2008}^{\alpha-1} \cdot Y_{i2008}^{\beta}$

Deriva Parcial respecto de Y: $\frac{\delta U}{\delta Y} = X_{i2008}^{\alpha} \cdot \beta Y_{i2008}^{\beta-1}$

$$\frac{dU}{dX} = \frac{\delta U}{\delta X} + (\frac{\delta U}{\delta Y}) \cdot (\frac{\delta Y}{\delta X})$$

$\frac{\delta U}{\delta X}$	Comportamiento de X
> 0	Beneficio directo
< 0	Coste directo
= 0	negligible

Donde:

$\frac{dU}{dX}$, es el Efecto Total

$\frac{\delta U}{\delta X}$, es la derivada Parcial respecto de X: Efecto Directo.

$(\frac{\delta U}{\delta Y}) \cdot (\frac{\delta Y}{\delta X})$, es el Efecto Indirecto o cruzado

c. Sector Terciario (Servicios, Usos Domésticos, Turismo y Hostelería)

$$U = U(x, y) = X_{it}^{\alpha} \cdot Y_{it}^{\beta}$$

En los que X representa el uso doméstico, de los servicios hosteleros y turísticos, e Y el valor de la “Huella Hídrica” (Suma total del Agua Directa Total del Sector Terciario, el Agua Total Interna, el Agua procedente del Comercio Exterior). Donde x depende a su vez de Y; $X=f(Y)$, ya que se pretende averiguar si “Y” es un coste o un beneficio en términos de la función objetivo U.

$$U = U(x, y) = (Y_{it}^\beta)_{it}^\alpha \cdot Y_{it}^\beta$$

Con lo que debemos hallar las derivadas parciales de la utilidad respecto de X como de Y:

Derivada Parcial respecto de X: $\frac{\delta U}{\delta X} = \alpha X_{i2008}^{\alpha-1} \cdot Y_{i2008}^\beta$

Deriva Parcial respecto de Y: $\frac{\delta U}{\delta Y} = X_{i2008}^\alpha \cdot \beta Y_{i2008}^{\beta-1}$

$$\frac{dU}{dX} = \frac{\delta U}{\delta X} + \left(\frac{\delta U}{\delta Y}\right) \cdot \left(\frac{\delta Y}{\delta X}\right)$$

$\frac{\delta U}{\delta X}$	Comportamiento de X
> 0	Beneficio directo
< 0	Coste directo
= 0	negligible

Donde:

$\frac{dU}{dX}$, es el Efecto Total

$\frac{\delta U}{\delta X}$, es la derivada Parcial respecto de X: Efecto Directo.

$\left(\frac{\delta U}{\delta Y}\right) \cdot \left(\frac{\delta Y}{\delta X}\right)$, es el Efecto Indirecto o cruzado

NOTA METODOLÓGICA

El presente estudio se basa en información sobre cálculos de huella hídrica de Water Footprint Network, utilizando para ello información de WaterStat Database.

Los anexos de Water Footprint of Nations Vol 1 y Vol 2 consultados fueron:

- VIII y IX (WF of National Consumption)
- I (WF of National Production)
- II y III (Virtual Water Flows)
- IV y V (Virtual Water Savings)

La cartografía fue elaborada en su totalidad por AgroDer, utilizando información de las bases de datos contenidas en dichos reportes, así como de WaterStat database.

Los cálculos de huella hídrica de producción y consumo fueron realizados por AgroDer, utilizando la metodología de: Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, M. M. Aldaya, and M. M. Mekonnen. 2011. The Water Footprint Assessment Manual, Setting the Global Standard. Earthscan. London, Washington, D.C. 199 p.

Las principales fórmulas utilizadas:

Huella Hídrica de Consumo Nacional

La huella hídrica de consumo (HH cons) en una nación tiene 2 componentes, HH interna y HH externa:

$$HH_{\text{cons}} = HH_{\text{(cons, int)}} + HH_{\text{(cons, ext)}}$$

Contempla consumo directo y consumo indirecto, tanto de productos agropecuarios como industriales.

$$HH_{\text{cons}} = HH_{\text{cons,dir}} + F_{\text{cons,indir}} \text{ (agropecuario)} + HH_{\text{cons,indir}} \text{ (industrial)}$$

Huella Hídrica de Consumo *per cápita*

$$HH_{\text{(cons per cápita)}} = HH_{\text{(consumo)}} / \text{Población total del país}$$

Huella Hídrica de Producción Nacional

Contempla tanto lo que se produce para consumo interno como aquello utilizado para exportación.

$$HH_{\text{(producción)}} = HH_{\text{(producción agrícola)}} + HH_{\text{(producción pecuaria)}} +$$

$$HH_{\text{(producción industrial)}} + HH_{\text{(pastoreo)}} + HH_{\text{(proveeduría de agua potable)}}$$

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

LIBROS EN PDF

Comisión Nacional del Agua. *Estadísticas del agua en México*, Edición 2012, Conagua, México, 2012.

El agua en México, visto desde la academia, Blanca Jiménez y Luis Marín, Academia Mexicana de Ciencias, México, 2005.

Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. WWF México y AgroDer. México, 2012.

Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España, Fundación Mapre, Madrid, 2011.

Ley de Aguas Nacionales, Diario Oficial de la Federación, 1º de diciembre de 1992, Texto vigente última reforma publicada en el DOF 11-08-2014, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

FUENTES INTERNET

Agua, Wikipedia La enciclopedia libre, [rev. 18 de diciembre, 2014], Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Agua>

¿Habrá agua para alimentar al mundo?, Joaquín Olona, España, iagua, [rev. 18 de diciembre, 2014], Disponible en <http://www.iagua.es/blogs/joaquin-olona/habra-agua-alimentar-mundo>

Usos del agua en México, [rev. 7 de enero, 2015], <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usos.aspx?tema=T>

Fuentes que se consultaron:

www.iagua.es/

<http://mundoaguaysaneamiento.net/>

<http://culturadelagua.pe/Docs/0/app/>

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmk/jimenez_t_da/capitulo17.pdf

http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05_serie/yelmedioambiente/4_agua_v08.pdf

<http://www.fusda.org/revista11pdf/Revista11%20-5ELAGUAENMEXICO%20.pdf>

http://www.foroconsultivo.org.mx/libros_editados/agua_2012/mexico.pdf

<http://culturadelagua.pe/Docs/0/app/>

Documentos que se consultaron en internet

El agua en nuestro país:

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmk/jimenez_t_da/capitulo17.pdf

Agua:

http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05_serie/yelmedioambiente/4_agua_v08.pdf

El agua en México:

<http://www.fusda.org/revista11pdf/Revista11%20-5ELAGUAENMEXICO%20.pdf>

Diagnóstico del agua en las américas:

http://www.foroconsultivo.org.mx/libros_editados/agua_2012/mexico.pdf



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES