

COMPARACIÓN ENTRE LA HUELLA HÍDRICA DE BIODIESEL OBTENIDO A PARTIR DE ACEITE DE COLZA Y ACEITE DE SOJA.

B. M. Civit^{1,2}, A. P. Arena^{1,2}, R. Piastrellini^{1,2}, S. Curadelli¹, J. Silva Colomer³

¹Grupo CLIOPE, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza – Cnel. Rodríguez 273 – C. P. 5500 – Mendoza – Teléfono 54 261 5243001

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CCT – Mendoza – Avenida Ruiz Leal s/n C. P. 5500 – Localidad Mendoza – Mendoza – Teléfono 54 261 5244054

³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – EEA Junín – Isidoro Busquet s/n La Colonia - Junín bcivit@frm.utn.edu.ar

RESUMEN: En la Argentina, el uso de biomasa para la producción de biocombustibles líquidos capaces de sustituir los de origen fósil ha despertado grandes expectativas. En los últimos años, se ha triplicado la producción de biodiesel, y la tendencia sigue en alza. Sin embargo, podrían presentarse algunos problemas ambientales asociados al uso del suelo y especialmente al uso del agua. El propósito de este estudio es calcular el volumen de agua que se usa y consume en el proceso de obtención de biodiesel con aceite de colza (*Brassica napus*) y de soja (*Glycine max*) en dos regiones del país. Para ello se utiliza como indicador la Huella Hídrica tal como está definida por la Water Footprint Network. Los resultados sugieren que desde el punto de vista del uso del agua, el biodiesel obtenido a partir de colza en zona árida irrigada, puede ser más benigno que aquel que se obtiene a partir de soja en una subhúmeda.

Palabras clave: huella hídrica, cultivos energéticos, biocombustibles, sostenibilidad ambiental.

1 INTRODUCCIÓN

En Argentina, en los últimos cinco años se ha triplicado la producción de aceites vegetales para la fabricación de biodiesel y la proyección sigue siendo creciente (CARBIO, 2011). Esto es así porque, en este país, el uso de biomasa para la producción de biocombustibles líquidos que puedan sustituir los de origen fósil ha despertado grandes expectativas. Sin embargo, existen algunos problemas ambientales potenciales asociados que podrían eventualmente frenar esta tendencia. Entre los aspectos que se empiezan a analizar se incluyen las condiciones de uso directo e indirecto de la tierra, el desplazamiento de la frontera agrícola, el incremento en el uso de fertilizantes, las emisiones de carbono, el balance neto de energía, el uso de agua. A este último se le debe prestar especial atención porque es cada vez mayor la implementación de riego suplementario en las plantaciones de cultivos energéticos con la finalidad de incrementar la producción total de grano o semilla. Esta es una práctica habitual en las regiones áridas donde la única posibilidad de agricultura es en sistemas irrigados. Sin embargo, ello no ocurría en las regiones más húmedas del país, y el uso de agua para irrigar cultivos con fines energéticos puede ocasionar inconvenientes en la disponibilidad de agua destinada a la producción de alimentos, al consumo domiciliario, sanitario, otros. Por otra parte, no sólo se debe considerar la cantidad de agua que ingresa y se usa o consume en la producción del cultivo, sino la calidad de aquella que puede resultar afectada por la lixiviación de agroquímicos que se aplican. Estos aspectos pueden afectar la sostenibilidad ambiental de los biocombustibles y deben tenerse en consideración cuando se quiere evaluar el desempeño ambiental de un biocombustible frente a un combustible fósil o a otro tipo de energía alternativa.

1.1 La huella hídrica como indicador de sostenibilidad ambiental

La idea de sostenibilidad se fundamenta en asegurar que los recursos disponibles no se consuman más rápido de lo que se renuevan y que los desechos y emisiones no se liberen con mayor velocidad que aquella a la que pueden ser absorbidas por los distintos sistemas. Diversos indicadores han sido propuestos para cuantificarla. Entre ellos, el concepto de “huella” como una medida cuantitativa de la apropiación de los recursos por parte del hombre en la última década ha cobrado fuerza entre investigadores y científicos, pero también entre productores, consumidores y tomadores de decisión. Una huella es entonces un indicador de sostenibilidad. Hasta el momento se han definido: la huella ecológica, la huella de carbono y la huella hídrica.

La huella ecológica tuvo su origen en la década de los ‘90 y se define como “una medida de la carga impuesta por una población dada a la naturaleza” (Wackernagel y Rees, 1996). Relaciona los consumos y las emisiones que se producen como consecuencia de las actividades humanas con la superficie del planeta que se necesita para proveer recursos consumibles y absorber las emisiones y residuos generados (capacidad biológica). Se expresa en hectáreas globales por habitante (gha/hab) (Civit, 2009). La segunda de las huellas, la de carbono, está íntimamente ligada a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y por lo tanto, al cambio climático. Se define como la cantidad neta de GEI emitidos por un producto, un individuo, una organización o una nación en un período de un año. Se expresa en unidad de peso de CO₂ equivalente. Por último, la huella hídrica, es la más reciente de las tres, y fue introducida por primera vez en 2003 por Arjen Hoekstra, y luego Hoekstra y Chapagain en 2007 definieron y desarrollaron una herramienta que calcula el consumo directo e indirecto de agua por parte de un consumidor o un productor. El concepto es similar al de la huella ecológica, pero contabilizando agua en lugar de superficie productiva. Esta huella fue concebida como una herramienta analítica, geográficamente explícita, para

abordar cuestiones relacionadas con políticas de seguridad hídrica y uso sostenible del agua, relacionando la ubicación (y la extensión) donde se produce el uso con el consumo que realizan las personas (Hoekstra et al., 2011).

El cálculo de la huella hídrica permite cuantificar el volumen total de agua consumida y/o contaminada por unidad de tiempo que se emplea para producir un bien o un servicio, o que consume un individuo, una comunidad o una fábrica teniendo en cuenta toda el agua utilizada en los procesos involucrados en la cadena de suministro del producto. El Manual para Evaluar la Huella Hídrica (Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard) de Hoekstra et al., 2011, establece cuatro etapas en el cálculo de la huella hídrica: a) Definición de objetivos y alcance, en la que se definen cuestiones como ¿Cuál es el interés en el estudio? ¿Se considerará huella hídrica directa o indirecta? ¿Cómo se considerará el tiempo un año concreto o la media de unos pocos años, o el análisis de tendencias? ¿Qué proceso se considerará en el estudio? ¿Será un proceso específico o procesos alternativos con el fin de comparar las huellas de cada uno? ¿En qué escala se definirá el estudio? ¿Se considerará un proceso determinado en un lugar específico o el mismo proceso en diferentes sitios? ¿Se evaluará un producto? ¿En qué escala?, entre otras; b) Contabilidad de los volúmenes de agua a lo largo del ciclo de vida del producto, proceso u objeto de estudio (Inventario); c) Análisis de sostenibilidad, en la que se relaciona los valores de huella encontrados con un valor de referencia elegido según la escala y el objetivo del estudio; y por último, d) las recomendaciones, en donde se pueden proponer estrategias de reducción del uso y consumo de agua con el fin de contribuir a la sostenibilidad del sistema considerado.

1.2 La sostenibilidad de los cultivos energéticos. La Huella Hídrica en los sistemas agrícolas

El aumento en el uso y consumo de agua dulce a escala global se relaciona con el incremento de la población mundial que tiene asociada una mayor producción de productos agrícolas para el consumo interno. Sin embargo, numerosos países han incrementado el uso de agua dulce porque producen bienes primarios (commodities) para exportar a aquellos países que no pueden producirlos en sus territorios. Este último es precisamente el caso de Argentina, que exporta agua en forma "virtual" en los productos agrícolas que tienen como destino el mercado externo. El agua virtual de un commodity es el volumen de agua que se usó para producirlo, extraída y medida en el lugar donde éste se produjo. La contraparte de esta situación es que otros tantos países prefieren importar commodities que podrían producir ellos mismos porque de ese modo no comprometen sus reservas de agua dulce con otros fines distintos de la producción de alimentos (Chapagain y Hoekstra, 2004).

Por otra parte, en la mayoría de los productos elaborados de base agrícola, como los biocombustibles, justamente la etapa agrícola suele ser la más relevante en términos de uso y consumo de agua. Por lo tanto, efectuar un uso sostenible del recurso hídrico resulta indispensable puesto que Argentina es un país netamente exportador de agua virtual tanto en las materias primas como en productos elaborados de base agrícola (ver Water Footprint Network).

El propósito de este trabajo es contabilizar el volumen de agua que se consume en el proceso de obtención de biodiesel con aceite de colza (*Brassica napus*) y de soja (*Glycine max*) en dos regiones del país. Para ello se seguirá el enfoque y la metodología propuesta por Hoekstra et al., 2011.

2 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA.

De acuerdo con lo establecido en el Manual para Evaluar la Huella Hídrica (Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard) (Hoekstra et al., 2011), en el cálculo de la huella hídrica de un producto de base agrícola se contabiliza la precipitación efectiva (WF green o huella verde) y el agua superficial o subterránea aportada por riego suplementario para la producción del cultivo (WF blue o huella azul). No se consideran las pérdidas en el riego porque se asume que esa agua retorna de algún modo a la fuente y queda disponible para re-usarse. Por otra parte, se cuantifica también el volumen de agua que se necesita para asimilar la carga de contaminantes aportada como consecuencia del uso de agroquímicos (WG grey o huella gris). La huella hídrica de un determinado producto será diferente según el sitio y al momento en que se realice el estudio porque es un indicador espacio-tiempo dependiente. Si el producto es de base agrícola, en esa etapa se deberá tener en cuenta la producción o rendimiento del cultivo expresado en t/ha.

Los casos analizados contemplan todas las labores de la etapa agrícola necesarias para la obtención de cultivos energéticos en el sitio agrícola, así como los procesos industriales involucrados en las etapas de secado del grano, extracción de aceites vegetales y obtención de biodiesel. Los cálculos se efectúan para tres periodos de tiempo diferentes que corresponden en primer lugar a la huella hídrica calculada con los datos meteorológicos correspondientes al año 2009, coincidente a las campañas consideradas tanto para el cultivo de colza como de soja. En segundo lugar, y con la finalidad de establecer la importancia del período de tiempo seleccionado para el cálculo, se consideró para la década 1999 – 2009 el año con menor y mayor precipitación en todos los sitios en donde se encuentran emplazados los cultivos estudiados. A estos últimos se los identifica en todos los casos como "período seco" y "período húmedo" respectivamente y corresponden a período seco para los tres casos: año 2003 y período húmedo: año 2000 (Junín, Mendoza) y año 2002 (Manfredi, Córdoba). De acuerdo a UNPE (1002), la región donde se encuentra emplazado el cultivo de colza en Mendoza es una región árida, mientras que la soja se encuentra en una región subhúmeda, al sur de Córdoba.

2.1 Caso 1: Biodiesel a partir de colza canola (*Brassica napus*)

2.1.1 Etapa agrícola

En la etapa agrícola se considera el proceso productivo de la semilla de colza canola cultivada en oasis irrigado en el departamento de Junín, provincia de Mendoza, Argentina. Se tiene en cuenta la producción de semilla de cinco parcelas sembradas con una extensión de 90 m² cada una, ocupando 450 m² en total. Están orientadas en dirección Este-Oeste, sobre la margen izquierda del predio de la Estación Experimental Agropecuaria Junín del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

El estudio abarca un ciclo productivo completo comenzando en el mes de abril de 2008 y finalizando en marzo de 2009. La unidad funcional considerada es 1 kg de semilla de colza. La producción promedio de semilla por ha es de 2700 kg, por lo tanto la superficie necesaria para obtener la unidad funcional es equivalente a 2,7 m².

Los datos meteorológicos son extraídos de la Estación Experimental Agropecuaria INTA-Junín (latitud: 33°S, longitud: 68°W, altitud: 657 msnm) correspondientes a los años 2000 (periodo húmedo), 2003 (periodo seco) y 2009 (periodo promedio). Además considera un suelo de textura franco arenoso. En esta etapa se analiza la preparación del terreno, la siembra, el desarrollo del cultivo, el riego, y la cosecha.

Preparación del terreno

Durante el mes de marzo de 2008, se realizaron tareas de preparación del terreno, entre ellas el desmalezado que se efectuó por medio de una rastra conducida mediante un tractor Maffei Ferguson 250 con un consumo medio de gasoil de 9 L/ha. Se agregó fosfato diamónico para contrarrestar las deficiencias nutricionales del suelo en una proporción de 80 kg/ha. El mismo se transporta desde la ciudad de Mendoza, a 54,5 km de las parcelas.

Siembra

La siembra se realizó los primeros días del mes de abril de 2008. Se consumió 4 kg/ha de semilla de las variedades Legacy y Jury. La siembra se efectúa de manera manual, en surcos de 15 cm de altura y distanciados 0,60 m cada uno.

Aplicación de agroquímicos

En esta etapa se consideró el agregado de los siguientes agroquímicos: Confidor, Urea, Treflan R. La aplicación se realizó en forma manual. Las cantidades aplicadas de cada uno de ellos es información del J. Silva Colomer y su equipo de trabajo en INTA EEA Junín, Mendoza.

Riego

Durante todo el ciclo del cultivo se efectuaron 8 riegos distribuidos desde la etapa previa a la siembra hasta antes de la cosecha. Se empleó agua de riego superficial correspondiente al turno que otorga el Departamento General de Irrigación de la provincia de Mendoza. El riego se produce por gravedad, es decir, no se emplea bomba para la distribución del agua. Se inunda las parcelas hasta alcanzar los 0,15 m de altura y se detiene el ingreso de agua.

Cosecha

La cosecha de las vainas se llevó a cabo durante finales del mes de noviembre y principios del mes de diciembre de 2008. Se usó una cosechadora impulsada por un tractor Maffei Ferguson 250, con un consumo promedio de gasoil de 9 L/ha.

2.1.2 Secado del grano

Las vainas con las semillas se dejan secar al aire libre sin necesidad del uso de secadores industriales porque el contenido de humedad de las semillas es inferior al 3%, lo cual no presenta peligro de formación de mohos. Una vez comprobado el secado de las semillas se las almacena para su distribución a granel.

2.1.3 Etapa industrial

En esta etapa se consideran los procesos de extracción de aceite y obtención del biodiesel de colza (metil-éster de colza). La unidad funcional definida es 1 kg de biodiesel de colza. Los datos de inventario corresponden a una planta industrial tipo de nivel internacional, y fueron extraídos de Jungbluth et al. (2007).

Extracción de aceite

En esta etapa se considera el proceso de extracción por solventes por ser la tecnología más difundida internacionalmente para la producción de aceites vegetales destinado a biocombustibles (Jungbluth et al., 2007).

La primera fase en la planta de extracción consiste en la recepción y limpieza del grano para eliminar impurezas. Una vez limpio, el grano ingresa a molinos quebrantadores donde cada poroto es partido en seis u ocho trozos y calentado para pasar luego por molinos de cilindros donde se obtienen láminas de espesores comprendidos entre los 0,3 y 0,4 mm. Durante el laminado se incrementa entre cuatro y seis veces el área expuesta y se logra la ruptura de células que contienen aceite. Posteriormente se realiza una expansión de las láminas obteniendo un material poroso que facilita la extracción del aceite. Una vez ajustadas su temperatura y su humedad, las láminas expandidas ingresan al proceso de extracción por solvente, utilizando hexano en la mayoría de los casos. La temperatura óptima de extracción está en el rango de 60-65° C. La semilla triturada se pone en contacto con el solvente y forma una miscela. Esta miscela es posteriormente destilada para separar el aceite y recuperar el solvente. El aceite crudo obtenido se somete a un proceso de refinación el cual consta de varias etapas (desgomado, neutralización, descerado, decoloración, desodorización) en las que se eliminan gomas, pigmentos, metales, hidroperóxidos, ceras y ácidos grasos libres. El residuo sólido resultante es sometido a un proceso de desolventización y tostado para obtener harina de colza que puede ser posteriormente compactada para obtener pellets destinados a alimentación animal.

Las entradas del proceso incluyen el grano de colza, gas natural (708 MJ/t grano), energía eléctrica (42 kWh/t grano), hexano (1 kg/t grano), bentonita (2,2 kg/t grano) y ácido fosfórico (0,4 kg/t grano). El rendimiento promedio es de 379 kg de aceite y 621 kg de harina cada 1000 kg de semilla de colza procesada. Los efluentes resultantes del sistema (2,7 kg/t grano) son tratados en una planta de tratamientos local. Se asume esta determinación porque es la práctica habitual en la mayoría de las instalaciones que producen aceite vegetal.

Transesterificación

El metil-éster de colza se obtiene por transesterificación del aceite vegetal mediante un proceso continuo que consiste en mezclar el grano con un catalizador y con un alcohol (generalmente se usa metanol). Luego la mezcla se transporta a un reactor donde se produce la esterificación de los ácidos grasos libres, manteniendo la temperatura con una camisa de vapor de agua. El producto de la reacción se neutraliza con ácido y se separa por decantación obteniendo biodiesel crudo y glicerina cruda. El metanol es reciclado por evaporación o destilación y regresa nuevamente al sistema. Posteriormente se realiza la purificación del biodiesel que consiste en tres fases: recuperación del metanol por evaporación o decantación, lavado del biodiesel para eliminar impurezas como glicerina, alcohol, jabones; y secado del biodiesel para eliminar restos de agua. La purificación de la glicerina comienza con una fase de refinamiento físico (destilación) o químico (sulfato de aluminio o cloruro férrico), seguida de una fase de lavado con inyección de vapor y posterior blanqueo con carbón activado.

Las entradas del proceso por tonelada de aceite son: 110,5 kg metanol, 4,5 kg de ácido sulfúrico, 11 kg de hidróxido de sodio, 26,6 kg de agua, 41,1 kWh de energía eléctrica, 898,6 MJ de gas natural. El rendimiento promedio es de 100 kg de glicerina, y 1 tonelada de biodiesel por tonelada de aceite refinado. Los efluentes resultantes son de 58,7 kg.

2.2 Caso 2: Biodiesel a partir de soja (*Glycine max*)

2.2.1 Etapa agrícola

El caso de estudio considera los siguientes procesos productivos: 1) Soja primera en siembra directa continua bajo riego suplementario, en el sur de la provincia de Córdoba, Argentina y 2) Soja primera en siembra directa continua en secano, en la región central de la provincia de Córdoba, Argentina. La Unidad Funcional definida para ambos sistemas es 1 kg de grano de soja. Los datos meteorológicos utilizados pertenecen a la Estación Experimental Agropecuaria INTA-Manfredi (latitud: 31°49'S, longitud: 63°46'W, altitud: 292 msnm.), y corresponden al año 2002 considerado como período húmedo, al año 2003 como período seco y al año 2009 como período promedio. Las características edáficas responden a un suelo de textura franco-limoso. Las operaciones incluidas en esta etapa son siembra directa, fertilización, aplicación de pesticidas, riego y cosecha.

Siembra directa

La siembra directa consiste en la ausencia de labranzas y la presencia de una cobertura permanente del suelo, vía cultivos y rastrojos de cultivos anteriores. Este esquema permite producir sin degradar el suelo y alcanzar un uso más eficiente del agua. La siembra se realiza los primeros días del mes de noviembre en el sistema no irrigado y a finales del mes de octubre en el sistema bajo riego. Se utiliza en promedio 70 kg/ha de semillas de soja RR, resistentes al Round Up.

Fertilización

El sistema en secano se fertiliza con fosfato monoamónico, mientras que el sistema bajo riego se fertiliza con fosfato diamónico. En ambos casos la dosis aplicada fue de 70 kg/ha.

Aplicación de pesticidas

Los pesticidas aplicados, en promedio, en distintas zonas del sistema de cultivo sin irrigar son: Glifosato; Metsulfuron Metil; 2,4 D; Inoculante + Fungicida; Roundup Max; Decis Forte; Lorsban 48 E; Cipermetrina; Endosulfán; Opera. Las cantidades aplicadas fueron tomadas de Donato et al., 2008.

Para el sistema bajo riego se consideró un Manejo Integrado de Plagas en el cual no se realizan tratamientos preventivos sino que se trabaja en función de los umbrales de plagas y enfermedades (Martelloto et al., 2009).

Riego

Con respecto al sistema irrigado se consideró un equipo de pivote central, transportable, de 5 tramos y 1 voladizo, que riega una superficie de 32 ha. El agua es suministrada por una perforación, que posee una electrobomba sumergible, con una demanda de energía de 40 kWh y una eficiencia de aplicación del riego de 90%. (Martelloto et al., 2005; 2009)

Cosecha

La cosecha se efectúa a mediados del mes de marzo en el sistema irrigado y a comienzos del mes de abril en el sistema de secano. El sistema irrigado alcanza una producción de 3,8 toneladas de grano por hectárea en condiciones agroclimáticas

óptimas (Martelloto et al., 2009), mientras que el sistema en seco alcanza una producción óptima de 2,8 toneladas de grano por hectárea (Donato et al., 2008).

2.2.2 Etapa industrial

Esta etapa corresponde a la caracterización de los procesos de secado del grano, extracción de aceite y obtención del biodiesel de soja (metil-éster de soja). Se define como unidad funcional a 1 kg de biodiesel de soja. Los datos de inventario fueron extraídos de Huerga et al. (2009) y Jungbluth et al. (2007).

Secado del grano

El porcentaje de humedad del grano de soja al momento de la cosecha es de 16%, el cual debe ser reducido, en un primer secado, a 13% para su almacenamiento y posteriormente, en un segundo secado, a 10% para ingresar en la molienda (Panichelli, 2008). El 25% del grano se seca en acopiadora, mientras que el resto se seca en la planta aceitera. Un 10% de la producción se seca utilizando gasoil como combustible, el resto se seca con gas natural, gas licuado y cáscara de girasol.

Extracción de aceite

Al igual que en el caso del biodiesel de colza se considera la tecnología de producción de aceites vegetales por extracción con hexano como solvente. Para cada tonelada de grano de soja procesado se requiere 2,14 kg de hexano, 2,3 kg de bentonita, 0,169 kg de ácido fosfórico, 85,8 kg de agua, 4,03 m³ de gas natural y 3,06 KWh de electricidad. Los productos obtenidos son: aceite de soja refinado (190 kg/t grano) y harina de soja (810 kg/t grano).

Transesterificación

El desarrollo general del proceso de transesterificación de aceite de soja es similar al descrito para el biodiesel de colza. Con este proceso, para la obtención de una tonelada de biodiesel es necesario 1,12 t de aceite de soja, 380 kg de metanol, 6,4 kg de hidróxido de sodio, 6,4 kg de ácido sulfúrico, 29,7 kg de agua, 25,6 m³ de gas natural y 45,5 kWh de electricidad, obteniendo 120 kg de glicerina como subproducto y 70 kg de sales como residuos.

2.3 Árbol de producto para el biodiesel

La fracción de valor entre productos y subproductos de la fase de extracción de aceite y de transesterificación en ambos casos de estudio se calculó sobre la base de precios internacionales de mercado porque el biodiesel tiene como principal destino la exportación (CARBIO, 2011; MAGyP, 2011).

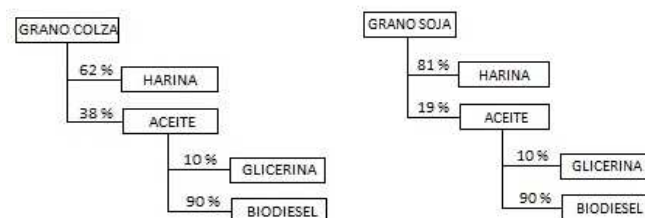


Figura 1: Fracción de productos y subproductos del proceso de elaboración de biodiesel a partir de colza y de soja.

Se asume un precio de 506 U\$S/t de harina de colza, 1400 U\$S/t de aceite de colza, 386 U\$S/t de harina de soja, 1258 U\$S/t de aceite de soja, 300 U\$S/t de glicerina cruda, 600U\$S/t de glicerina refinada y 1226 U\$S/t biodiesel (Figura 1).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de huella verde (WF green), huella azul (WF blue) y huella gris (WF grey) para los tres sistemas agrícolas considerados se exponen en esta sección. La Tabla 1 muestra los valores de huella verde, huella azul, huella gris y huella total de todos los casos considerados.

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la etapa agrícola representa el 88% de la huella hídrica del biodiesel de colza y el 79% en el caso del biodiesel de soja. En esta etapa, como es previsible, el menor volumen de agua corresponde al período húmedo y el mayor volumen al período seco, para los tres sistemas agrícolas considerados. Esto se debe a que en el año “seco” en los sistemas irrigados, es necesario aportar un volumen considerablemente mayor de agua suplementaria para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo que en las otras situaciones. En el caso del sistema de seco, en el año seco, la huella total es mayor, contrariamente a lo que sugiere la WF green. Esto se debe a que en el año seco el agua proveniente de la precipitación fue menor, lo fue también la producción por unidad de superficie cultivada, y la huella total disminuye.

Sistema agrícola	Período	WF green (m ³ /t)	WF blue (m ³ /t)	WF grey (m ³ /t)	WF total (m ³ /t)
Colza bajo riego	Húmedo	226	1322	339	1887
	Seco	6	1690	339	2035
	Año 2009	40	1646	339	2025
Soja bajo riego	Húmedo	1158	708	313	2179
	Seco	834	1208	313	2355
	Año 2009	981	954	313	2248
Soja en secano	Húmedo	1540	0	356	1896
	Seco	1224	0	356	1988
	Año 2009	1486	0	356	1956

Tabla 1: Huella hídrica de cultivos energéticos para sistemas agrícolas bajo riego y en secano. Período húmedo: año 2000 (Junín, Mendoza) y año 2002 (Manfredi, Córdoba), período seco: año 2003.

Se destaca que, si bien la huella gris de la producción de soja bajo riego (313 m³/t) es menor que la de soja en secano (356 m³/t), la diferencia no es significativa a pesar de que en el sistema irrigado se realiza un manejo integrado de plagas, confirmando que los fertilizantes son los agroquímicos que tienen más influencia sobre la huella gris. En la etapa industrial la fase de extracción de aceite es la más representativa.

Del mismo modo que se calculó la huella de la etapa agrícola de cada cultivo y en cada sitio, se calculó la huella de la etapa industrial, que consiste en huella de la etapa de extracción de aceite (WF aceite) y la huella de la etapa de obtención de biodiesel (WF biodiesel). La Tabla 2 compila los resultados obtenidos para la etapa industrial. Las variaciones entre cada período considerado son consecuencia de las diferencias en el rendimiento de cada situación contemplada. En esta etapa se observa la misma tendencia que se registró en la etapa agrícola: mayor huella en el año seco.

Sistema	Período	WF aceite (m ³ /t)				WF biodiesel (m ³ /t)			
		WF blue	WF green	WF grey	WF total	WF blue	WF green	WF grey	WF total
Colza bajo riego	Húmedo	2189	374	561	3124	2319	396	594	3310
	Seco	2799	10	561	3370	2965	11	594	3569
	Año 2009	2725	67	561	3353	2887	71	594	3552
Soja bajo riego	Húmedo	1607	2628	711	4946	1702	2783	753	5239
	Seco	2741	1893	711	5345	2904	2005	753	5662
	Año 2009	2165	2226	711	5102	2293	2358	753	5405
Soja en secano	Húmedo	0,19	3495	808	4303	0,23	3702	856	4558
	Seco	0,19	3703	808	4512	0,23	3923	856	4779
	Año 2009	0,19	3631	808	4439	0,23	3846	856	4702

Tabla 2: Huella hídrica de la producción de biodiesel a partir de colza y de soja bajo riego y en secano. Período húmedo: año 2000 (Junín, Mendoza) y año 2002 (Manfredi, Córdoba), período seco: año 2003.

Estos valores resultantes permiten conocer el volumen total de agua consumido en cada caso, y sugieren cuál de las alternativas de materia prima cultivada en distinto sitio es más benigna desde el punto de vista del consumo de agua. Sin embargo, el valor de huella hídrica encierra información valiosa cuando se realiza el análisis de sostenibilidad. El mismo consiste en analizar el resultado obtenido en la etapa de conteo o inventario de volumen de agua consumida por unidad de producto respecto de la disponibilidad de agua de una cuenca, en un sitio geográfico específico, los recursos hídricos renovables de un país, para un sector determinado, el agua disponible en un proceso o comunidad, dependiendo de cuál sea el objetivo propuesto. En el caso de aplicación de este trabajo, como el objetivo es calcular la huella hídrica del proceso de obtención de biodiesel a partir de dos materias primas distintas en dos regiones diferentes también, el análisis de sostenibilidad se realiza teniendo en cuenta los recursos hídricos renovables de la Argentina, tomados de Hoekstra y Chapagain (2004) que han estimado los volúmenes disponibles de recursos hídricos renovables totales para cada país, considerando los sectores productivo, doméstico e industrial. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

Huella hídrica del biodiesel de soja (km ³ /año) ¹	Recursos hídricos renovables totales (km ³ /año) ²	Consumo doméstico de recursos hídricos (km ³ /año) ²
8,41	814	4,68

¹ Para una producción anual de 1.900.000 t de biodiesel (CADER, 2011)

² Hoekstra y Chapagain (2004)

Tabla 3. Relación de la Huella Hídrica del biodiesel de soja con los recursos hídricos totales y el consumo doméstico

La huella hídrica resultante del proceso de obtención de biodiesel en Argentina representa el 1% del volumen total de los recursos hídricos renovables del país. Este resultado por sí solo no parece alarmante y haría suponer que es prácticamente

“inofensivo”, sin embargo, este valor equivale aproximadamente a dos veces el volumen de agua que consume la población argentina por año para uso doméstico (Tabla 3). Puesto de este modo, el 1% obtenido adquiere una dimensión que alerta al productor y al consumidor. En el contexto del productor, éste se debe ver alentado para buscar alternativas de manejo y tecnológicas que permitan disminuir los consumos de agua en el proceso productivo. De acuerdo con Hoekstra y Chapagain (2007), en los sistemas agrícolas la reducción de la huella hídrica puede lograrse mediante diversos modos. Uno puede ser la incorporación de técnicas de producción que requieran menos agua por unidad de producto, por ejemplo, la adopción de un sistema de riego eficiente o establecer medidas de conservación de agua y de tratamiento de efluentes. Otra manera de reducir la huella es modificar los patrones de consumo de aquellos productos que requieren grandes volúmenes de agua. Existe otra manera en que podría reducirse la huella hídrica, tal vez la más controvertida y difícil de implementar, que es trasladar la producción agrícola de las zonas donde el agua es escasa a zonas de alta productividad de agua, permitiendo así optimizar el recurso y mejorar la eficiencia global de uso del agua. En el caso analizado en este trabajo, el biodiesel que se obtiene a partir de colza canola producida en Junín, Mendoza, podría ser una alternativa sostenible para tierras secas, porque es un cultivo de invierno, y no compite por el uso del agua de los cultivos predominantes en este tipo de tierras como la vid, olivos y otros frutales y hortalizas.

En el contexto del consumidor, la comparación de la huella hídrica del biodiesel en argentina con el consumo de agua de los argentinos puede ser controvertida también porque el territorio argentino presenta muy disímiles regiones, con diferentes índices de estrés hídrico y distintos patrones de asignación del recurso. Por lo tanto, para establecer de manera rigurosa cuál es el impacto que produce la huella hídrica del biodiesel se debe complementar el análisis con un estudio de impactos que puede efectuarse en el contexto de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (SETAC, 1993) como lo sugieren Ridoutt, BG y Pfister (2010), Bayart et al., (2010), Milà i Canals et al., (2009), Milà i Canals et al., (2010) y Boulay et al. (inédito). Por otra parte, las elecciones de los consumidores deben ser reflexivas y acordes a los objetivos del desarrollo sostenible, prevaleciendo en la decisión de consumo de producto aquel que ha incluido pautas de sostenibilidad en su proceso de producción.

Para este último punto todavía queda un largo camino por recorrer en Argentina como en la mayoría de los países del mundo, sin embargo, la difusión de este tipo de estudios está orientada también a la educación del consumidor en el desarrollo sostenible.

4 CONCLUSIONES

Del análisis realizado surge que la huella hídrica del biodiesel obtenido a partir de colza en una zona árida irrigada es considerablemente menor que la del biodiesel que se obtiene a partir de soja en una región subhúmeda. En cuanto a los dos procesos productivos de soja estudiados (en secano e irrigado) se destaca que el sistema irrigado presenta mayores valores de huella hídrica.

Los resultados que se han obtenido en este trabajo manifiestan claramente que la estimación y análisis de la huella hídrica es muy útil para promover una asignación eficiente del agua y recursos económicos. Este análisis puede proporcionar un marco transparente y multidisciplinario para los productores y los tomadores de decisiones en políticas del agua, contribuyendo al mismo tiempo a la sostenibilidad ambiental, social y económica de la región donde se produzcan las materias primas para los biocombustibles.

Por último, se hace especial énfasis en que la huella hídrica es una herramienta de sostenibilidad ambiental, específica para evaluar el uso y consumo del agua, pero que es complemento de otras herramientas o metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida, por ejemplo, que permitiría tener una visión holística de los problemas ambientales asociados a los biocombustibles en relación con los combustibles fósiles u otras alternativas de uso de energías más limpias o energías renovables.

REFERENCIAS

- Bayart, JB, Bulle, C, Deschenes, J, Margni, M, Pfister, S, Vince, F y Koehler, A (2010) A Framework for Assessing Off-Stream Freshwater Use in LCA. A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment Volume 15, Number 5, 439-453, DOI: 10.1007/s11367-010-0172-7
- Cámara Argentina de Biocombustibles (CARBIO) www.carbio.com.ar
- Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER) (2011). Estado de la Industria Argentina de Biocombustibles: Reporte cuarto trimestre 2010, www.argentinarenovables.org/archivos/Estado-Industria-Biodiesel.
- Civit, B (2009) Sostenibilidad ambiental. Desarrollo de indicadores regionales para su aplicación en estudios de análisis de ciclo de vida en la región árida del centro oeste argentino. Tesis de Doctorado ISBN 978-987-9126-91-2 – Universidad Nacional de Cuyo – Mendoza, Argentina
- Donato, L, Huerga, I, Hilbert, A (2008) Balance energético de la producción de biodiesel a partir de aceite de soja en la republica argentina. INTA Report, 2008, N° Doc. IIR-BC-INF-08-08.
- Gerbens-Leenes, PW; Hoekstra, AY and Th van der Meer (2008) The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. ECOLOGICAL ECONOMICS 68 (2009)1052–1060.
- Hoekstra, A.Y. (2003) (ed) Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, IHE Delft, the Netherlands.

- Hoekstra AY; Chapagain AK (2004). Water footprints of nations. Volume 2: Appendices. Value of Water Research Report Series No. 16. UNESCO-IHE. Institute for Water Education.
- Hoekstra, AY & Chapagain, AK (2008). Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Blackwell Publishing. Oxford, UK.
- Hoekstra, AY and Chapagain, AK (2007) Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resour Manage* (2007) 21:35–48, DOI 10.1007/s11269-006-9039-x
- Hoekstra, A, Chapagain, A, Aldaya, M y Mekonnen, M (2011) The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan, London • Washington, DC
- Huerga I; Hilbert JA; Donato L (2009) Balances energéticos de la producción argentina de biodiesel con datos locales de la etapa industria, INTA Reporte N° Doc IIR-BC-INF-03-09.
- Jungbluth N, Faist Emmenegger M, Dinkel F, Stettler O, Doka G, Chudacoff M, Dauriat A, Gnansounou E, Sutter J, Spielmann M, Kljun N, Schleiss K (2007). Life cycle inventories of bioenergy. Data v2.0 (2007), ecoinvent report No. 17, Swiss Center for Life Cycle Inventories, Uster.
- Martelloto, E; Salinas, A; Lovera, E (2009) El riego suplementario en cultivos extensivos. XVII Congreso AAPRESID: "La era del ecoprogreso", 2009, August, 19-21.
- Martelloto, E; Salinas, A; Lovera, E; Salas, P; Álvarez, C; Giubergia, J; Lingua, S (2005). Inventario y caracterización del riego suplementario en la provincia de Córdoba. Riego presurizado Pívo central. INTA, Boletín N°10. 2005, August.
- Milà i Canals, L, Chenoweth, J, Chapagain, A, Orr, S, Antón, A and Clift, R (2009) Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I—inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *The International Journal of Life Cycle Assessment* Volume 14, Number 1, 28-42, DOI: 10.1007/s11367-008-0030-z
- Milà i Canals, L, Chenoweth, J, Chapagain, A, Orr, S, Antón, A and Clift, R (2010) Assessing freshwater use impacts in LCA: Part II: case study of broccoli production in the UK and Spain. *The International Journal of Life Cycle Assessment* Volume 15, Number 6, 598-607, DOI: 10.1007/s11367-010-0187-0
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) (2011). Series de precios FOB oficiales, año 2011. http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/agricultura/precios_fob_-_exportaciones.
- Panichelli, L, Dauriat, A y Gnansounou E (2008). Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008.
- Ridoutt, BG and Pfister, S (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20 (1) 113–120; doi:10.1016/j.gloenvcha.2009.08.003
- UNEP (1992) World Atlas of Desertification, United Nations Environmental Program, ISBN 340555122.
- Wackernagel, M y Rees, W (1996) Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth. New Society Publishers, Gabriola Island, BC, Canada

ABSTRACT

In Argentina, the use of biomass to obtain liquid biofuels that can replace fossil fuels has great expectations. In recent years, has tripled the production of biodiesel, and the trend is rising. However, there may be some environmental problems associated with land use and especially with the use of water. The purpose of this study is to estimate and compare the use and consumption of water in the production of biodiesel from oil rapeseed (*Brassica napus*) and from soybean (*Glycine max*), in two different regions. The used indicator is the water footprint as defined by the Water Footprint Network. The results suggest that from the perspective of water use, biodiesel made from rapeseed in irrigated arid zone may be more benign than that obtained from soybeans in a subhumid one.

Keywords: Water footprint, energetic crops, biofuels, environmental sustainability